

ANALISA TEGANGAN EKSPERIMENTAL DENGAN METODA FOTOELASTISITAS

Andi Isra Mahyuddin, Refrizal Boestamam, Djoko Suharto *)

RINGKASAN

Analisa tegangan dengan metoda fotoelastisitas tembus cahaya dua-dimensi adalah salah satu metoda optik yang digunakan dalam yang akan diuji dibuat modelnya dari bahan polimer tembus cahaya. Model kemudian diletakkan pada perangkat pengujian dan dibebani serupa dengan pembebanan prototip. Hasil pengujian berupa pola garis isokromatik yang merupakan tempat kedudukan titik dengan selisih tegangan utama, $\sigma_1 - \sigma_2$, yang sama dan pola garis isoklinik yang merupakan tempat kedudukan titik dengan arah tegangan utama yang sama. Data orde isokromatik dan parameter isoklinik digunakan untuk menentukan distribusi tegangan.

Studi kasus dilakukan untuk flens poros dan rangka samping bogie kereta api. Analisa dilakukan untuk beberapa penampang yang dianggap dapat mewakili keseluruhan bidang model dan di daerah kritis.

1. PENDAHULUAN

Dalam bidang teknik mesin sering dijumpai berbagai masalah perencanaan maupun perencanaan kembali suatu elemen, komponen atau struktur. Perencanaan haruslah memperhatikan masalah yang berkaitan dengan kekuatan terhadap pembebanan di samping kemampuan fungsionalnya.

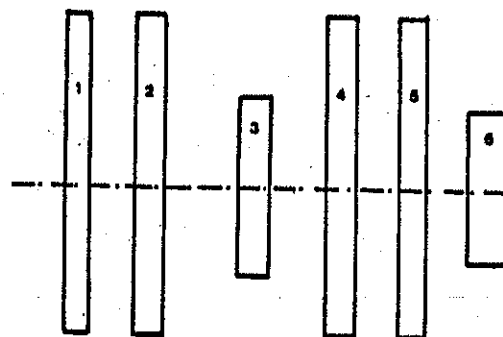
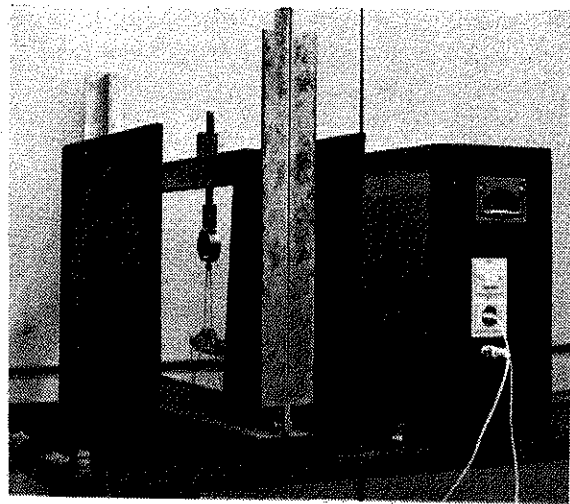
Teori elastisitas mungkin dapat digunakan untuk menganalisa tegangan dengan tepat. Tetapi bentuk geometri dan jenis pembebanan yang tidak umum akan menimbulkan kesulitan dalam penyelesaian persamaan matematisnya, sehingga metoda teoritis ini hanya berguna untuk bentuk dan pembebanan sederhana.

Untuk mengatasi kesulitan penyelesaian di atas, maka dianjurkan untuk menggunakan analisa tegangan eksperimental. Dengan metoda ini distribusi dan kondisi tegangan yang sebenarnya akan dapat diketahui, sehingga akibat pembebanan pada elemen suatu sistem dalam kondisi operasinya dapat diperhitungkan dengan lebih pasti. Beberapa metoda eksperimental untuk analisa tegangan adalah:

- * Metoda Lapisan Getas (*brittle coating method*)
- * Metoda Pengukuran Regangan (*strain measurement method*)
- * Metoda Optik (*optical method*)

Salah satu metoda optik dalam analisa tegangan eksperimental adalah fotoelastisitas tembus cahaya. Dalam metoda ini dipergunakan suatu perangkat optik yang terdiri atas sumber cahaya, polarisator dan analisator untuk mendapatkan arah dan pola tegangan pada model. Elemen yang akan diuji, terlebih dulu dibuat modelnya dari bahan polimer tembus cahaya dan dibebani sesuai dengan jenis

pembebanan pada kondisi operasi prototipnya. Ukuran model dan besarnya pembebanan serta tegangan dapat ditentukan berdasarkan analisa dimensi.



1. Analisator
2. Pelat seperempat gelombang
3. Model
4. Pelat seperempat gelombang
5. Polarisator
6. Sumber cahaya

* Laboratorium Dasar Khusus Mesin Peralatan Pertanian dan Energi Surya Jurusan Mesin ITB.

Gambar 1. Perangkat pengujian fotoelastisitas.

2. TEORI OPTIK

Perangkat pengujian analisa tegangan dengan metoda fotoelastisitas ditunjukkan pada gambar 1. Untuk analisa tegangan eksperimental ini, digunakan dua jenis polariskop, yaitu polariskop bidang dan polariskop lingkaran. Cahaya terpolarisasi bidang dihasilkan oleh polarisator bidang, sedangkan cahaya terpolarisasi melingkar memerlukan pelat gelombang di samping polarisator bidang.

2.1. Polariser Bidang.

Pada polarisator bidang, cahaya yang datang akan terurai atas dua komponen. Komponen yang sejajar dengan sumbu polarisasi diteruskan, sedangkan komponen yang tegak lurus terhadap sumbu polarisasi diserap atau dipantulkan kembali. Jika persamaan vektor cahaya dapat dinyatakan sebagai:

$$E = a \cos \omega t \dots\dots\dots (a)$$

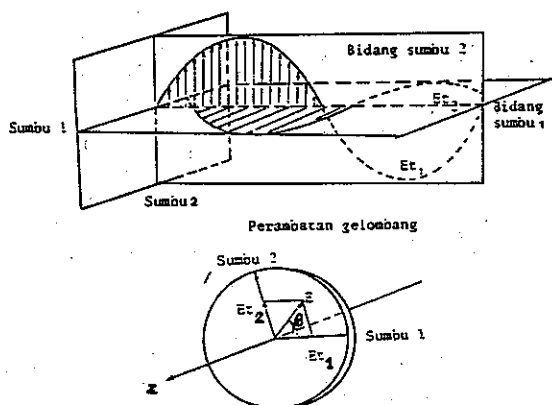
Komponen yang diserap, E_a dan yang ditransmisikan, E_t , adalah,

$$E_a = a \cos \omega t \sin \alpha \quad \text{dan} \\ E_t = a \cos \omega t \cos \alpha \dots\dots\dots (b)$$

di mana α adalah sudut antara sumbu polarisasi dan vektor cahaya.

2.2. Pelat Gelombang.

Pelat Gelombang adalah elemen optik yang mempunyai kemampuan untuk meneruskan cahaya dengan kecepatan yang berbeda. Fenomena ini disebut pembiasan berganda. Pelat pembiasan berganda pada gambar 2 mempunyai dua sumbu utama. Kecepatan transmisi cahaya sepanjang sumbu 1 adalah c_1 , sedangkan pada sumbu 2 adalah c_2 . Karena c_1 lebih besar dari c_2 , sumbu 1 disebut juga sumbu cepat dan sumbu 2 adalah sumbu lambat.



Gambar 2. Vektor cahaya terpolarisasi bidang pada pelat pembiasan berganda.

Jika pelat gelombang diletakkan pada medan cahaya terpolarisasi linier dengan sudut β terhadap sumbu 1, maka vektor cahaya akan diuraikan atas E_{t1} dan E_{t2} , yang besarnya masing-masing adalah:

$$E_{t1} = E_t \cos \beta = a \cos \alpha \cos \omega t \cos \beta \\ = k \cos \omega t \cos \beta \\ E_{t2} = E_t \sin \beta = a \cos \alpha \cos \omega t \sin \beta \\ = k \cos \omega t \sin \beta$$

dengan $k = a \cos \alpha$. E_{t1} dan E_{t2} akan merambat dengan kecepatan berbeda, c_1 dan c_2 . Beda kecepatan ini menyebabkan kedua komponen keluar dari pelat pada saat yang berbeda. Retardasi ini menimbulkan pergeseran fasa relatif di antara kedua komponen. Pergeseran fasa linier untuk komponen E_{t1} dan E_{t2} bila dibandingkan dengan gelombang di udara adalah,

$$\delta_1 = h (n_1 - n) \quad \text{dan} \\ \delta_2 = h (n_2 - n)$$

di mana n adalah indeks bias udara, n_1 dan n_2 adalah indeks bias dalam arah sumbu 1 dan sumbu 2, sedangkan h adalah ketebalan pelat gelombang, sehingga pergeseran fasa linier relatif adalah $\delta = \delta_2 - \delta_1 = h (n_2 - n_1)$. Pergeseran fasa sudut relatif, Δ , di antara kedua komponen dapat dinyatakan oleh:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_2 - n_1) \dots\dots\dots (2.1)$$

Pergeseran fasa sudut relatif, Δ , bergantung pada ketebalan h , panjang gelombang λ , dan sifat bias pelat yang dinyatakan sebagai $(n_2 - n_1)$. Pelat gelombang yang direncanakan untuk memberikan retardasi sebesar $\pi/2$ disebut pelat seperempat gelombang. Gelombang yang keluar dari pelat terdiri atas komponen berikut:

$$E_{t1}' = k \cos \beta \cos \omega t \quad \text{dan} \\ E_{t2}' = k \sin \beta \cos (\omega t - \Delta) \dots\dots\dots (2.2)$$

Besarnya vektor cahaya ekuivalen dari kedua komponen adalah:

$$E_t' = k \sqrt{\cos^2 \beta \cos^2 \omega t + \sin^2 \beta \cos^2 (\omega t - \Delta)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Sudut antara vektor cahaya keluar dengan sumbu 1 adalah:

$$\tan \gamma = \frac{E_{t2}'}{E_{t1}'} = \frac{\cos (\omega t - \Delta)}{\cos \omega t} \tan \beta \dots\dots\dots (2.4)$$

Jelaslah bahwa, baik amplitudo maupun arah vek-

tor cahaya keluar pelat dapat diatur dengan mengubah beda fasa sudut relatif Δ dan sudut orientasi β .

2.3. Pengkondisian Cahaya dengan Kombinasi Seri Polarisor Linier dan Pelat Gelombang.

Besar dan arah vektor cahaya yang keluar dari polarisor dan pelat gelombang diberikan oleh persamaan (2.3) dan (2.4). Cahaya yang keluar selalu terpolarisasi, bisa dalam bentuk polarisasi bidang, lingkaran atau elips. Faktor penentu jenis polarisasi ini adalah beda fasa sudut relatif Δ dan sudut orientasi β .

Jika $\beta = 0$ dan retardasi relatif, Δ sembarang, maka:

$$E_t' = k \cos \omega t \quad \text{dan} \quad \gamma = 0$$

Vektor cahaya tidak diputar saat melalui pelat gelombang, sehingga cahaya tetap terpolarisasi linier. Hal yang sama juga dapat dicapai untuk harga $\beta = \pi/2$ dan Δ sembarang, yang akan memberikan besaran,

$$E_t' = k \cos (\omega t - \Delta) \quad \text{dan} \quad \gamma = \frac{\pi}{2}$$

Cahaya terpolarisasi melingkar jika pelat gelombang mempunyai harga $\Delta = \pi/2$ dan $\beta = \pi/4$. Besar dan arah cahaya keluar pelat adalah:

$$E_t' = \frac{\sqrt{2}}{2} k \sqrt{\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t} = \frac{\sqrt{2}}{2} k$$

dan $\gamma = \omega t$

Vektor mempunyai besaran konstan, sedangkan ujung cahaya membentuk lingkaran pada saat rotasi.

3. TEORI FOTOELASTISITAS

Bahan polimer tembus cahaya, yang bersifat optik isotropik pada saat bebas tegangan, menjadi anisotropik dan menunjukkan sifat yang mirip dengan kristal jika dibebani. Kelakuan ini disebut pembiasan berganda sementara (temporary double refraction), karena hanya ada selama pembebanan berlangsung. Metoda fotoelastisitas didasarkan atas sifat fisik bahan polimer tembus cahaya ini.

Anisotropik optik yang terjadi pada bahan menyebabkan berbedanya indeks bias pada tiap arah sumbu utama, sesuai dengan keadaan tegangan-tegangan utama. Hubungannya disebut hukum tegangan-optik.

Hubungan antara perubahan indeks bias dengan tegangan, menurut Maxwell, adalah berbanding lurus dan dapat dinyatakan sebagai:

$$n_1 - n_0 = C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\begin{aligned} n_2 - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_3 + \sigma_1) \\ n_3 - n_0 &= C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \dots (3.1) \end{aligned}$$

di mana:

$$\begin{aligned} \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 &= \text{tegangan utama.} \\ n_0 &= \text{indeks bias bahan dalam keadaan tanpa tegangan.} \\ n_1, n_2, n_3 &= \text{indeks bias pada pembebanan, sesuai arah tegangan utama.} \\ C_1, C_2 &= \text{konstanta, koefisien tegangan-optik.} \end{aligned}$$

Untuk keadaan tegangan bidang ($\sigma_3 = 0$), maka:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2 \\ n_2 - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1 \dots (3.2) \end{aligned}$$

atau dapat dinyatakan sebagai:

$$n_2 - n_1 = (C_2 - C_1) (\sigma_1 - \sigma_2) = C (\sigma_1 - \sigma_2) \dots (3.3)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.1) dan (3.3), pergeseran fasa sudut relatif pada persoalan dua dimensi, dapat dinyatakan sebagai,

$$\Delta = \frac{2\pi h C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \dots (3.4)$$

Tegangan σ_1 dan σ_2 adalah tegangan utama, dengan σ_1 lebih besar dari σ_2 , tetapi tidak lebih besar dari $\sigma_3 = 0$ jika tegangan pada bidang adalah tegangan tekan. Persamaan (3.4) dapat dinyatakan dalam bentuk berikut:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N \cdot f_\sigma}{h} \dots (3.5)$$

dengan

$$N = \frac{\Delta}{2\pi} \dots (3.6)$$

adalah retardasi relatif dalam siklus retardasi, dan

$$f_\sigma = \frac{\lambda}{C} \dots (3.7)$$

adalah sifat bahan model untuk panjang gelombang tertentu dan disebut nilai fringe bahan (*material fringe value*), sedangkan h adalah ketebalan model.

Dengan persamaan (3.5) dapat dihitung beda tegangan pada model dua dimensi, jika retardasi relatif N dapat ditentukan dan f_σ ditetapkan dengan kalibrasi. Fungsi polariskop sebetulnya adalah untuk menentukan harga N dari tiap titik pada model.

4. PEMBEBANAN MODEL PADA POLARISKOP BIDANG

Suatu model yang dibebani diletakkan pada bidang polariskop bidang, dengan garis normal ber-

impit sumbu polariskop. Arah tegangan utama diasumsikan membentuk sudut α terhadap sumbu polarisasi polarisator.

Polarisator hanya meneruskan komponen cahaya yang sejajar sumbu polarisasinya. Cahaya terpolarisasi yang keluar dari polarisator dapat dinyatakan sebagai:

$$E_{py} = k \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (i)$$

Cahaya kemudian memasuki model. Karena model yang dibebani menunjukkan sifat optik seperti pelat gelombang, maka vektor cahaya akan diuraikan atas dua komponen dengan arah getaran sejajar arah tegangan utama. Besarnya adalah:

$$\begin{aligned} E_1 &= k \cos \alpha \cos \omega t \\ E_2 &= k \sin \alpha \cos \omega t \end{aligned} \quad \text{dan} \quad \dots\dots\dots (ii)$$

Kedua komponen menjalar dengan kecepatan berbeda, sehingga menimbulkan pergeseran fasa Δ_1 dan Δ_2 .

Gelombang keluar model dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} E_1' &= k \cos \alpha \cos (\omega t - \Delta_1) \\ E_2' &= k \sin \alpha \cos (\omega t - \Delta_2) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (iii)$$

Selanjutnya gelombang memasuki analisator, yang bersifat seperti polarisator, tetapi dengan sumbu polarisasi horizontal. Komponen E_1' dan E_2' diuraikan menjadi komponen horizontal E_1'' dan E_2'' serta komponen vertikal yang diserap.

Komponen horizontal yang keluar adalah:

$$E_{ax} = E_2'' - E_1'' = E_2' \cos \alpha - E_1' \sin \alpha \quad \dots\dots (iv)$$

Substitusi persamaan (iii) ke (iv) memberikan:

$$E_{ax} = k \sin 2\alpha \cdot \sin \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\Delta_2 + \Delta_1}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Pergeseran fasa sudut relatif rata-rata, $\left(\frac{\Delta_2 + \Delta_1}{2} \right)$, mempengaruhi fasa cahaya tetapi tidak mempengaruhi amplitudo, sehingga tidak berpengaruh terhadap intensitas. Retardasi relatif intensitas cahaya yang keluar dari analisator.

Intensitas cahaya berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo gelombang cahaya. Cahaya keluar dari analisator dengan intensitas sebesar:

$$I = k \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

dengan

$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \frac{2\pi hC}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Dari persamaan (4.2) diketahui pemadaman ($I = 0$) terjadi jika $\sin^2 2\alpha = 0$ atau $\sin^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) = 0$.

Jadi salah satu syarat pemadaman berhubungan dengan arah tegangan utama α dan yang lain dengan beda tegangan utama Δ .

4.1. Efek Arah Tegangan Utama.

Jika $2\alpha = n\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots$, maka $\sin^2 2\alpha = 0$ dan terjadi pemadaman. Jadi, intensitas nol akan tercapai jika salah satu arah tegangan utama berimpit dengan sumbu polarisator. Jika model diamati pada medan cahaya polariskop, akan teramati suatu pola garis yang merupakan tempat kedudukan titik dengan arah tegangan utama berimpit dengan sumbu polarisator. Pola yang dihasilkan disebut pola garis isoklinik dan digunakan untuk menentukan arah tegangan utama semua titik pada model. Pola isoklinik bisa didapatkan dengan mengubah kedudukan polariskop dan menggabungkan garis-garis yang diamati untuk mendapatkan parameter isoklinik pada keseluruhan bidang model.

4.2. Efek Perbedaan Tegangan Utama.

Pada $\frac{\Delta}{2} = n\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots$, maka $\sin^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) = 0$ dan menyebabkan $I = 0$. Jika model diamati pada polariskop, kondisi ini menghasilkan pola garis kedua. Garis selisih tegangan ($\sigma_1 - \sigma_2$) merupakan tempat kedudukan titik dengan orde pemadaman, N , sama. Pola ini disebut garis isokromatik.

Dari persamaan (3.4) dan hubungan $n\pi = \frac{\Delta}{2}$ dapat diturunkan persamaan berikut:

$$n = \frac{hC}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \dots\dots\dots (v)$$

Orde n ditentukan oleh beda tegangan utama, $\sigma_1 - \sigma_2$, dan panjang gelombang λ . Untuk beda tegangan utama tertentu hanya ada satu panjang gelombang cahaya monokromatik yang menghasilkan orde pemadaman n .

Penggunaan cahaya putih akan menghasilkan pola yang berwarna-warni. Intensitas nol atau garis gelap hanya muncul jika beda tegangan utama = 0, sehingga terjadi pemadaman. Harga $\sigma_1 - \sigma_2$ tertentu akan menyebabkan hilangnya warna dengan panjang gelombang tertentu dari cahaya putih, sehingga yang muncul adalah warna komplementernya. Pada $\sigma_1 - \sigma_2$ yang relatif besar, garis isokromatik akan menjadi kabur karena beberapa warna menjadi hilang.

Dengan menggunakan cahaya monokromatik, pola isokromatik akan muncul sebagai garis-garis

gelap, karena intensitas nol dicapai untuk harga $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Pola yang dihasilkan tetap jelas dan tajam, bahkan pada orde yang tinggi. Persamaan (v) dapat juga dinyatakan dalam bentuk orde garis isokromatik, N .

$$N = \frac{h}{f_g} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad \dots \dots \dots (vi)$$

Penggunaan polariskop bidang menyebabkan pola garis isoklinik dan isokromatik muncul bersamaan. Pola garis isoklinik didapatkan dengan melakukan pembebanan rendah, sehingga pola garis isokromatik belum muncul oleh karena rendahnya harga $\sigma_1 - \sigma_2$.

Kemudian untuk memperoleh pola isokromatik saja digunakan polariskop lingkaran (3), yang memberikan intensitas cahaya keluar analisator sebesar:

$$I = k \sin^2 \frac{\Delta}{2} \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

sehingga yang muncul hanya pola garis isokromatik tanpa isoklinik karena intensitas hanya ditentukan oleh faktor beda tegangan utama.

Jika orde isokromatik satu titik diketahui, maka beda tegangan utama dapat dihitung dengan persamaan (vi).

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N \cdot f_g}{h}$$

Untuk harga σ_1 berlawanan tanda dengan σ_2 , maka tegangan geser maksimum adalah,

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Untuk harga σ_1 dan σ_2 positif $\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_1$, sedangkan untuk σ_1 dan σ_2 negatif $\sigma_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_2$.

Pada tepi bebas model, salah satu tegangan utama besarnya nol, sehingga tegangan utama sejajar tepi bebas dapat ditentukan.

Tanda ditentukan dengan pemeriksaan jenis pembebanan, apakah pembebanan menimbulkan tegangan tarik atau tekan pada tepi bebas.

5. METODA SEPARASI

Berdasarkan data orde isokromatik N , hanya dapat dihitung beda tegangan utama, $\sigma_1 - \sigma_2$, pada tepi bebas. Pada daerah pedalaman diperlukan analisa separasi untuk menentukan besar masing-masing tegangan utama.

Metoda separasi ini juga memerlukan data parameter isoklinik pada analisisnya, di samping data orde isokromatik. Beberapa metoda yang umum dipakai adalah:

1. Metoda Berdasarkan Persamaan Kesetimbangan.
2. Metoda Sudut Datang Miring.
3. Metoda Berdasarkan Hukum Hooke.
4. Metoda Berdasarkan Persamaan Kompatibilitas.

Di sini hanya akan dibahas salah satu metoda berdasarkan persamaan kesetimbangan, yaitu metoda perbedaan tegangan geser. Metoda ini digunakan dalam analisa kasus-kasus yang akan dibahas dalam pengujian.

6. METODA PERBEDAAN TEGANGAN GESER

Persamaan kesetimbangan pada persoalan tegangan-bidang adalah:

$$\frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yx}}{\delta y} = 0 \quad \text{dan} \quad \frac{\delta \sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta x} = 0 \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ adalah komponen tegangan normal dan tegangan geser pada titik pengamatan.

Solusi persamaan kesetimbangan bisa didapatkan dalam bentuk:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\sigma_x)_0 - \int \frac{\delta \tau_{yx}}{\delta y} \delta x \\ &\quad \text{dan} \\ \sigma_y &= (\sigma_y)_0 - \int \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta x} \delta y \quad \dots \dots \dots (5.2) \end{aligned}$$

Persamaan (2.30) dapat didekati dengan bentuk:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\sigma_x)_0 - \sum \frac{\Delta \tau_{yx}}{\Delta y} \Delta x \\ &\quad \text{dan} \\ \sigma_y &= (\sigma_y)_0 - \sum \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta x} \Delta y \quad \dots \dots \dots (5.3) \end{aligned}$$

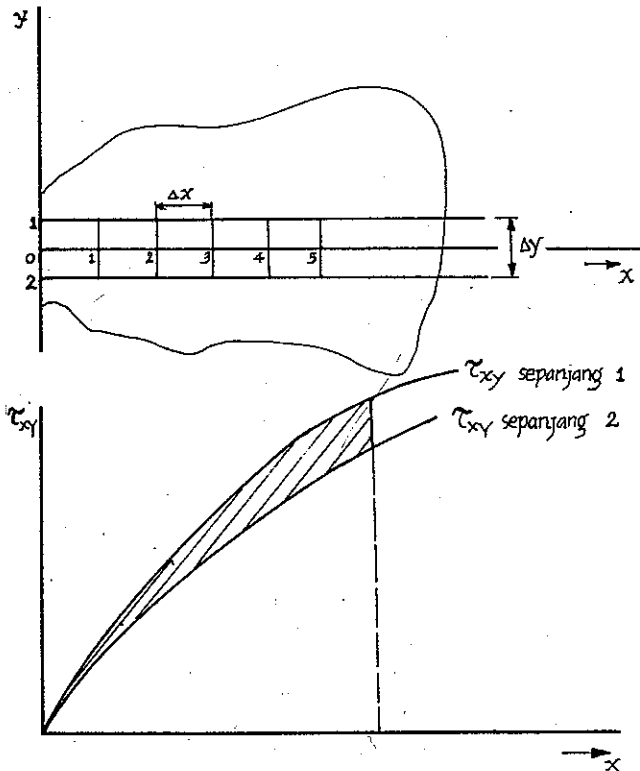
Pada persamaan di atas $(\sigma_x)_0$ dan $(\sigma_y)_0$ adalah tegangan pada titik awal integrasi, yang besarnya diketahui. Titik awal ini biasanya pada batas tepi bebas, karena tegangan dapat dihitung langsung dari data orde isokromatik. τ_{xy} dapat dihitung pada titik dalam model dengan persamaan berikut:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\alpha_1 \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

di mana α_1 adalah parameter isoklinik yang menyatakan sudut antara sumbu x dengan arah σ_1 .

Besarnya τ_{xy} ditentukan dari grafik distribusi tegangan geser sepanjang dua garis bantu yang se-

jajar dengan garis rujukan dan terletak pada jarak yang sama. Pada gambar 3 ditunjukkan sistem grid yang biasanya digunakan pada metoda perbedaan tegangan geser.



Gambar 3. Sistem grid untuk metoda perbedaan tegangan geser.

Sistem grid dibuat sepanjang penampang yang akan dianalisa. Dimensi Δx dan Δy ditentukan. Metoda separasi dilaksanakan sebagai berikut:

- Tentukan orde garis isokromatik dan parameter isoklinik pada tiap titik ($x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$) sepanjang garis 1 dan 2.
- Hitung harga τ_{xy} pada tiap titik,

$$\tau_{xy_n} = \frac{N f_\sigma}{2h} \sin 2\alpha_n.$$

- Hitung perbedaan τ_{xy_n} pada pertengahan x_n dan x_{n-1} .

$$\Delta \tau_{xy_n} = \tau_{xy_1} - \tau_{xy_2}$$

- Hitung $|\sigma_x|_n$ dengan rumus:

$$|\sigma_x|_n = |\sigma_x|_{n-1} - \Delta \tau_{xy_n} \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

- Hitung $|\sigma_y|_n$ berdasarkan persamaan lingkaran Mohr :

$$\begin{aligned} |\sigma_y|_n &= |\sigma_x|_n - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha \\ &= |\sigma_x|_n - \frac{N \cdot f_\sigma}{h} \cos 2\alpha \end{aligned}$$

- Hitung $|\sigma_1|_n$ dan $|\sigma_2|_n$ dari:

$$|\sigma_1|_n = \frac{1}{2} (|\sigma_x|_n + |\sigma_y|_n + \frac{N \cdot f_\sigma}{h})$$

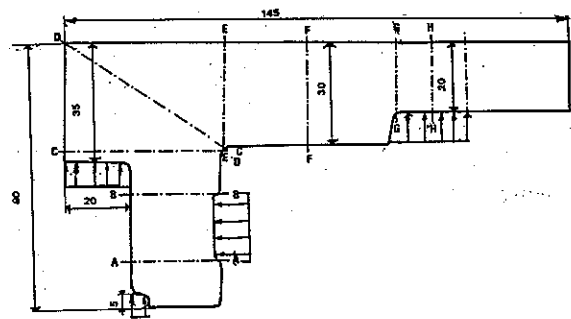
$$|\sigma_2|_n = \frac{1}{2} (|\sigma_x|_n + |\sigma_y|_n - \frac{N \cdot f_\sigma}{h})$$

..... (5.5)

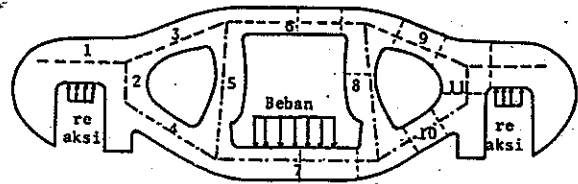
7. PENGUJIAN

Sebagai contoh kasus untuk analisa tegangan eksperimental ini diambil flens poros sebagai contoh pertama dan rangka samping bogie kereta api sebagai contoh kedua.

Bentuk dan ukuran serta pembebanan model yang diturunkan dari flens poros dan rangka samping bogie kereta api adalah seperti pada gambar 4. Secara teoritis daerah kritis poros adalah pada tepi flens (5).



Gambar 4.a. Bentuk, ukuran, dan pembebanan model flens poros.



Gambar 4.b. Bentuk dan pembebanan model rangka samping bogie kereta api.

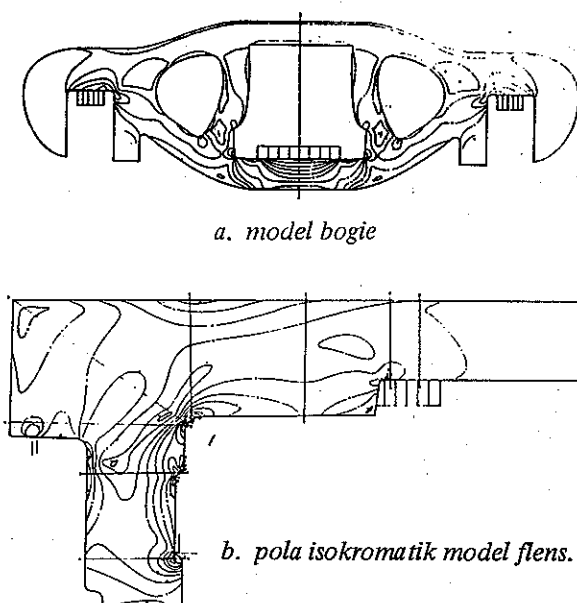
Model dibuat dari bahan epoxy resin yang dikenal sebagai *araldit*. Pengerjaan dilakukan dengan proses permesinan konvensional serta proses akhir yang bertujuan untuk mendapatkan tepi yang licin, sehingga tidak terjadi kesalahan pengamatan pada waktu pengujian. Beban yang diberikan, sesuai dengan analisa dimensi, adalah sebesar 115 N untuk model flens dan 340 N untuk model rangka samping bogie.

Pada flens poros, beban berupa reaksi bantalan pada poros yang terdistribusi merata, sedangkan flens dijepit. Pembebanan model rangka samping bogie kereta api berupa berat gerbong dari bantalan ayun dan gaya reaksi gandar.

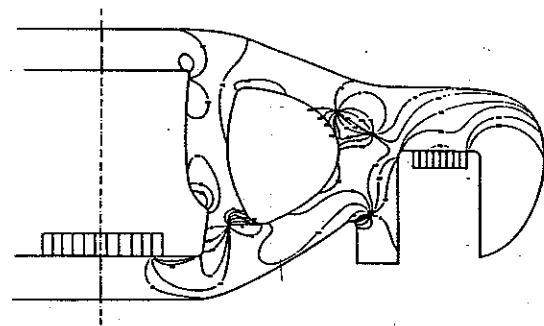
Pengujian pertama kali dilakukan dengan menggunakan sumber cahaya polikromatik (putih). Dari pola isokromatik yang ditimbulkan dapat diketahui daerah dengan orde 0, yang akan kelihatan sebagai titik atau garis gelap. Tetapi pola ini tidak menunjukkan batas yang jelas, sehingga sulit untuk menentukan orde isokromatik satu titik tertentu. Pola garis isokromatik yang lebih tajam didapatkan dengan menggunakan sumber cahaya monokromatik. Garis yang teramati adalah garis gelap yang merupakan garis orde N , bilangan bulat. Pola isokromatik yang timbul diperlihatkan pada gambar 5.

Penentuan orde garis isokromatik dilakukan dengan menghitung mulai dari daerah orde nol. Tiap garis yang bersebelahan haruslah mempunyai harga orde dua bilangan bulat yang berurutan, misalnya N dan $N + 1$. Daerah di antara kedua garis tersebut merupakan daerah dengan orde isokromatik bilangan pecahan. Besarnya dapat daerah dengan orde isokromatik bilangan pecahan. Besarnya dapat ditentukan dengan suatu metoda kompensasi tertentu (2).

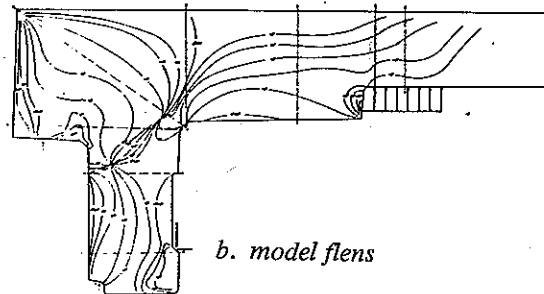
Parameter isoklinik untuk keseluruhan bidang penampang model didapatkan dengan mengubah kedudukan polariskop dengan selang sudut 15° , mulai 0° hingga 90° . Tiap kedudukan memberikan garis isoklinik dengan parameter isoklinik sebesar sudut yang dibentuk sumbu polariskop dengan garis vertikal. Kemudian keseluruhan garis isoklinik digabung dengan melakukan penggambaran pada meja proyeksi. Parameter isoklinik di antara dua garis isoklinik dapat diketahui dengan melakukan metoda kompensasi Tardy (2). Gambar gabungan dari pola isoklinik diberikan pada gambar 6.



Gambar 5. Pola garis isokromatik.



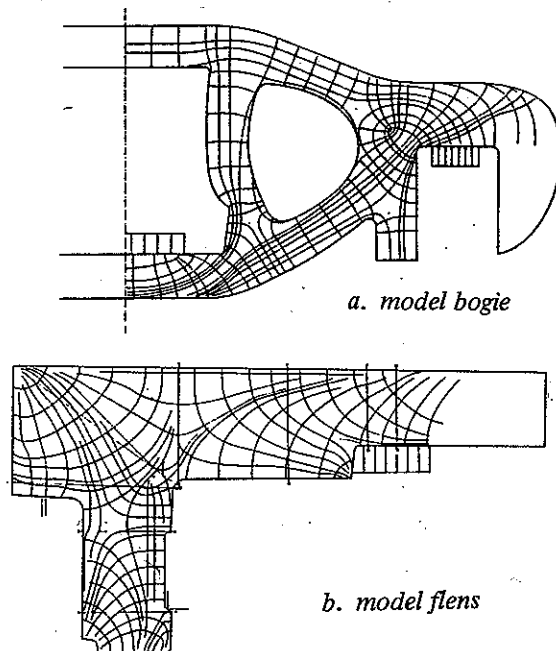
a. model bogie



b. model flens

Gambar 6.a. Pola garis isoklinik.

Pola garis isoklinik saja tidak memberikan gambaran visual tentang arah tegangan utama pada satu titik. Untuk itu dilakukan penggambaran arah tegangan utama dalam bentuk garis isostatik atau *stress trajectory diagram*. Arah tegangan utama pada satu titik adalah tegak lurus atau menyinggung garis isostatik pada titik tersebut. Diagram isostatik dapat digambarkan langsung dari pola gabungan isoklinik dengan cara grafis. Hasil penggambaran arah tegangan dapat dilihat pada gambar 7.

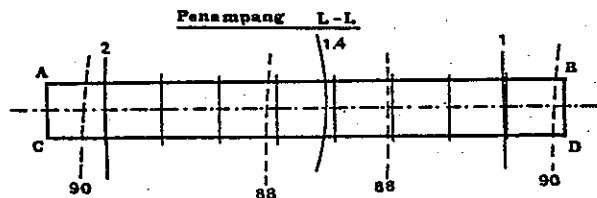


a. model bogie

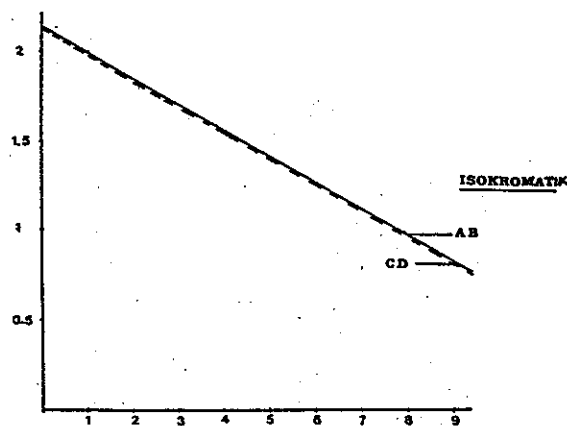
b. model flens

Gambar 7. Diagram isostatik.

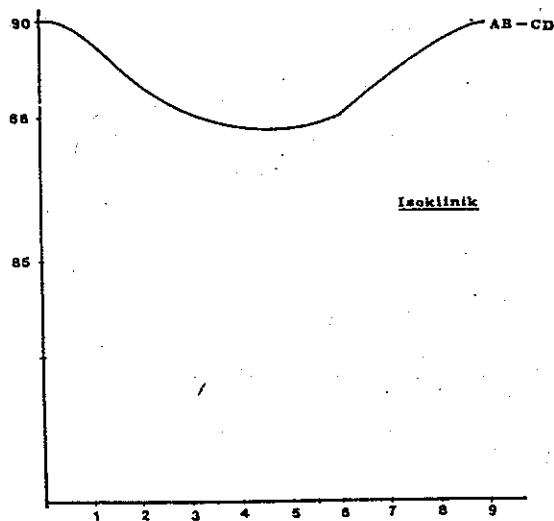
Pada analisa hanya akan ditentukan distribusi tegangan pada beberapa penampang saja. Penampang yang akan ditentukan distribusinya adalah penampang A-A hingga H-H untuk model flens dan penampang A-A hingga L-L untuk model bogie, seperti ditunjukkan pada gambar 4. Pemilihan tersebut dilakukan untuk mengetahui kondisi tegangan pada penampang yang diperkirakan dapat mewakili seluruh model dan pada penampang yang diduga mempunyai konsentrasi tegangan.



Gambar 8. Sistem grid penampang L-L model bogie.



Gambar 9. Kurva orde isokromatik sepanjang penampang L-L.



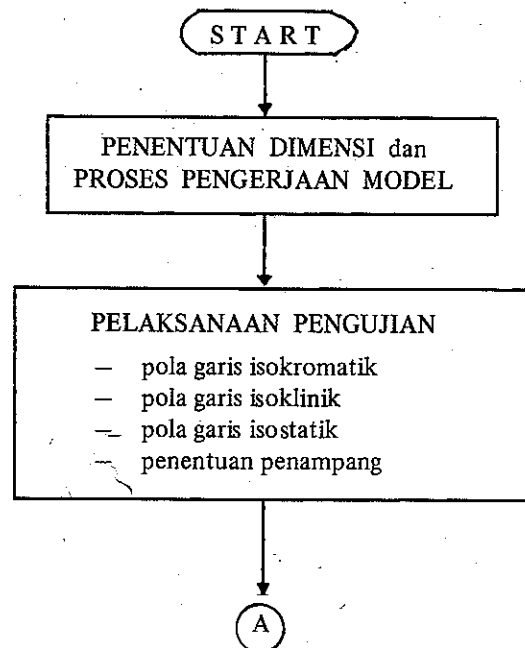
Gambar 10. Kurva parameter isoklinik sepanjang penampang L-L.

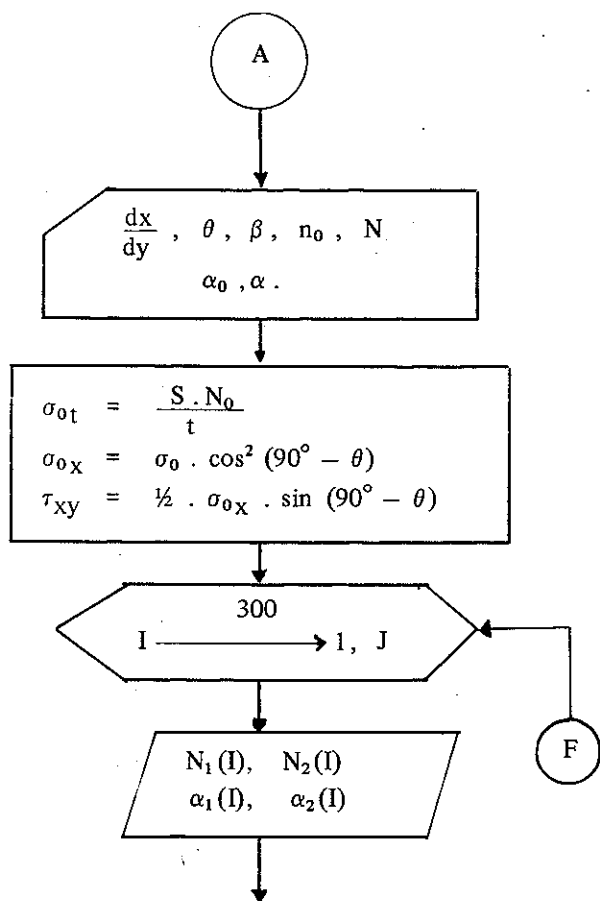
Sebagai contoh, dipilih pengambilan data pada penampang L-L pada model bogie. Pada kedua sisi garis penampang ditarik garis pembantu AB dan CD dengan jarak dy . Penampang L-L dibagi atas 9 grid seperti pada gambar 8. Selanjutnya dilukiskan kurva orde isokromatik dan parameter isoklinik sepanjang garis AB dan CD seperti diperlihatkan pada gambar 9. Dari kurva tersebut didapatkan harga orde isokromatik dan parameter isoklinik pada tiap titik grid. Berbagai harga yang diperoleh diberikan pada tabel 1.

Tabel 1. Orde isokromatik dan parameter isoklinik sepanjang penampang L-L.

	α_1	α_2	N_1	N_2
0	90	90	2.15	2.15
1	90	90	2.00	2.00
2	89	89	1.85	1.85
3	88	88	1.70	1.70
4	88	88	1.55	1.55
5	88	88	1.40	1.40
6	88	88	1.25	1.25
7	89	89	1.10	1.10
8	90	90	0.95	0.90
9	90	90	0.80	0.80

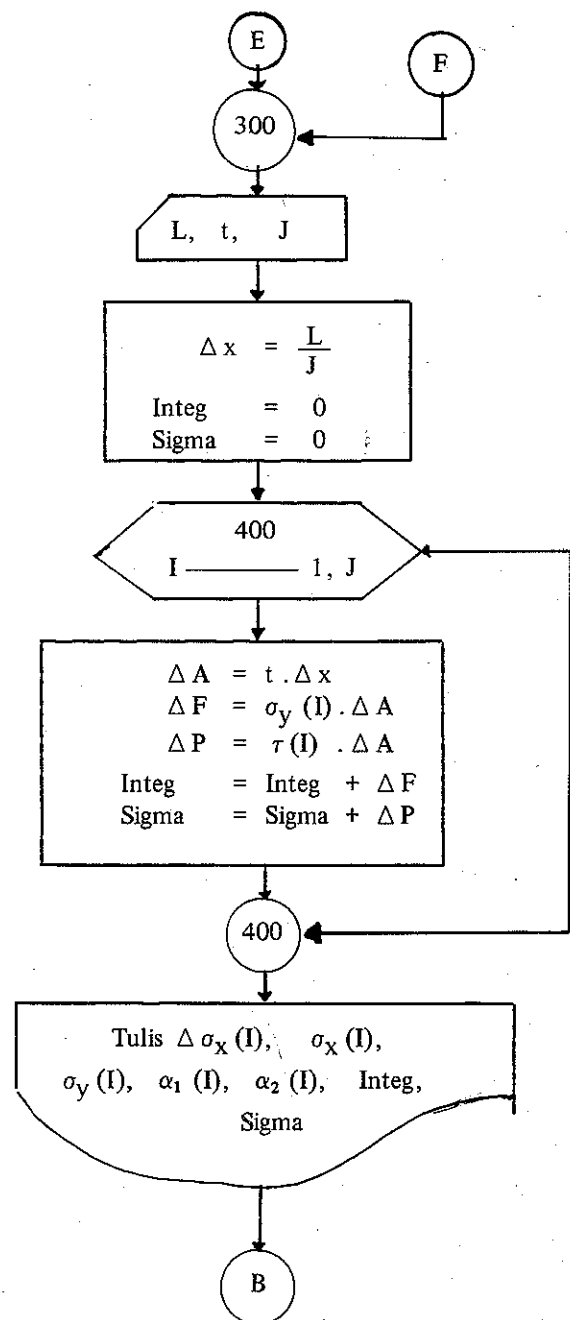
Pengambilan data untuk penampang yang lainnya dilakukan dengan cara yang sama. Dengan menggunakan metoda perbedaan tegangan geser didapatkan harga tegangan utama yang bekerja sepanjang penampang yang diselidiki. Analisa dilakukan dengan metoda numerik. Diagram alir diperlihatkan pada gambar 10. Hasil yang diperoleh dicantumkan pada tabel 2.





$$\begin{aligned}
 \alpha'_1(I) &= \alpha_1(I) + \alpha_1(I-1) \\
 \alpha'_2(I) &= \alpha_2(I) + \alpha_2(I-1) \\
 N'_1(I) &= N_1(I) + N_1(I-1) \\
 N'_2(I) &= N_2(I) + N_2(I-1) \\
 \alpha'(I) &= \alpha_1(I) + \alpha_2(I-1) \\
 N'(I) &= N_1(I) + N_2(I-1) \\
 \tau_1(I) &= \frac{S \cdot N'_1(I)}{2 \cdot t} \cdot \sin 2 \alpha'_1(I) \\
 \tau_2(I) &= \frac{S \cdot N'_2(I)}{2 \cdot t} \cdot \sin 2 \alpha'_2(I) \\
 \Delta \sigma(I) &= [\sigma_1(I) - \tau_2(I)] \cdot \frac{dx}{dy} \\
 \tau(I) &= \frac{1}{2} \frac{S \cdot N'(I)}{t} \sin 2 \alpha'(I) \\
 \sigma_x(I) &= \sigma_x(I-1) + \Delta \sigma(I) \\
 \sigma_y &= \sigma_x(I) \pm (N'(I))^2 - 4 \cdot \tau(I) \\
 &\quad + \text{untuk } \alpha \text{ kecil dari } 45^\circ \\
 &\quad - \text{untuk } \alpha \text{ besar dari } 45^\circ \\
 \sigma_1(I) &= \sigma_x(I) + \frac{S \cdot N'(I)}{t} \sin^2 \alpha(I) \\
 \sigma_2(I) &= \sigma_x(I) - \frac{S \cdot N'(I)}{t} \cos^2 \alpha(I) \\
 \sigma_x &= \sigma_x(I)
 \end{aligned}$$

(E)



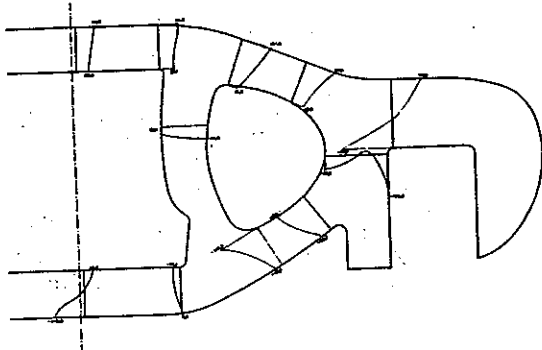
Gambar 10.

Diagram alir penentuan tegangan utama.

Tabel 2. Hasil perhitungan penentuan tegangan utama model rangka samping bogie kereta api.

σ_1	σ_2	τ_{xy}
0.000	- 2.000	0.000
0.001	- 1.849	0.925
0.002	- 1.698	0.350
0.002	- 1.548	0.775
0.002	- 1.398	0.700
0.002	- 1.248	0.625
0.000	- 1.100	0.550
0.000	- 0.950	0.475
0.000	- 0.800	0.400

Hasil yang diperoleh ini merupakan tegangan yang bekerja pada model, sedangkan tegangan yang bekerja pada prototip ditentukan dengan analisa dimensi. Harga-harga tegangan utama yang didapat pada tiap penampang dilukiskan sebagai garis distribusi tegangan yang diberikan pada gambar 11.



Gambar 11. Distribusi tegangan.

8. KESIMPULAN

Berdasarkan studi, pengujian, dan perhitungan yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Pengujian fotoelastisitas tembus cahaya memberikan hasil secara lebih cepat dan mudah, jika dibandingkan dengan analisa teoritis.

Metoda ini dapat membantu dalam proses perencanaan.

2. Kondisi tegangan pada keseluruhan bidang dapat diketahui dengan menentukan orde isokromatik dan parameter isoklinik sepanjang penampang.

9. DAFTAR PUSTAKA

1. Allersma, H.G., Determination of the Stress Distribution in Assemblies of Photoelastic Particle, Journal Experimental Mechanics, September 1982.
2. Budynas, R.G., Advance Strength and Applied Stress Analysis, McGraw Hill – Kogakusha, Tokyo, 1977.
3. Dally, J.W. Experimental Stress Analysis, second edition, McGraw Hill – Kogakusha, Tokyo, 1978.
4. Frocht, M.M., Photoelasticity, Vol I & II, John Wiley & Sons, New York, 1964.
5. Nurprasetio, I.P., Perencanaan dan Pembuatan Peralatan Pengolah Semen Abu Sekam Portland, Tugas Sarjana jurusan Mesin, FTI – ITB, Bandung, 1982.
6. Partosiswoyo, Diktat Kuliah Teknik Kereta Api.



pt KERTA LAKSANA
PABRIK MESIN, LOGAM DAN KONSTRUKSI

IKUT SERTA MENUNJANG PEMBANGUNAN PERINDUSTRIAN DENGAN MESIN :

- MESIN GILING BATU KAPUR/FOSFAT
- MESIN GILING JAMU, REMPAH-REMPAH
- MESIN GILING BIJI-BIJIAN, MAKANAN TERNAK.
- PERALATAN INDUSTRI FARMASI.
- MATERIAL HANDLING EQUIPMENT.
- TANGKI PENYIMPANAN.
- KONSTRUKSI BAJA.

BANDUNG : Jl. Jend. Sudirman 508
Tl. 611093-614833-85719

JAKARTA : Jl. Raden Saleh 51
Tl. 325109-325302

