

Analisis Pengaruh Konfigurasi Lamina Terhadap Kekakuan *Glass Fiber Reinforced Plastics*

Mahrus Khoirul Umami

Program Studi Teknik Industri, Universitas Trunojoyo
Jl. Raya Kamal PO BOX 2 Kamal, Bangkalan

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the influence of laminae configuration to the stiffness of glass fiber reinforced plastics material with four laminae configurations, i. e. symmetry angle-ply, symmetry cross-ply, antisymmetry angle-ply, and antisymmetry cross-ply. The analysis is based on the classical lamination theory. By using the theory, the value of strain and the curvature on x-axis, y-axis, and shear, and the stress on x-axis, y-axis, and shear for each lamina with different fiber orientation would be found. The result of analysis shows that symmetry angle-ply laminae configuration has the highest stiffness than the others. In symmetry angle-ply laminae configuration, each laminae is symmetrical to the middle plane of the material. Moreover, there is a change in stacking sequence that actually causes the interlaminar normal stress changes from tensile to compressive. Since compressive interlaminar stress would tend to keep the plies together.

Keyword : laminae configuration, glass fiber reinforced plastics, classical lamination theory

PENDAHULUAN

Bahan komposit merupakan bahan yang akhir-akhir ini banyak dijadikan sebagai pilihan untuk berbagai jenis produk. Bahan komposit banyak sekali digunakan pada industri pesawat terbang, kapal laut, konstruksi gedung dan perumahan, perabotan rumah tangga, peralatan elektronik, dan industri telekomunikasi. Banyak alasan yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan bahan komposit. Mulai dari nilai ekonomisnya, sifat kimia, sifat fisik, dan sifat mekanik sampai tampilannya yang dapat dikondisikan sedemikian rupa sesuai kebutuhan.

Pada dasarnya komposit tersusun dari suatu jenis material yang dikombinasikan atau digabungkan dengan jenis material yang lain. Ada banyak hal yang menjadi tujuan penggabungan tersebut, antara lain adalah untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan, meningkatkan ketahanan korosi dan zat kimia, meningkatkan kestabilan dimensi, mengurangi penyerapan terhadap zat cair, mengurangi ekspansi panas, mengurangi permeabilitas terhadap gas dan cairan, memperbaiki penampilan luar (permukaan), menghemat biaya, mempermudah perancangan dan produksi, mengurangi berat, dan lain-lain.

Salah satu jenis bahan komposit adalah bahan yang diperkuat oleh serat yang biasa disebut dengan *reinforced material* atau *fibrous composite*. Bahan ini terdiri dari bahan utama yang memiliki sifat mekanik relatif lebih rendah, dan serat penguat yang memiliki sifat mekanik lebih bagus dari bahan yang dikuatkan. Salah satu contoh bahan komposit jenis ini adalah plastik yang diperkuat oleh serat gelas (*glass fiber reinforced plastics*). Bahan komposit ini banyak sekali digunakan dalam kehidupan sehari-hari, antara lain untuk bahan pembuatan bejana air, atap (kanopi), dan kursi.

Pada bahan yang diperkuat (*reinforced material*), untuk mendapatkan kekuatan dan kekakuan yang memadai, selain dengan memberikan variasi orientasi serat, juga dapat dilakukan dengan memberikan variasi pada konfigurasi lamina. Model konfigurasi lamina yang dapat dipilih yaitu: simetris, antisimetris, dan quasi-isotropis.

Bahan penyusun yang memiliki karakteristik mekanik yang berbeda, terutama pada modulus elastisitas (*modulus of elasticity*) menyebabkan kekompakan bahan komposit menjadi faktor yang harus mendapatkan perhatian khusus. Kekompakan bahan komposit sangat menentukan karakteristik mekanik, termasuk kekakuan (*stiffness*). Kekakuan bahan sendiri didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengalami perubahan bentuk (deformasi) atau defleksi. Kekakuan ini dapat diketahui dari besar atau kecilnya modulus elastisitas bahan. Semakin besar modulus elastisitas bahan maka kekakuannya semakin besar.

Dalam desain produk yang menggunakan material komposit, pemilihan

orientasi serat dan konfigurasi lamina harus tepat sesuai dengan kebutuhan. Sebagai penunjang dalam desain tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh konfigurasi lamina terhadap kekakuan bahan, sehingga dapat ditentukan konfigurasi yang menghasilkan kekakuan paling tinggi.

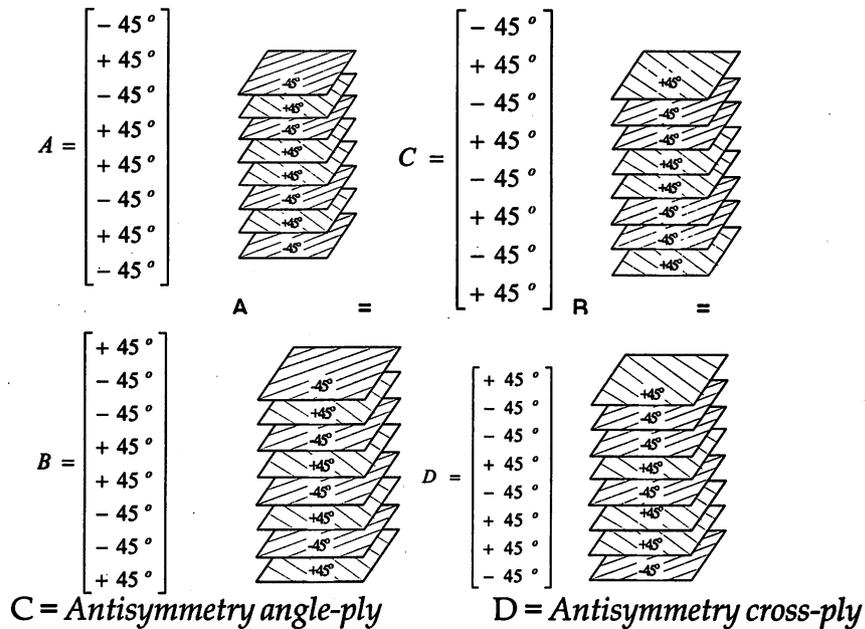
Dalam penelitian ini permasalahan-permasalahan yang diteliti adalah:

1. Bagaimana pengaruh konfigurasi lamina terhadap kekakuan *glass fiber reinforced plastics*?
2. Bagaimana konfigurasi lamina yang dapat menghasilkan kekakuan *glass fiber reinforced plastics* paling tinggi?

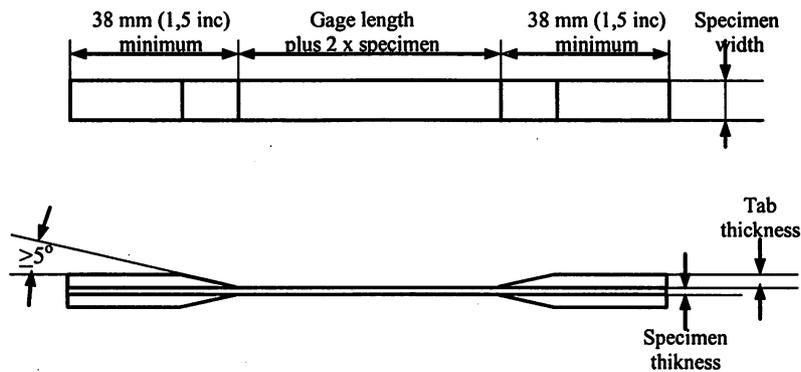
METODE

Analisis dilakukan terhadap empat macam konfigurasi lamina pada material komposit, dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Modulus elastisitas sebagai variabel terikat dan konfigurasi lamina sebagai variabel bebas, yang terdiri dari:
 - A = *Symmetry angle-ply*
 - B = *Symmetry cross-ply*
 - C = *Antisymmetry angle-ply*
 - D = *Antisymmetry cross-ply*
2. Orientasi serat penguat untuk masing-masing lamina $+45^\circ$ dan -45° .
3. Bahan pembentuk komposit adalah polyester (Yukalac BQTN 157-EX) sebagai matriks, dan serat gelas jenis WR 600 yang sudah diurai sebagai serat penguat.
4. Data yang dijadikan acuan adalah modulus elastisitas dari hasil pengujian tarik menurut standar ASTM (*American Society for Testing and Materials*).



Gambar .1 Konfigurasi lamina pada laminat



Gambar 2. Spesimen pengujian menurut standar ASTM.

5. Proses kimia yang terjadi selama pembuatan dan proses produksi diabaikan.

Analisis yang dilakukan terdiri dari analisis data statistik, analisis sifat material, dan analisis dengan teori laminasi klasik. Analisis statistik yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis varian satu arah. Analisis varian ini digunakan untuk mengetahui ada atau tidaknya pengaruh konfigurasi lamina pada laminat terhadap modulus elastisitas.

Dari analisis varian satu arah tersebut didapatkan harga F_{hitung} yang akan dibandingkan dengan F_{tabel} . Apabila F_{hitung} lebih kecil dari F_{tabel} , maka hipotesis awal, H_0 diterima. Hal ini menunjukkan tidak adanya perbedaan antara masing-masing perlakuan. Sedangkan apabila F_{hitung} lebih besar dari F_{tabel} maka hipotesis awal, H_0 ditolak, dan hipotesis alternatif, H_1 diterima. Berarti, ada perbedaan antara masing-masing perlakuan.

Syarat suatu material bersifat isotropis adalah: $E_1 = E_2 = E$

$$u_{23} = u_{13} = u_{12} = \dots = u \quad \text{dan}$$

$$G_{23} = G_{13} = G_{12} = \dots = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Dari data sifat-sifat bahan pembentuk spesimen, parameter-parameter di atas dapat dicari dengan menggunakan formulasi-formulasi sebagai berikut:

- Fraksi Volume Serat (V_f)

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (1)$$

- Modulus Elastisitas Longitudinal (E_1)

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (\text{N.mm}^{-2}) \quad (2)$$

- Modulus Elastisitas Transversal (E_2)

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f} \quad (\text{N.mm}^{-2}) \quad (3)$$

- Rasio Poison 1-2 (u_{12})

$$u_{12} = V_m \cdot u_m + V_f \cdot u_f \quad (4)$$

- Rasio Poison 2-1 (u_{21})

$$u_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

- Modulus Geser (G_{12})

$$G_{12} = \frac{G_m \cdot G_f}{V_m \cdot G_f + V_f \cdot G_m} \quad (\text{N.mm}^{-2}) \quad (6)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} \quad (\text{N.mm}^{-2}) \quad (7)$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)} \quad (\text{N.mm}^{-2}) \quad (8)$$

Dengan :

$$M_f = \text{massa serat (gram)}$$

$$M_m = \text{massa matriks (gram)}$$

$$r_f = \text{massa jenis serat (gram/cm}^3\text{)}$$

$$r_m = \text{massa jenis matriks (gram/cm}^3\text{)}$$

$$E_1 = \text{modulus elastisitas longitudinal (N.mm}^{-2}\text{)}$$

$$E_2 = \text{modulus elastisitas transversal (N.mm}^{-2}\text{)}$$

$$E_f = \text{modulus elastisitas serat (N.mm}^{-2}\text{)}$$

$$E_m = \text{modulus elastisitas matriks (N.mm}^{-2}\text{)}$$

$$V_f = \text{fraksi volume serat}$$

$$V_m = \text{fraksi volume matriks}$$

$$u_{12} = \text{rasio poison regangan arah 2, jika diberi tegangan arah 1}$$

$$u_{21} = \text{rasio poison regangan arah 1, jika diberi tegangan arah 2}$$

$$u_m = \text{rasio poison matriks}$$

$$u_f = \text{rasio poison serat}$$

$$G_m = \text{modulus geser matriks (N.mm}^{-2}\text{)}$$

$$G_f = \text{modulus geser serat (N.mm}^{-2}\text{)}$$

Setelah analisis sifat material dilanjutkan dengan analisis dengan teori laminasi klasik. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui regangan normal, regangan geser, dan kelengkungan material, serta tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi pada setiap lapisan (lamina). Tahapan-tahapan pada analisis dengan teori laminasi klasik ini adalah sebagai berikut:

- Menentukan gaya-gaya yang bekerja pada material. Dalam penelitian ini, sesuai dengan pengujian yang dilakukan, gaya yang bekerja adalah searah sumbu X. Sedangkan gaya-gaya yang lain adalah sama dengan nol, karena tidak dibebankan pada spesimen uji.
- Menentukan besar gaya yang bekerja per satuan panjang (N_x), yaitu gaya yang bekerja dibagi dengan lebar spesimen uji. Selanjutnya

akan didapatkan besar nilai rata-ratanya.

- Menentukan matrik kekakuan masing-masing konfigurasi lamina.

Pada tahap ini, langkah-langkah yang dilakukan adalah:

1. Menentukan matriks kekakuan setiap lamina untuk masing-masing sudut serat, dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

$$Q_{11} = C_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}$$

$$Q_{22} = C_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}$$

$$Q_{12} = C_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}$$

$$Q_{66} = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) = G_{12}$$

dengan:

σ_x = tegangan normal searah sumbu X

σ_y = tegangan normal searah sumbu Y

τ_{xy} = tegangan geser

ϵ_x = regangan normal searah sumbu X

ϵ_y = regangan normal searah sumbu Y

γ_{xy} = regangan geser

C_{ij} = matrik kekakuan (*stiffness matrix*),

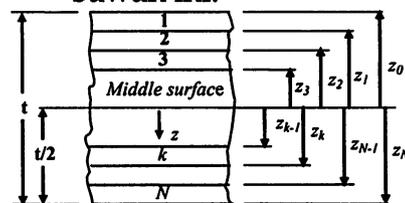
($C_{ij} = C_{ji}$), dan $i, j = 1, 2, 3, \dots$ dst.

2. Menentukan harga z dari masing-masing konfigurasi lamina, dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dengan :

- $N_x, N_y,$ dan N_{xy} = resultan gaya per satuan panjang yang bekerja searah sumbu X, searah sumbu Y, dan geser
- $M_x, M_y,$ dan M_{xy} = resultan momen per satuan panjang yang bekerja searah sumbu X, searah sumbu Y, dan geser
- A_{ij} adalah matrik kekakuan longitudinal (*longitudinal stiffness matrix*), yang harganya sama dengan $\sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ijk})(z_k - z_{k-1})$
- B_{ij} adalah matrik kekakuan kopel (*couple stiffness matrix*) yang harganya sama dengan $\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ijk})(z_k^2 - z_{k-1}^2)$
- D_{ij} adalah matrik kekakuan fleksural (*flexural stiffness matrix*) yang harganya sama dengan $\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ijk})(z_k^3 - z_{k-1}^3)$
- z_k adalah jarak lamina ke-k dari bidang tengah material, seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. Geometri lamina ke-k pada laminat

- k_x , k_y , dan k_{xy} adalah kelengkungan arah sumbu X, arah sumbu Y, dan geser
- 4. Menentukan harga komponen matrik A, B, dan D sebagai konstanta matrik kekakuan (persamaan 10).
- Menentukan matrik komplan dari matrik kekakuan material (persamaan 10).
- Menentukan harga dari:
 - ☞ Regangan normal sumbu x (e_x)
 - ☞ Regangan normal sumbu y (e_y)
 - ☞ Regangan geser (g_{xy})
 - ☞ Kelengkungan arah sumbu x (k_x)
 - ☞ Kelengkungan arah sumbu y (k_y)
 - ☞ Kelengkungan geser (k_{xy})

Langkah ini dilakukan dengan mengalikan matrik komplan dari matrik kekakuan material dengan gaya per satuan panjang (N_x) dan momen per satuan panjang (M_x) (Persamaan 10).

- Menentukan: tegangan normal sumbu x (s_x), tegangan normal sumbu y (s_y), dan tegangan geser (t_{xy}), untuk masing-masing lamina dengan menggunakan persamaan 9.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data

Dari pengujian kekuatan tarik yang dilakukan untuk ke empat variasi konfigurasi lamina pada laminat dengan pengulangan sebanyak lima kali, didapatkan besar modulus elastisitas masing-masing konfigurasi lamina sebagai berikut:

Tabel 1. Modulus Elastisitas (dalam N/mm²)

Ulangan ke	Konfigurasi lamina			
	A	B	C	D
1	8373,8641	6424,5768	3825,4901	4307,4945
2	8140,3728	6185,1483	4534,2339	5572,1890
3	9249,2913	6244,3654	6001,8490	6623,5741
4	8292,4273	5117,6444	5174,5546	5776,1416
5	8502,7332	5074,0593	5617,4502	5239,9925
Rerata	8511,7377	5809,1588	5030,7156	5503,8783

Analisis varian satu arah memberikan hasil sebagaimana pada tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Hasil Analisis Varian Satu Arah

Sumber Keragaman	Derajat Bebas (db)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	Fhitung	Ftabel
Perlakuan	16	36739649.3221	12246549.7740	23,5574	3,24
Galat	3	8317752.2460	519859.5154		
Total	19	45057401.5682			

Dengan menggunakan resiko kesalahan, α sebesar 5 %, maka F_{tabel} dapat dicari pada tabel F yang berharga (3, 16, 0,05). Dari tabel didapatkan nilai $F_{\text{tabel}} = 3,24$. Dari nilai tersebut, maka F_{hitung} lebih besar dari F_{tabel} .

Berdasarkan hipotesis, maka dapat disimpulkan bahwa H_0 ditolak. Hal ini berarti, konfigurasi lamina mempengaruhi harga modulus elastitas secara signifikan.

Analisis Sifat Material

Dari data sifat-sifat bahan pembentuk spesimen, parameter-parameter yang menentukan sifat material dapat dicari sebagai berikut:

- Fraksi Volume Serat
Perbandingan berat serat dan matrik dalam spesimen, 1 : 1, dan $r_f = 2,56 \text{ g/cm}^3$; $r_m = 1,10 \text{ g/cm}^3$, sehingga dengan persamaan 1, V_f dapat dihitung:

$$V_f = \frac{\frac{1}{2,56}}{\frac{1}{2,56} + \frac{1}{1,10}} = 0,3 \quad \text{maka,}$$

$$V_m = 1 - V_f = 1 - 0,3 = 0,7$$

Jadi $V_m : V_f = 0,7 : 0,3$

- Modulus Elastisitas Longitudinal (E_1)
Dengan menggunakan persamaan 2,
 $E_1 = 75,9 \cdot 10^3 \cdot 0,3 + 3 \cdot 10^3 \cdot 0,7 = 24870 \text{ N.mm}^2$
- Modulus Elastisitas Transversal (E_2)
Dengan menggunakan persamaan 3,

$$E_2 = \frac{75,9 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^3}{75,9 \cdot 10^3 \cdot 0,7 + 3 \cdot 10^3 \cdot 0,3} = 4214,3254 \text{ N.mm}^2$$

- Rasio Poison 1-2 (u_{12})
Dengan menggunakan persamaan 4,

$$u_{12} = 0,7 \cdot 0,33 + 0,3 \cdot 0,22 = 0,297$$

- Rasio Poison 2-1 (u_{21})
Dengan menggunakan persamaan 5,

$$u_{21} = 0,297 \frac{4214,3254}{24870} = 0,0503$$

- Modulus Geser (G_{12})
Dengan menggunakan persamaan 6,

$$G_m = \frac{3 \cdot 10^3}{2(1 + 0,33)} = 1127,8195$$

$$G_f = \frac{75,9 \cdot 10^3}{2(1 + 0,22)} = 31106,5574$$

$$G_{12} = \frac{1127,8195 \cdot 31106,5574}{0,7 \cdot 31106,5574 + 0,3 \cdot 1127,8195} = 1586,5185 \text{ N.mm}^2$$

Dari hasil perhitungan di atas dapat diambil kesimpulan:

- $E_1 \neq E_2$
- $u_{12} \neq u_{21}$

Dengan demikian material komposit yang digunakan dalam penelitian tidak bersifat isotropik, karena syarat sebagai material isotropik ($E_1 = E_2$ dan $u_{12} = u_{21}$) tidak terpenuhi. Hal ini menunjukkan pada kesimpulan akhir bahwa material komposit yang digunakan dalam penelitian ini bersifat orthotropik.

Analisis dengan Teori Laminasi Klasik

Analisis dengan teori laminasi klasik dilakukan setelah sifat material

diketahui. Analisis sifat material menunjukkan bahwa material bersifat anisotropik. Sehingga dengan menggunakan teori laminasi klasik di atas dapat dihitung: regangan normal, regangan geser, dan kelengkungan material, serta

tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi pada setiap lapisan (lamina). Perhitungan dengan teori laminasi dilakukan dengan bantuan program Matlab menghasilkan data sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Perhitungan dengan Teori Laminasi Klasik

Parameter		Konfigurasi Lamina			
		A	B	C	D
Regangan	ϵ_x	1.5155e-002	1.0446e-002	8.9822e-003	9.7812e-003
	ϵ_y	-1.1373e-002	-7.8397e-003	-6.6314e-003	-7.3407e-003
	ϵ_{xy}	4.5588e-019	-2.4905e-019	4.3062e-020	6.9730e-024
Kelengkungan	k_x	0	0	6.8368e-019	-1.4208e-019
	k_y	0	0	-7.7219e-019	-1.7725e-020
	k_{xy}	0	0	-3.8820e-004	-7.2965e-008
Tegangan, $x = +45^\circ$	σ_x	8.4175e+001	5.8022e+001	5.0936e+001	5.4329e+001
	σ_y	1.1810e-013	-4.5043e-014	1.3941e+000	3.5313e-008
	τ_{xy}	3.6600e+001	2.5229e+001	2.2754e+001	2.3623e+001
Tegangan, $x = -45^\circ$	σ_x	8.4175e+001	5.8022e+001	5.0937e+001	5.4329e+001
	σ_y	1.0927e-013	-4.0222e-014	1.3942e+000	3.5313e-008
	τ_{xy}	-3.6600e+001	-2.5229e+001	-2.2754e+001	-2.3623e+001

Pembahasan

Dari analisis data hasil pengujian didapatkan modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada konfigurasi lamina A, sedangkan nilai terkecil pada konfigurasi lamina C. Analisis selengkapnya adalah sebagai berikut:

1. Konfigurasi lamina A

Konfigurasi lamina A memiliki harga modulus elastisitas paling tinggi bila dibandingkan konfigurasi lamina yang lain. Tingginya harga modulus elastisitas konfigurasi lamina A, didapatkan dari besarnya tegangan yang dapat ditahan oleh material, meskipun besar regangan yang dialami material pada konfigurasi lamina A relatif lebih besar dibandingkan regangan yang dialami material dengan konfigurasi lamina yang lain.

Dari perhitungan dengan teori laminasi, konfigurasi lamina A memiliki harga kelengkungan nol, sama dengan konfigurasi lamina B. Hal ini disebabkan karena konfigurasi lamina A simetris terhadap bidang tengah (*middle plane*) laminat, sehingga matrik kekakuan kopelnya, B sama dengan nol. Selain itu, antara lapisan yang saling berdekatan memiliki orientasi serat yang berbeda, sehingga meningkatkan tegangan normal tekan interlaminar.

2. Konfigurasi lamina B

Dari hasil pengujian, konfigurasi lamina B memiliki harga modulus elastisitas lebih kecil dari konfigurasi lamina A, tetapi masih lebih besar dibandingkan konfigurasi lamina C dan D.

Perhitungan dengan teori laminasi memberikan harga kelengkungan konfigurasi lamina B sama dengan nol. Harga ini sama dengan konfigurasi lamina A. Akan tetapi, besar tegangan yang ditahan oleh masing-masing lamina dengan arah serat yang berbeda lebih kecil dibandingkan A. Besar tegangan yang ditahan oleh masing-masing lamina ini berkaitan dengan matrik kekakuan konfigurasinya.

3. Konfigurasi lamina C

Hasil pengujian menunjukkan konfigurasi lamina C memiliki tegangan elastis yang paling rendah dibandingkan dengan konfigurasi lamina yang lainnya. Begitu pula dengan harga modulus elastisitasnya.

Pada konfigurasi ini, susunan lamina tidak simetris terhadap bidang tengah material, sehingga terjadi ketidakseimbangan pada saat diberi pembebanan. Akibatnya, harga kelengkungan geser konfigurasi lamina C paling besar di antara konfigurasi lamina yang lain. Keadaan ini memungkinkan konfigurasi lamina C mengalami kegagalan delaminasi lebih besar dari pada konfigurasi yang lain. Selain itu, analisis dengan teori laminasi juga menunjukkan bahwa tegangan elastisitas untuk masing-masing lamina dengan arah serat yang berbeda pada arah longitudinal dan transversal memiliki harga yang relatif sama dengan konfigurasi lamina D, dan lebih kecil dari pada A dan B.

4. Konfigurasi lamina D

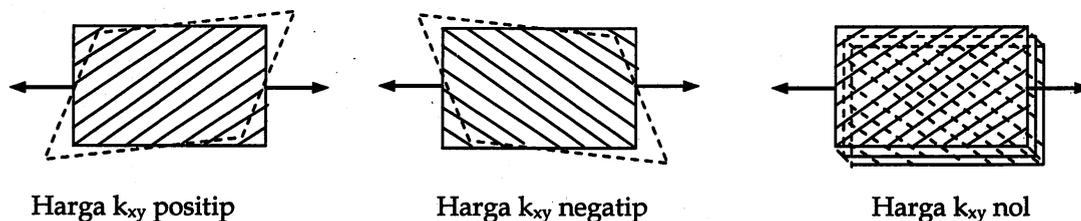
Konfigurasi lamina D memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi C. Hal

ini berarti, dengan konfigurasi tersebut lebih kompak dibandingkan konfigurasi lamina C. Tegangan elastis yang dapat ditahan lebih besar dari pada konfigurasi lamina C, tetapi masih lebih kecil dibandingkan konfigurasi lamina A dan B. Dari analisis dengan teori laminasi juga dapat diketahui harga kelengkungan arah sumbu x maupun arah sumbu y pada konfigurasi D lebih kecil dibandingkan dengan konfigurasi lamina yang lain. Sedangkan kelengkungan gesernya lebih kecil dari pada konfigurasi C.

Pada material komposit, selalu terdapat gaya geser sebagai akibat distribusi tegangan oleh matriks yang berada di pinggir laminat. Tegangan geser tersebut sangat tergantung dengan konfigurasi lamina, khususnya susunan lapisan. Konfigurasi lamina ini menentukan besarnya matrik kekakuan yang sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik material. Konfigurasi lamina yang berbeda akan mempengaruhi besar tegangan interlaminar yang terjadi, sehingga berakibat terjadinya perbedaan kekuatan dan kekakuan material (gambar 4).

Laminasi dua lapisan dengan orientasi serat yang sama akan memiliki tegangan geser interlaminar yang lebih besar dari pada laminasi dua lapisan dengan orientasi serat berbeda. Perubahan susunan lapisan (*stacking sequence*) dapat merubah tegangan normal interlaminar dari tarik menjadi tegangan. Di mana, tegangan tarik interlaminar (*tensile interlaminar stress*) akan meningkatkan terjadinya delaminasi, sedangkan tegangan tekan interlaminar (*compressive interlaminar stress*) akan menjaga ke-

rekatan antar lapisan. Hal ini dapat dilihat dengan membandingkan konfigurasi lamina A dan B. Di mana konfigurasi A memiliki modulus elastisitas yang lebih besar dari pada konfigurasi lamina B.



Gambar 4. Tegangan geser pada lamina tunggal dan pasangan lamina angle-ply



Gambar 5. Efek pembebanan pada konfigurasi lamina antisimetri

Pada material komposit dengan susunan lapisan (lamina) yang tidak simetris terhadap bidang tengah akan terjadi ketidakseimbangan ketika mengalami pembebanan. Ketidakseimbangan material ini menyebabkan terjadinya puntiran yang mengakibatkan semakin besarnya kelengkungan geser material (gambar 5). Hal ini terjadi konfigurasi lamina C dan D.

Efek ketidakseimbangan terhadap bidang tengahnya jauh lebih besar dari pada efek perubahan susunan lapisan (*stacking sequence*). Hal ini dapat dilihat dari modulus elastisitas pada konfigurasi lamina B yang lebih besar dari pada konfigurasi lamina C, meskipun dua lapisan dengan orientasi serat sama saling berdekatan ada pada konfigurasi lamina C.

KESIMPULAN

1. Konfigurasi lamina berpengaruh terhadap kekakuan pada material *glass fiber reinforced plastics* yang ditunjukkan oleh besarnya modulus elastisitas material.

2. Konfigurasi *symmetry angle-ply* yang simetris terhadap bidang tengah (*middle plane*) dan ada perubahan susunan lapisan (*stacking-sequence*) memberikan angka kekakuan paling tinggi bila dibandingkan dengan konfigurasi yang lainnya. Hal ini terjadi karena kesimetrian terhadap bidang tengah (*middle plane*) material akan menjaga keseimbangan material, sedangkan adanya perubahan susunan lapisan akan merubah tegangan interlaminar dari tarik menjadi tegangan tekan interlaminar (*compressive interlaminar stress*) yang dapat memperkuat daya lekat antar lamina.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. 1982. *Annual Book of ASTM Standard: Plastics - General Test Methods, Nomenclature (Part 35)*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia

- Anonymous. 1982. *Annual Book of ASTM Standard: Plastics – Material, Film, Reinforced and Cellular Plastics; High Modulus Fibers and Composites (Part 36)*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia
- Carter, Giles F. dan Paul, Donald E. 1992. *Material Science and Engineering*, Kathleen Mills Editorial and Production Services. Michigan. USA
- Djaprie, Sriati. 1989. *Ilmu dan Teknologi Bahan (terjemahan)*. Ed. 5. Jakarta: Erlangga
- Gibson, Ronald F. 1994. *Principles of Composite Material Mechanics*. Singapore: McGraw-Hill
- Hull, Derek. 1981. *An Introduction to Composite Material*. New York: Cambridge University Press
- Hyer, Michael W. 1998. *Stress Analisis of Fiber-Reinforced Composite Materials*. Singapore: McGraw-Hill Book Co
- Jacobs, James A. dan Kilduff, Thomas I. 1997. *Engineering Material Technology: Structure, Processing, Properties, and Selection*. New Jersey: Prentice Hall, Inc
- Kamil, Sulaiman. *Struktur Komposit*. Bandung: Penerbit ITB
- Rawling, R. D. dan Mathews, F. L. 1994. *Composite Material: Engineering and Science*. London: Chapman and Hall
- Surdia, Tata. 1985. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Trojan, Paul K. dan Flinn, Richard A. 1995. *Engineering Material and Their Application*. John Willey and Sons, Inc. USA