

# PENGARUH ARAH SERAT DAN SUSUNAN LAPISAN TERHADAP FAKTOR KONSENTRASI TEGANGAN PADA KOMPOSIT LAMINATE CARBON/EPOXY AS4/3501-6 BERLUBANG LINGKARAN DAN ELLIPS

**IGN Wiratmaja Puja**  
**Satryo Soemantri B.**  
**Budi Riyanto**  
Laboratorium Perancangan Mesin  
Jurusan Teknik Mesin ITB

## Abstrak

*Komposit laminate serat-matriks saat ini semakin luas digunakan untuk komponen mesin atau struktur. Seringkali untuk memenuhi tujuan fungsional, komponen laminate tersebut harus dilubangi. Kondisi ini akan menimbulkan konsentrasi tegangan di sekitar lubang. Untuk pelat komposit laminate berpenguat serat, selain tergantung pada geometri dan jenis pembebanan, besarnya faktor konsentrasi tegangan juga tergantung pada sifat keanisotropikan pelat seperti arah serat dan susunan lapisan laminate. Makalah ini menyajikan hasil studi pengaruh arah serat dan susunan lapisan terhadap besarnya faktor konsentrasi tegangan pada komposit laminate berlubang lingkaran dan elips yang mendapat beban uniaksial. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk grafik-grafik konsentrasi tegangan terhadap arah serat, arah susunan lapisan, dan parameter dimensi. Grafik konsentrasi tegangan tersebut dapat langsung digunakan dalam perancangan untuk mendapatkan kekuatan hasil rancangan yang optimum.*

## Abstract

*In recent years, fiber-matrix composite laminates have been widely used in mechanical structures. Due to functional design requirements, the laminates may contain holes that could cause stress concentration. Unlike isotropic plate, where the stress concentration depend upon geometric parameter and loading conditions, stress concentration factor of fiber-matrix composite is also depend on the anisotropic properties such as fiber direction and angle ply. This paper present intensive studies of the influence of the fiber direction and angle ply to the stress concentration factors for composite laminate containing circular and elliptical hole under uniaxial loading. The stress concentration factor curves are presented for various angle ply, fiber direction, and geometric parameter. These curves could be used by designer to obtain the optimum design of laminate structure containing hole.*

## 1. Pendahuluan

Akhir-akhir ini penggunaan material komposit telah mulai digunakan secara luas untuk komponen mesin atau struktur, karena sifat-sifat mekanik istimewa yang dimilikinya. Beberapa sifat mekanik tersebut antara lain adalah kekuatan dan kekakuan yang tinggi, ketahanan lelah, berat jenis yang rendah, tahan korosi, tahan aus dll. Hal ini dimungkinkan karena sifat-sifat mekaniknya dapat dioptimalkan dengan mengatur geometri, distribusi dan orientasi fasa-fasa penyusun-nya. Disamping kelebihan tersebut diatas, material komposit memiliki kelemahan utama yaitu bersifat anisotropik. Sehingga persamaan-persamaan mekanika isotropik untuk analisis tegangan-regangan dalam perancangan tidak berlaku lagi untuk material komposit. Untuk itu perlu dikembangkan metoda analisis tegangan regangan yang baru untuk material yang bersifat anisotropik.

Salah satu tipe material komposit yang banyak digunakan adalah pelat laminate serat-matriks. Seringkali untuk memenuhi tujuan fungsionalnya pelat

tersebut harus dilubangi. Kondisi ini akan mengubah distribusi tegangan di sekitar bagian yang mengalami perubahan geometri atau lubang tersebut. Pada umumnya, distribusi tegangan menunjukkan tegangan lokal yang tinggi di sekitar bagian yang mengalami perubahan geometri tersebut. Tegangan lokal yang tinggi atau konsentrasi tegangan ini umum dinyatakan dengan menggunakan faktor konsentrasi tegangan.

Untuk pelat dari material isotropik, besarnya faktor konsentrasi tegangan di sekitar lubang hanya tergantung pada jenis pembebanan dan geometri seperti dimensi lubang, tebal pelat, dan lebar pelat. Sedangkan untuk pelat komposit berpenguat serat, besarnya faktor konsentrasi tegangan juga tergantung pada sifat keanisotropikan pelat dan arah serat terhadap pembebanan.

Besarnya faktor konsentrasi tegangan di sekitar lubang pada pelat komposit berpenguat serat dapat ditentukan dengan metode analitik, metode numerik, dan metode eksperimental. Pemecahan dengan metode analitik

memerlukan penurunan matematik yang cukup rumit dan hanya terbatas pada bentuk geometri yang sederhana saja. Untuk geometri yang lebih kompleks, penurunan matematik untuk menentukan faktor konsentrasi tegangan sangat sulit dilakukan.

Review penelitian sebelumnya tentang faktor konsentrasi tegangan untuk material isotropik setelah Peterson (1974), pada berbagai bidang aplikasi dipublikasikan oleh Hardy dan Malik (1992). Untuk laminate, analisis distribusi tegangan pada pelat orthotropic dengan lubang lingkaran akibat beban uniaksial pertama kali dilakukan secara analitik oleh Konish dan Whitney (1975). Selanjutnya Delale et.al. (1984) menganalisis konsentrasi tegangan pada laminate metal akibat beban axisymmetric. Analisis tegangan secara eksperimental untuk komposite laminate dilakukan oleh Tan dan Kim (1991).

Melanjutkan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya tersebut, dalam makalah ini penelitian dilakukan dengan tujuan antara lain untuk mengetahui pengaruh geometri lubang dan pelat, arah serat, dan susunan lapisan terhadap besarnya faktor konsentrasi tegangan pada pelat komposit berlubang lingkaran atau elips yang mendapat beban tarik uniaksial. selanjutnya dilakukan optimasi arah serat dan cara penyusunan lapisan untuk mendapatkan harga tegangan maksimum yang paling kecil. Hasil analisa ditampilkan dalam bentuk kurva konsentrasi tegangan terhadap arah serat, arah susunan lapisan dan parameter geometri. Kurva-kurva tersebut dapat langsung digunakan untuk menghitung besarnya konsentrasi tegangan yang terjadi pada struktur laminate yang berlubang dengan menghitung tegangan nominal yang terjadi.

Jenis material serat matriks yang digunakan dalam contoh perhitungan adalah carbon/epoxy (AS4/3501-6) yang memiliki sifat-sifat mekanis  $E_1 = 142\ 000\ \text{MPa}$ ;  $E_2 = 10\ 300\ \text{MPa}$ ;  $G_{12} = 7\ 200\ \text{MPa}$ ; dan  $\nu_{12} = 0,27$  (Daniel, 1994).

## 2. Dasar Teori

Komposite laminate serat-matriks memiliki sifat orthotropik sehingga hukum konstitutive isotropy tidak dapat digunakan untuk analisis tegangan-regangan. Hubungan tegangan-regangan untuk material anisotropik dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan tensor :

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

dimana  $\sigma$  adalah tegangan,  $\varepsilon$  adalah regangan dan  $S_{ijkl}$  adalah matrik compliances. Untuk lamina orthotropik, dimana terdapat tiga buah bidang simetri yang saling tegak lurus maka hubungan tegangan-regangan dalam hal konstanta elastis material adalah

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & -\frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Hubungan antara regangan dan perpindahan pada pelat laminate dalam bidang x-y dapat dinyatakan dalam persamaan diferensial

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_o}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_o}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_s = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

$$\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$$

dimana  $u$ ,  $v$  dan  $w$  adalah perpindahan dalam arah  $x$ ,  $y$  dan  $z$ . Dengan memperhatikan bahwa komponen regangan pada bidang referensi adalah

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^o &= \frac{\partial u_o}{\partial x} \\ \varepsilon_y^o &= \frac{\partial v_o}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\gamma_{xy}^o = \gamma_s^o = \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial v_o}{\partial x}$$

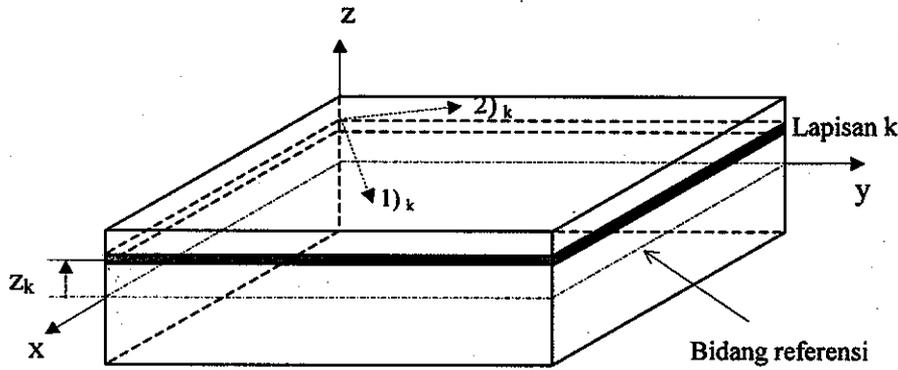
dan kurvatur dari laminate adalah

$$\begin{aligned} \kappa_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \kappa_y &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\kappa_{xy} = \kappa_s = -\frac{2\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

maka hubungan antara regangan pada tiap titik pada laminate dengan regangan pada bidang referensi dan kurvatur laminate dapat dituliskan menjadi :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_s^o \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{Bmatrix} \quad (6)$$



Gambar 1 Lapisan k dalam sebuah laminate

Hubungan regangan di atas dengan dengan gaya-gaya dan momen luar adalah

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xs} & b_{xx} & b_{xy} & b_{xs} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{ys} & b_{yx} & b_{yy} & b_{ys} \\ a_{sx} & a_{sy} & a_{ss} & b_{sx} & b_{sy} & b_{ss} \\ c_{xx} & c_{xy} & c_{xs} & d_{xx} & d_{xy} & d_{xs} \\ c_{yx} & c_{yy} & c_{ys} & d_{yx} & d_{yy} & d_{ys} \\ c_{sx} & c_{sy} & c_{ss} & d_{sx} & d_{sy} & d_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \\ M_x \\ M_y \\ M_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

atau dengan singkat,

$$\begin{bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (8)$$

dimana matriks [a], [b], [c], dan [d] adalah laminate compliances.

Hubungan tegangan-regangan untuk lamina yang ke-k dalam sebuah laminate (lihat gambar 1) dapat dinyatakan dalam persamaan matriks

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_6 \end{bmatrix}_k \quad (9)$$

di mana  $Q_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) = komponen matriks kekakuan yang telah direduksi. Jika ditransformasikan ke sistem koordinat laminate, maka hubungan menjadi,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_s \end{bmatrix}_k \quad (10)$$

Substitusi ke persamaan (6) akan didapatkan,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

atau dalam notasi tensor,

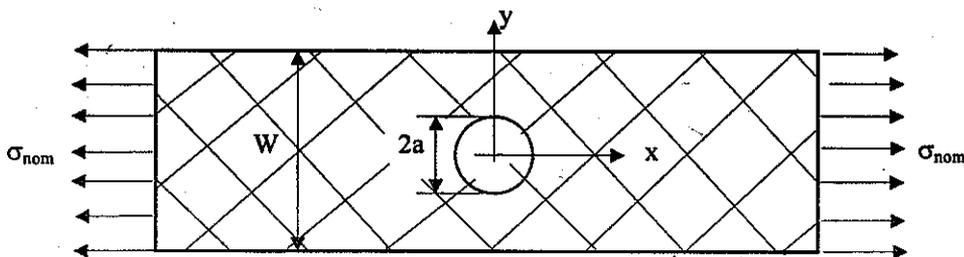
$$[\sigma]_{k,x,y}^k = [Q]_{k,x,y}^k [\epsilon^0]_{x,y} + z [Q]_{k,x,y}^k [\kappa]_{x,y} \quad (12)$$

Faktor konsentrasi tegangan yang akan dibahas dalam makalah ini menggunakan definisi Peterson, 1974, untuk tegangan geser dan tegangan normal sebagai berikut :

$$K_t = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{nom}} ; K_{ts} = \frac{\tau_{maks}}{\tau_{nom}} \quad (13)$$

### 3. Faktor Konsentrasi Tegangan Pada Laminate Berlubang Lingkaran

Perhitungan distribusi tegangan di sekitar lingkaran untuk pelat komposit orthotropik akan menggunakan notasi seperti pada gambar 2. Selain sebagai fungsi dari



Gambar 2 Pelat komposit berlubang lingkaran yang dikenai beban uniaksial

dimensi pelat dan lubang, distribusi tegangan pada pelat komposit berlubang juga merupakan fungsi dari sifat-sifat elastik, arah serat, dan susunan lapisan pelat komposit. Tegangan normal pada arah sumbu x (searah sumbu pembebanan tarik) untuk lokasi di sepanjang sumbu y, telah diturunkan oleh Konish dan Whitney, 1975 sebagai

$$\frac{\sigma_x(0,y)}{\sigma_0} = 1 + \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \left[ \frac{-\mu_1(1-i\mu_1)}{\sqrt{\xi^2 - 1 - \mu_1^2} (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1 - \mu_1^2})} + \frac{\mu_2(1-i\mu_2)}{\sqrt{\xi^2 - 1 - \mu_2^2} (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1 - \mu_2^2})} \right] \right\} \quad (14)$$

dengan  $\xi = y/a$ . Parameter  $\mu_1$  dan  $\mu_2$  adalah merupakan akar-akar kompleks dari persamaan karakteristik material orthotropik dua dimensi

$$a_{yy}\mu^4 - 2a_{yx}\mu^3 + (2a_{xy} + a_{xx})\mu^2 - 2a_{xx}\mu + a_{xx} = 0 \quad (15)$$

Parameter  $a_{ij}$ ,  $ij = x, y, s$ , adalah elemen-elemen matriks compliances yang telah didefinisikan oleh persamaan (7) dan (8).

Di daerah batas lubang, yaitu  $\xi = 1$ , persamaan (14) dapat disederhanakan, dan merupakan harga konsentrasi tegangan dengan lebar pelat tak hingga,

$$K_t^\infty = \frac{\sigma_x(0,a)}{\sigma_0} = 1 + \operatorname{Re} \left[ \frac{i(\mu_1 + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2} \right] \quad (16)$$

Untuk komposit laminate yang simetris, persamaan (16) di atas dapat dinyatakan dalam

$$K_t^\infty = 1 + \sqrt{\frac{2}{A_{yy}} \left( \sqrt{A_{xx}A_{yy} - A_{xy}^2} + \frac{A_{xx}A_{yy} - A_{xy}^2}{2A_{xx}} \right)} \quad (17)$$

dimana  $A_{ij}$ ,  $ij = x, y, s$ , adalah elemen-elemen matriks kekakuan laminate simetris. Koreksi untuk pelat komposit dengan lebar yang berhingga terhadap persamaan (14) diturunkan oleh Tan, 1989 sebagai berikut

$$\begin{aligned} \frac{K_t^\infty}{K_t} = 1 - \frac{2a}{W} M + \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \left[ \frac{-\mu_2}{1 + i\mu_1} \left( \frac{2a}{W} M - 1 + i\mu_1 \left( \frac{2a}{W} M \right) \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \sqrt{1 - (1 + \mu_1^2) \left( \frac{2a}{W} M \right)^2} \right] + \frac{\mu_2}{1 + i\mu_2} \left( \frac{2a}{W} M - 1 + i\mu_2 \left( \frac{2a}{W} M \right) \right) \right. \\ \left. \left. + \sqrt{1 - (1 + \mu_2^2) \left( \frac{2a}{W} M \right)^2} \right] \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

dengan  $2a$  dan  $W$  adalah masing-masing diameter lubang dan lebar pelat. Sedangkan  $K_t^\infty$  adalah faktor konsentrasi tegangan untuk pelat dengan lebar tak hingga.

Faktor M adalah

$$M^2 = \frac{\sqrt{1 - 8 \left[ \frac{3(1 - 2a/W)}{2 + (1 - 2a/W)^3} - 1 \right]} - 1}{2(2a/W)^2} \quad (19)$$

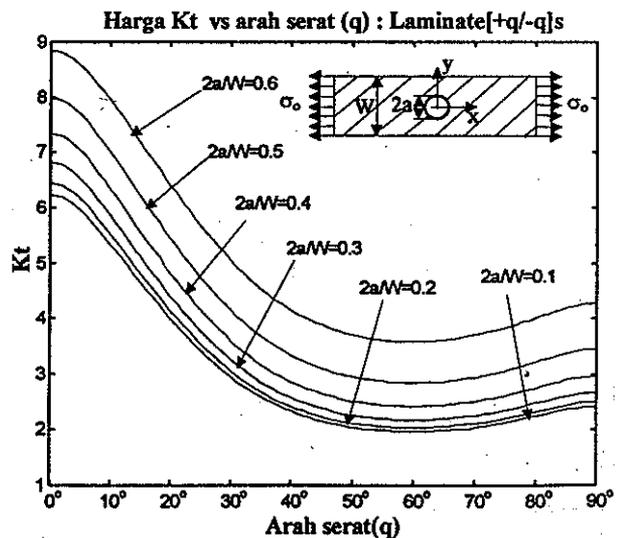
Untuk laminate orthotropik, akar-akar  $\mu_1$  dan  $\mu_2$  dapat dituliskan dalam bentuk yang sederhana berikut :

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{i}{2} \left[ \sqrt{\frac{\overline{E_x}}{G_{yy}} - 2\overline{\nu_{xy}} + 2\sqrt{\frac{\overline{E_x}}{E_y}}} + \sqrt{\frac{\overline{E_x}}{G_{yy}} - 2\overline{\nu_{xy}} - 2\sqrt{\frac{\overline{E_x}}{E_y}}} \right] \\ \mu_2 &= \frac{i}{2} \left[ \sqrt{\frac{\overline{E_x}}{G_{yy}} - 2\overline{\nu_{xy}} + 2\sqrt{\frac{\overline{E_x}}{E_y}}} - \sqrt{\frac{\overline{E_x}}{G_{yy}} - 2\overline{\nu_{xy}} - 2\sqrt{\frac{\overline{E_x}}{E_y}}} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

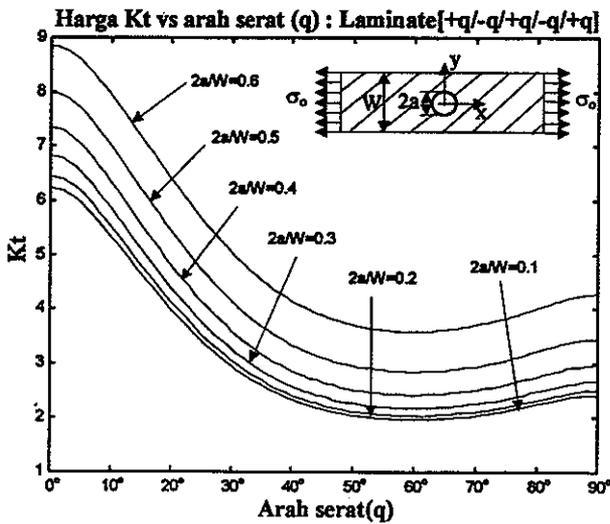
dengan  $\overline{E_x}$ ,  $\overline{E_y}$ ,  $\overline{G_{yy}}$ , dan  $\overline{\nu_{xy}}$  adalah sifat mekanik material.

### 3.1 Pengaruh Arah Serat Terhadap $K_t$

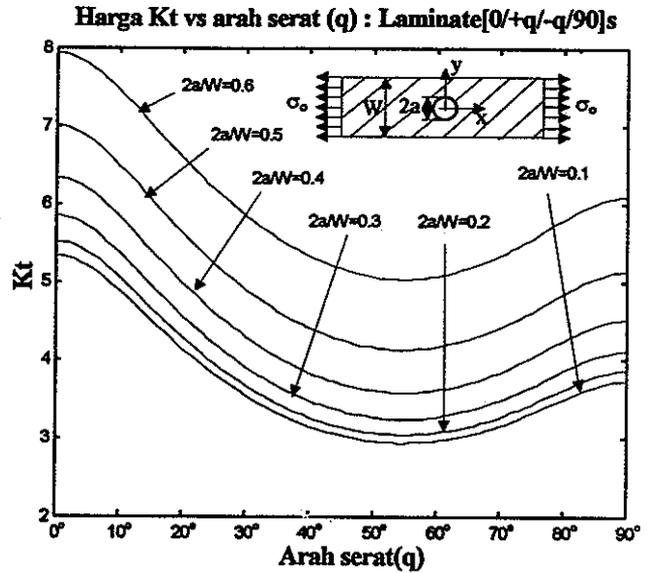
Grafik-grafik berikut ini menunjukkan hasil perhitungan faktor konsentrasi tegangan terhadap variasi sudut ( $q$ ) untuk berbagai parameter dimensi. Dalam satu grafik terdapat enam buah kurva yang menunjukkan perbandingan antara diameter lubang dengan lebar pelat ( $2a/W$ ).



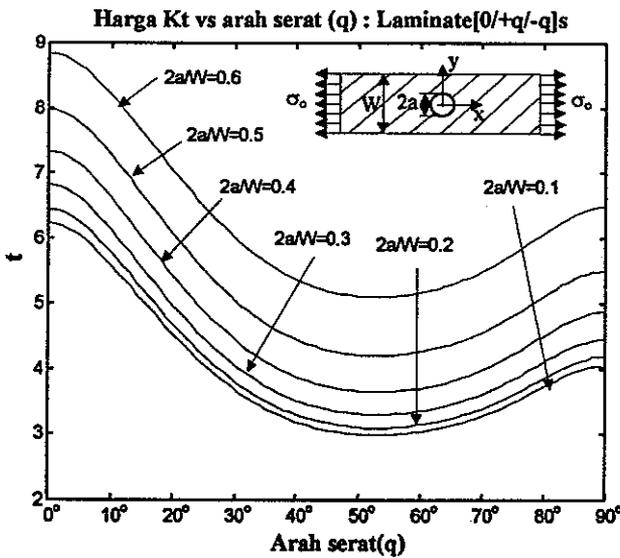
Gambar 3 Harga  $K_t$  sebagai fungsi arah sudut serat ( $q$ ) untuk laminate [+q/-q]s



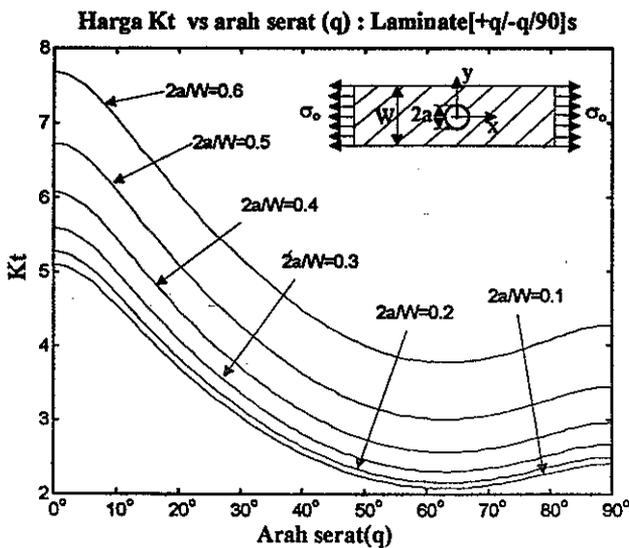
Gambar 4 Harga Kt sebagai fungsi arah sudut serat (q) untuk laminate [+q/-q/+q/-q/+q]



Gambar 7 Harga Kt sebagai fungsi arah sudut serat (q) untuk laminate [0/+q/-q/90]s



Gambar 5 Harga Kt sebagai fungsi arah sudut serat (q) untuk laminate [0/+q/-q]s

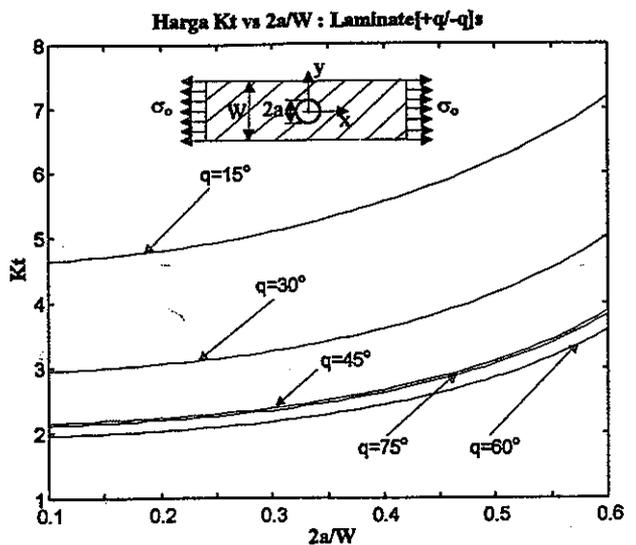


Gambar 6 Harga Kt sebagai fungsi arah sudut serat (q) untuk laminate [+q/-q/90]s

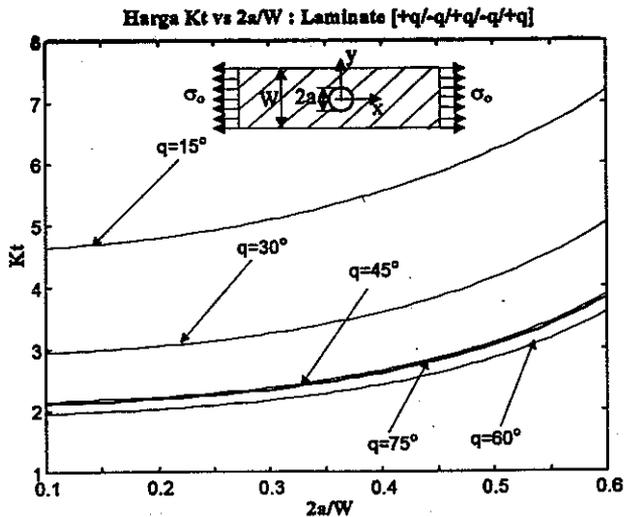
Untuk setiap jenis laminate, terlihat bahwa konsentrasi tegangan semakin tinggi untuk  $2a/W$  yang semakin besar. Juga terlihat bahwa untuk  $2a/W$  yang sama,  $K_t$  mencapai harga minimum untuk  $q$  sekitar 50° sampai dengan 60°. Untuk laminate [+q/-q]s dan laminate [+q/-q/+q/-q/+q], keduanya mempunyai harga faktor konsentrasi tegangan yang sama untuk berbagai variasi sudut  $q$ . Dari grafik-grafik juga dapat disimpulkan bahwa laminate [0/+q/-q]s ternyata akan menghasilkan harga  $K_t$  yang paling tinggi bila dibandingkan dengan laminate-laminate yang lain. Dengan menambahkan ply 90 pada laminate [0/+q/-q]s, yaitu menjadi laminate [0/+q/-q/90]s, ternyata dapat memperkecil harga  $K_t$ . Meskipun begitu, harga  $K_t$  laminate [0/+q/-q/90]s masih lebih tinggi daripada harga  $K_t$  laminate [+q/-q/90]s.

### 3.2 Pengaruh Dimensi Lubang Terhadap $K_t$

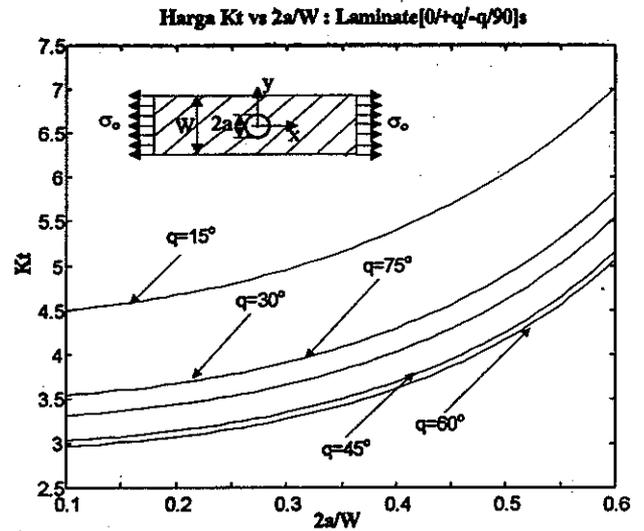
Grafik-grafik berikut menunjukkan hasil perhitungan harga faktor konsentrasi tegangan,  $K_t$  yang ditampilkan terhadap perbandingan antara diameter lubang dengan lebar pelat. Dalam satu grafik terdapat beberapa kurva untuk beberapa arah serat ( $q$ ) yang berbeda.



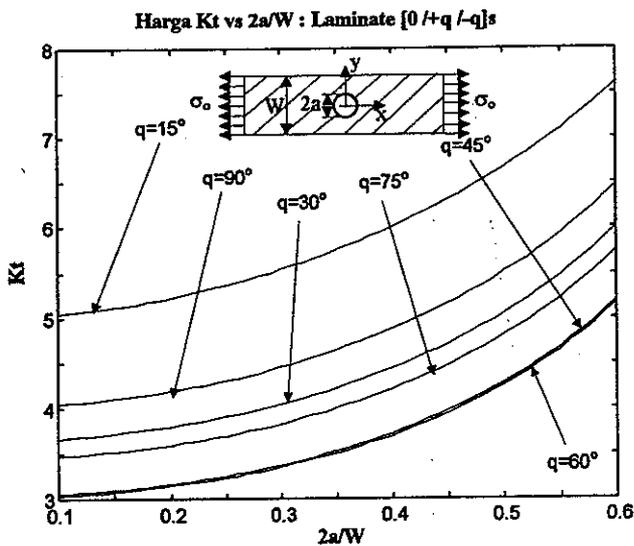
Gambar 8 Harga Kt sebagai fungsi 2a/W untuk laminate [+q/-q]s



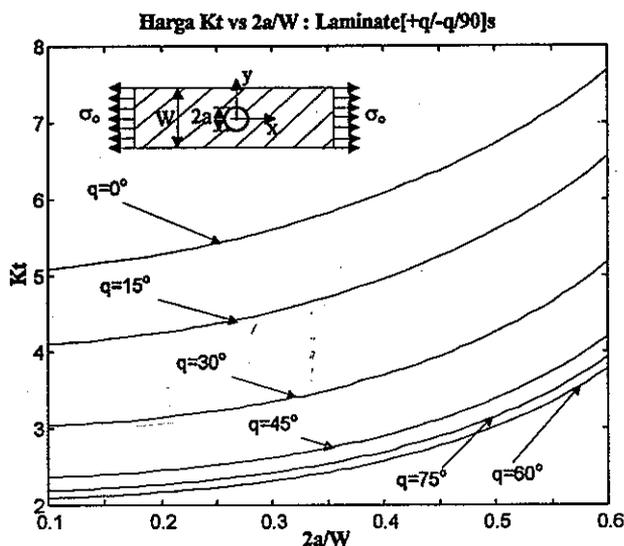
Gambar 9 Harga Kt sebagai fungsi 2a/W untuk laminate [+q/-q/+q/-q/+q]



Gambar 12 Harga Kt sebagai fungsi 2a/W untuk laminate [0/+q/-q/90]s



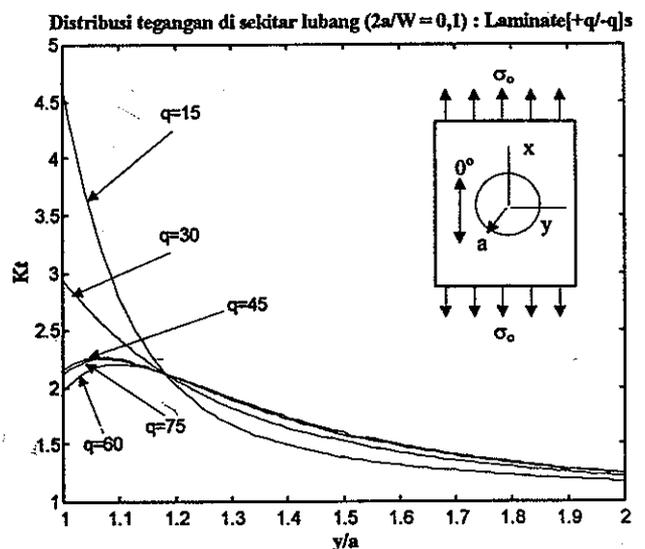
Gambar 10 Harga Kt sebagai fungsi 2a/W untuk laminate [0/+q/-q]s



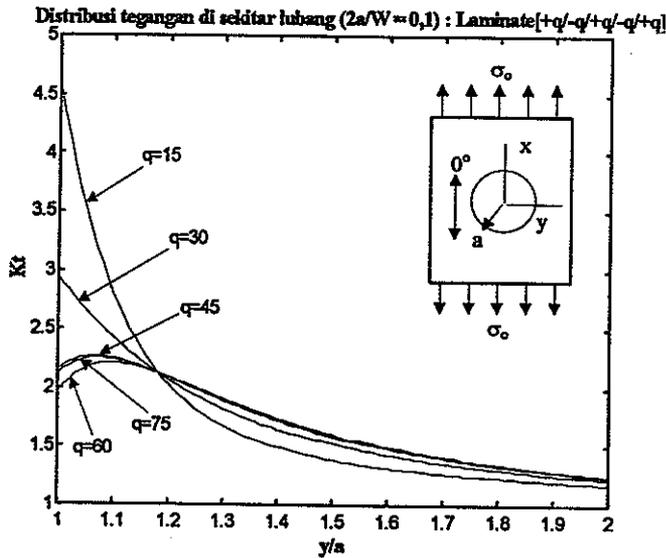
Gambar 11 Harga Kt sebagai fungsi 2a/W untuk laminate [+q/-q/90]s

### 3.3 Distribusi Tegangan Disekitar Lubang

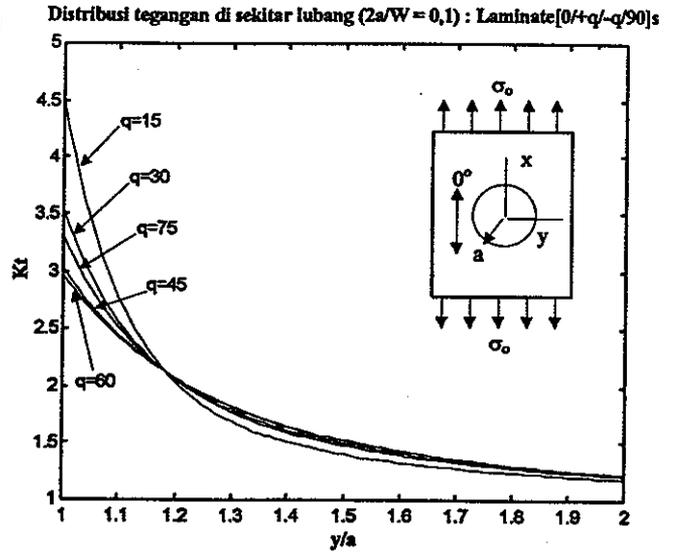
Grafik-grafik di atas merupakan harga untuk suatu jenis laminate tertentu sebagai fungsi dari arah sudut serat ( $q$ ) dan perbandingan diameter lubang terhadap lebar pelat ( $2a/W$ ). Harga Kt yang dimaksud adalah perbandingan tegangan maksimum tepat di batas lubang untuk lapisan yang paling luar. Untuk beberapa jenis laminate tertentu, ternyata tegangan tertinggi tidak terjadi tepat di batas lubang, akan tetapi terjadi pada jarak tertentu dari batas lubang. Untuk itu perlu diketahui secara detail distribusi tegangan disekitar lubang. Beberapa grafik berikut ini melukiskan distribusi tegangan di sekitar lubang. Sebagai sumbu ordinat adalah Kt yang merupakan perbandingan antara harga tegangan arah sumbu-x yang terjadi di suatu titik di sepanjang sumbu y terhadap tegangan nominalnya. Sedangkan sebagai absis adalah  $\xi = y/a$ , dan  $a$  adalah jari-jari lubang. Untuk titik yang berada tepat di batas lubang, harga  $\xi$  adalah sama dengan 1.



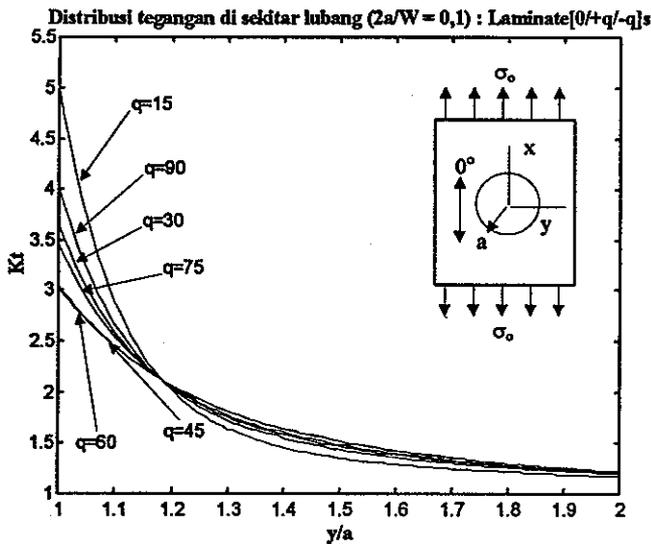
Gambar 13 Distribusi tegangan sepanjang sumbu y di sekitar lubang untuk laminate [+q/-q]s



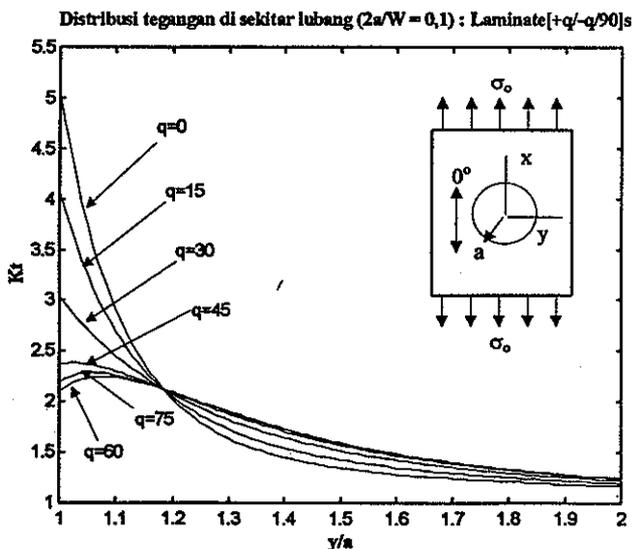
Gambar 14 Distribusi tegangan sepanjang sumbu y di sekitar lubang untuk laminate  $[+q/-q/+q/-q/+q]$



Gambar 17 Distribusi tegangan sepanjang sumbu y di sekitar lubang untuk laminate  $[0/+q/-q/90]_s$



Gambar 15 Distribusi tegangan sepanjang sumbu y di sekitar lubang untuk laminate  $[0/+q/-q]_s$



Gambar 16 Distribusi tegangan sepanjang sumbu y di sekitar lubang untuk laminate  $[+q/-q/90]_s$

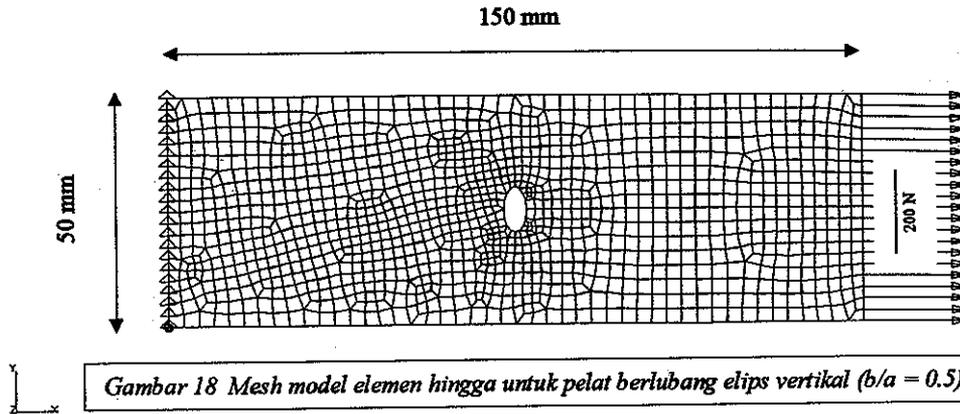
Dari grafik-grafik yang ditampilkan di atas terlihat bahwa untuk jenis laminate  $[+q/-q]_s$ ,  $[+q/-q/+q/-q/+q]$ , dan  $[+q/-q/90]_s$ , terdapat beberapa laminate dengan sudut  $q$  tertentu yang mempunyai harga tegangan maksimum yang tidak tepat berada di batas lubang. Sebagai contoh adalah laminate  $[+45/-45]_s$ ,  $[+45/-45/+45/-45/+45]$ ,  $[+45/-45/90]_s$ ,  $[+60/-60]_s$ ,  $[+60/-60/+60/-60/+60]$ ,  $[+60/-60/90]_s$ ,  $[+75/-75]_s$ ,  $[+75/-75/+75/-75/+75]$ , dan  $[+75/-75/90]_s$ . Fenomena seperti ini tidak terjadi untuk jenis laminate  $[0/+q/-q]_s$  dan  $[0/+q/-q/90]_s$ .

Hal lain yang dapat diperhatikan dari tampilan grafik-grafik di atas adalah bahwa pada suatu jarak sekitar 0,18  $a$  ( $a$  jari-jari lubang) dari batas lubang, berbagai variasi sudut  $q$  untuk semua jenis laminate bertemu pada satu titik harga tegangan tertentu, yaitu sekitar 2,1 kali harga tegangan nominalnya.

Untuk semua jenis laminate dengan berbagai variasi sudut arah serat, pada titik yang semakin jauh dari batas lubang, harga tegangannya semakin mendekati harga tegangan nominalnya, yaitu dengan harga  $Kt$  yang semakin mendekati 1. Fenomena ini serupa dengan yang terjadi pada pelat isotropik.

#### 4. Faktor Konsentrasi Tegangan Pada Laminate Berlubang Ellips

Solusi analitik tentang konsentrasi tegangan pada laminate yang berlubang ellips sangat sulit didapatkan. Di dalam makalah ini, analisis konsentrasi tegangan pelat laminate yang berlubang ellips dilakukan dengan menggunakan metoda numerik yaitu metoda elemen hingga. Model elemen hingga laminate dengan lubang ellips ditunjukkan pada gambar 18. Karena menggunakan metoda numerik maka untuk mendapatkan kurva konsentrasi tegangan perlu dibuat banyak model.



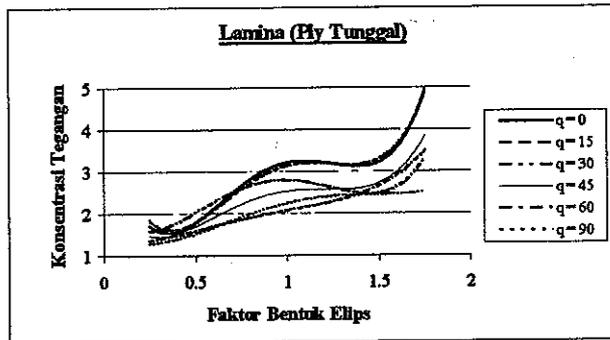
Gambar 18 Mesh model elemen hingga untuk pelat berlubang elips vertikal ( $b/a = 0.5$ )

Hasil perhitungan faktor konsentrasi tegangan terhadap faktor ellips yang didefinisikan sebagai perbandingan antara sumbu mayor dan sumbu minor di tampilkan pada beberapa kurva berikut.

adalah untuk ply 1, 3, dan 5, sedangkan gambar 21 untuk ply 2 dan 4.

#### 4.1 Faktor Konsentrasi Tegangan Lamina [+q]

Gambar 19 berikut menggambarkan hubungan antara harga Kt dengan faktor bentuk elips ( $F_b$ ) untuk suatu lamina (ply tunggal) yang diperoleh dari perhitungan dengan metode elemen hingga.  $F_b$  adalah faktor bentuk ellips.

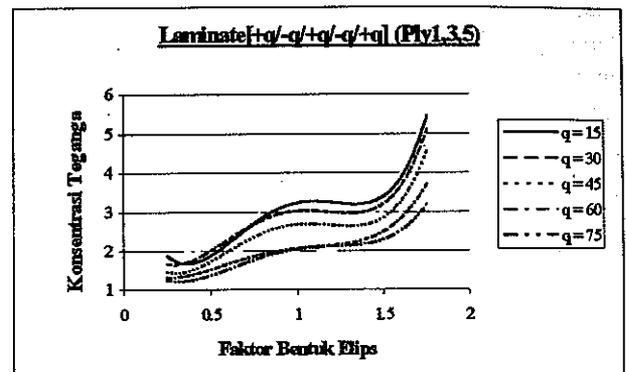


Gambar 19 Grafik hubungan Kt vs  $F_b$  untuk lamina (ply tunggal)

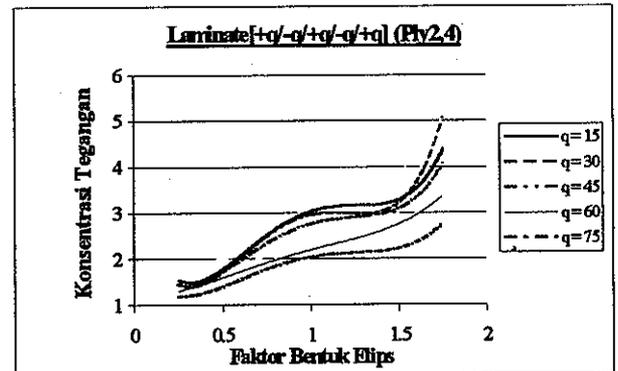
Dalam satu grafik terdapat tujuh buah kurva yang menunjukkan sudut arah serat. Misalnya untuk mengetahui harga Kt sebuah pelat lamina dengan perbandingan  $F_b = 0.5$  dan mempunyai orientasi sudut serat  $90^\circ$  terhadap beban tarik. Langkah yang harus dilakukan adalah menarik garis vertikal ke atas dari  $F_b = 0.5$  sampai memotong kurva  $q = 90^\circ$ , kemudian menarik garis horisontal ke kiri dari titik perpotongan tersebut untuk mendapatkan harga Kt. Harga Kt yang diperoleh kira-kira sama dengan 1.5.

#### 4.2 Faktor Konsentrasi Tegangan untuk Symmetric Laminate

Gambar 20 dan 21 menggambarkan hubungan antara harga Kt dengan faktor bentuk ( $F_b$ ) untuk suatu laminate simetris [+q/-q/+q/-q+q] yang diperoleh dari perhitungan dengan metode elemen hingga. Gambar 20



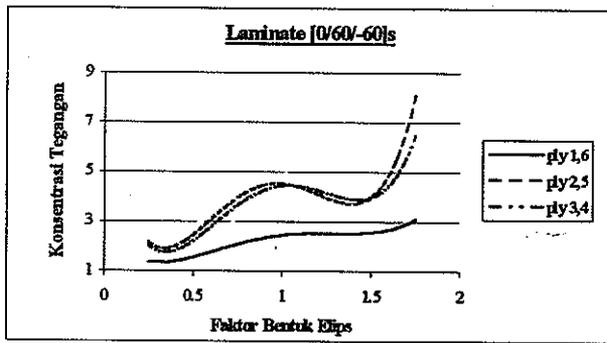
Gambar 20 Grafik hubungan Kt vs  $F_b$  untuk laminate [+q/-q/+q/-q+q] : Ply 1, 3, dan 5



Gambar 21 Grafik hubungan Kt vs  $F_b$  untuk laminate [+q/-q/+q/-q+q] : Ply 2, dan 4

#### 4.3 Faktor Konsentrasi Tegangan untuk Quasi Isotropic Laminate

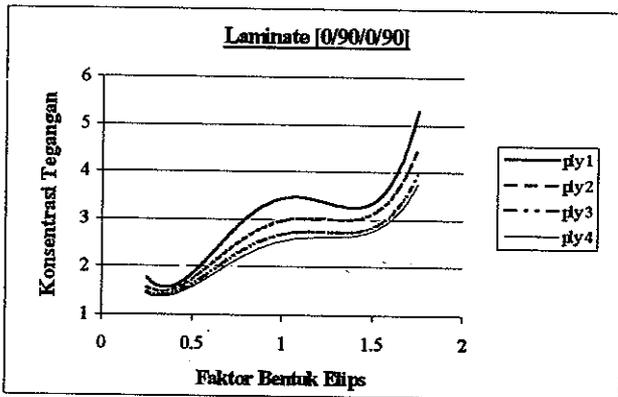
Gambar 22 menggambarkan hubungan antara harga Kt terhadap faktor bentuk elips ( $F_b$ ) untuk quasi-isotropic laminates.



Gambar 22 Grafik hubungan Kt vs Fb untuk laminate Quasi Isotropic

#### 4.4 Faktor Konsentrasi Tegangan untuk Cross Ply Laminate

Gambar 23 berikut menggambarkan hubungan antara harga Kt dengan faktor bentuk elips (Fb) untuk cross untuk antisymmetric cross ply laminate : [0/90/0/90].



Gambar 23 Grafik hubungan Kt vs Fb untuk laminate [0/90/0/90]

#### 5. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil analisis yang disajikan pada makalah ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

- Untuk pelat komposit berlubang lingkaran, pada umumnya, harga faktor konsentrasi tegangan (Kt) akan minimum untuk sudut arah serat  $45^\circ - 75^\circ$
- Untuk pelat komposit berlubang lingkaran dengan perbandingan  $2a/W$  dari 0.1 sampai dengan 0.6, perbandingan  $2a/W$  yang semakin besar mengakibatkan naiknya harga Kt. Hal ini terjadi akibat pengurangan luas penampang pelat.

- Untuk pelat komposit berlubang elips, harga Kt semakin besar untuk harga Fb yang semakin besar, kecuali pada  $Fb = 1,3 - 1,5$  atau  $b/a = 0,5 - 0,7$  dimana harga Kt justru mengalami penurunan. Hal ini tidak ada kaitannya dengan pengurangan luas penampang. Dalam hal ini, faktor bentuk elips yang paling berperan.
- Susunan laminate *angle ply* : laminate [+60/-60/+60/-60/...]s menunjukkan performansi yang paling bagus untuk pelat berlubang yang mendapat beban tarik uniaksial

Penelitian lebih lanjut tentang konsentrasi tegangan pada laminate komposit berlubang dapat dilakukan untuk jenis pembebanan lebih kompleks, misalnya beban biaksial, pembebanan bolak-balik yang akan melibatkan fenomena kelelahan pada material. Dengan metoda yang telah dikembangkan di sini, juga dapat dilakukan penelitian lebih lanjut tentang distribusi tegangan akibat adanya beberapa lubang pada laminate serat matrik.

#### 6. Daftar Pustaka

1. Daniel, Isaac M., and Ishai, Ori, 1994, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press
2. Hardy, S.J., and Malik, N.H., 1992, A Survey of Post-Peterson Stress Concentration Factors Data, *International Journal of Fatigue*, Vol. 14 No. 3, pp. 147-153.
3. Jones, Robert M., 1975, *Mechanics of Composite Materials*, Scripta Book Company, Washington, D.C.
4. Konish, H. J., and Whitney, J. M., 1975, Approximate Stress in an Orthotropic Plate Containing a Circular Hole, *Journal of Composite Materials*, Vol. 9, pp. 157-166.
5. Peterson, R.E., 1974, *Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons, 1974.
6. Tan, S.C., and Kim, R.Y., 1990, Strain and Stress Concentrations in Composite Laminates Containing a Hole, *Experimental Mechanics*, pp.345-351.
7. Tsai, Stephen W. and Hahn, Thomas, 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Co.Inc., Westport, Connecticut
8. Ugural, A.C, and Fenster, A.K, 1975, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, Elsevier Science Publishing Co. Inc., New York