

ANALISIS KEKUATAN LENTUR STRUKTUR SANDWICH KOMPOSIT SERAT BAMBU DENGAN CORE POLYURETHANE MELALUI UJI THREE POINT BENDING DAN METODE ELEMEN HINGGA

Danny Eldo, Bambang Kismono Hadi, Muhammad Kusni

Program Studi Aeronotika & Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung (40132)
Jawa Barat, Indonesia
E-mail: dannyeldo@yahoo.com

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik kekuatan lentur struktur sandwich komposit serat bambu dengan core polyurethane berdasarkan hasil uji "three point bending" dan pemodelan perangkat lunak MSC Patran / Nastran serta untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasi modus kegagalan yang terjadi dalam struktur sandwich komposit serat bambu dengan core polyurethane yang mengalami pembebanan bending. Implementasi selanjutnya adalah penerapan struktur seperti ini pada batang sepeda balap hingga struktur yang lebih kompleks seperti pada pesawat terbang. Analisis dilakukan dari hasil percobaan melalui pengujian "three point bending", perhitungan analitik, dan melalui pemodelan menggunakan perangkat lunak MSC Patran / Nastran untuk melihat pola distribusi tegangan yang terjadi dan besarnya defleksi maksimum. Analisis yang dilakukan meliputi kekuatan lentur dan modus kegagalan. Kesimpulan yang didapat yaitu persamaan ekuivalen untuk menentukan modulus kelenturan pada struktur sandwich. Berdasarkan perhitungan analitik, hasil pengujian, dan pemodelan pada MSC Patran / Nastran, modulus kelenturan spesimen dalam penelitian ini adalah berkisar pada nilai 100 MPa dengan specific strength sebesar 62.04 kNm/kg

Kata Kunci: komposit serat bambu, struktur sandwich, polyurethane, three point bending, modus kegagalan, modulus kelenturan ekuivalen

1. Pendahuluan

Bambu merupakan jenis serat alami yang cukup mudah didapat dan banyak tumbuh di Indonesia. Bagi masyarakat di Indonesia secara umum, bambu identik dengan teknologi yang kuno dan tradisional, namun tidak halnya di negara lain. Melalui penelitian ini penulis ingin mengubah pandangan itu untuk selanjutnya dapat dikembangkan untuk teknologi yang lebih kompleks dan dapat diterapkan untuk kegunaan yang lebih banyak lagi. Saat ini, beberapa negara telah banyak mengembangkan komposit serat bambu dan bahkan telah banyak diaplikasikan sebagai bahan baku produksi suatu barang.

Pada perkembangannya, struktur komposit serat bambu masih terbatas variasinya, terutama untuk struktur dengan konfigurasi *sandwich*, hal ini dikarenakan sifat dari serat bambu yang cukup getas sehingga sukar untuk divariasikan konfigurasinya. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu dengan

menggunakan core kayu balsa, sementara core dengan menggunakan polyurethane masih belum dikembangkan untuk kombinasi *face* komposit serat alam.

Tujuan dari penelitian ini, yaitu:

- Mengetahui karakteristik kekuatan lentur struktur *sandwich* komposit serat bambu dengan core polyurethane berdasarkan hasil uji *three point bending* dan pemodelan di *software* Patran/Nastran
- Mengidentifikasi dan mengklasifikasi modus kegagalan dan modus kerusakan yang terjadi pada struktur *sandwich* komposit serat bambu dengan core polyurethane yang mengalami pembebanan bending.

Masalah yang dikaji pada penelitian ini dibatasi pada kekuatan lentur struktur *sandwich* komposit serat bambu dengan core polyurethane. Oleh sebab itu, penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal, diantaranya:



- Bahan serat alam yang digunakan adalah serat bambu tali (*Gigantochloa apus Kurz*) dalam bentuk anyaman (*woven*) dengan arah serat 0° dan 90°
- Menggunakan *core* jenis *polyurethane* dengan komposisi A dan B sebesar 1:1
- Manufaktur secara *hand lay-up*
- Pengujian difokuskan pada uji untuk mengetahui kekuatan lentur struktur, dalam hal ini yaitu uji *three point bending*
- Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan secara analitik, hasil uji, dan hasil pemodelan dengan *software* elemen hingga MSC Patran/Nastran

Serat Bambu

Bambu merupakan keluarga rumput, dan memiliki sebutan pula sebagai rumput raksasa “*The Giant Grass*”. Sebagai tanaman yang mampu tumbuh cepat, bambu pun memiliki beberapa keunikan, ia hanya berbunga sekali seumur hidupnya yang langsung ditandai dengan kematiannya setelah berbunga. Daur hidup tumbuhan bambu yakni 4 hingga 100 tahun lamanya [Ref.13].

Berikut klasifikasi ilmiah bambu :

Tabel 1

Klasifikasi Ilmiah Bambu [Ref. 11]

Klasifikasi Ilmiah			
Kerajaan	<i>Plantae</i>	Familia	<i>Poaceae</i>
Divisio	<i>Magnoliophyta</i>	Subfamilia	<i>Bambusoideae</i>
Kelas	<i>Liliopsida</i>	Super tribus	<i>Bambusodae</i>
Ordo	<i>Poales</i>	Tribus	<i>Bambuseae</i>

Spesies bambu amat beragam, mulai dari sebesar lidi hingga ukuran raksasa dengan ketinggian hingga mencapai 40 m. Pada jenis bambu tertentu dan kondisi lingkungan tertentu, pertumbuhan bambu dapat mencapai satu meter per jam. Kurang lebih terdapat 1000 spesies bambu dalam 80 marga (*genus*), sekitar 200 spesies dari 20 marga ditemukan di Asia Tenggara, sedangkan di Indonesia ditemukan sekitar 60 jenis. Tidak semua tumbuhan bambu merupakan tanaman asli Indonesia. Bambu di Indonesia ditemukan di dataran rendah sampai ketinggian sekitar 300 m diatas permukaan laut. Pada umumnya ditemukan ditempat-tempat terbuka dan daerahnya bebas dari genangan air.

2. Prosedur Eksperimental

2.1 Proses Manufaktur

Spesimen yang akan dibuat yaitu struktur *sandwich* dengan *face* identik bagian atas dan bawah dengan menggunakan serat bambu anyam sebanyak empat lapisan untuk masing-masing *face*, sedangkan

bagian *core* menggunakan *foam polyurethane*. Pada penelitian ini, metode manufaktur yang digunakan yaitu secara *hand lay-up*. Proses manufaktur secara keseluruhan terlihat pada bagan di bawah..



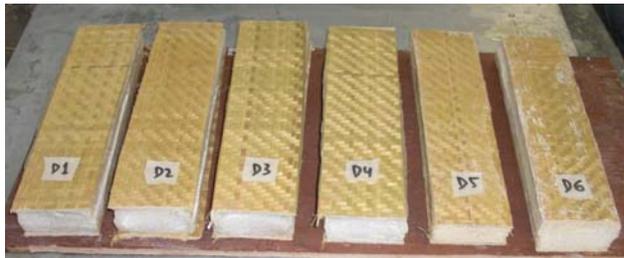
Gambar F
Bagan Proses Manufaktur Komposit Struktur Sandwich untuk Spesimen Uji

2.1.1 Proses Laminasi dan Penyambungan Face dengan Core

Proses laminasi dan proses penyambungan *face* dengan *core* dijadikan menjadi satu proses dikarenakan proses ini dilakukan secara simultan dan kontinu. Urutan langkah kerjanya adalah sebagai berikut:

- Gunakan alas dengan permukaan yang licin sebagai alas proses laminasi (alas yang licin mengurangi potensi terjadinya *void*). Oleskan permukaan ini dengan *wax* agar spesimen tidak menempel dengan alas.
- Lakukan laminasi serat anyam hingga empat lapis.
- Empat lapis pertama yang merupakan *face* bagian bawah disambungkan dengan *core* dengan cara mengoles bagian *core* dan menyambungkannya dengan bagian laminat *face*.
- Proses laminasi dilanjutkan dengan menaruh serat di atas *foam* yang sudah disambung dengan *face* bagian bawah. Lakukan hingga laminat mencapai empat lapisan.
- Setelah proses laminasi selesai, tindh spesimen ini dengan papan dengan permukaan licin dan sudah diberi *wax*. Penindihan ini bertujuan agar bagian *core* benar-benar tersambung dengan kedua *face* dan juga mengurangi kemungkinan terjadinya udara yang masuk antar lapisan yang berakibat pada terbentuknya *void*.





Gambar G
Spesimen Akhir

2.2 Proses Pengujian

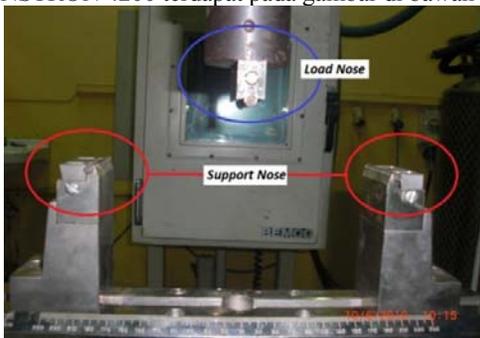
Sebelum melakukan pengujian, beberapa parameter ditentukan terlebih dahulu. Sesuai dengan ASTM C 393 – 00, maka parameter yang perlu diatur pada mesin uji yaitu:

- *Sample Rate* = 4.0 pts/sec
- *Crosshead Speed* = 4.0 mm/min
- *Span Length* = 180 mm

Pada pengujian *three point bending*, pada mesin uji dipasang dua bagian, yaitu:

- *Support Nose*. Bagian ini berfungsi sebagai tumpuan (*roll*). Sesuai dengan ketentuan pada ASTM C 393 – 00, jarak *span* pada *support nose* harus berjarak 50 mm lebih pendek dari panjang total spesimen.
- *Load Nose*. Bagian ini berfungsi sebagai pemberi gaya atau pembebanan hingga spesimen mengalami gagal atau patah.

Bentuk fisik dari *support nose* dan *load nose* pada mesin uji INSTRON 4200 terdapat pada gambar di bawah ini.



Gambar H
Support Nose dan Load Nose Mesin INSTRON 4200

Langkah-langkah pengujian *three point bending* adalah sebagai berikut:

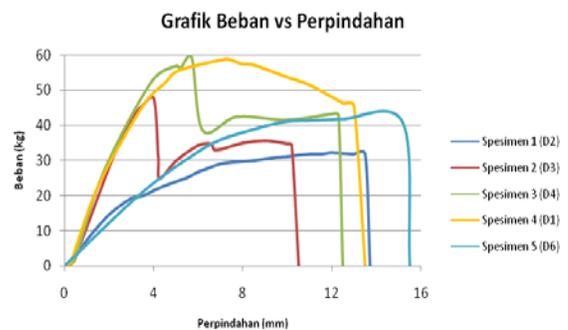
1. Atur jarak *span* pada *support nose*
2. Letakkan *support nose* di atas sensor beban pada mesin uji

3. Pasang *load nose* di bagian atas mesin uji
4. Letakkan spesimen uji di atas *support nose*. Pastikan posisi tumpuan dan posisi *load nose* tepat berada di tengah-tengah spesimen
5. Masukkan parameter uji ke komputer yaitu dimensi spesimen
6. Setelah semua parameter dan spesimen sudah diatur, pembebanan dapat dimulai
7. Pengujian (pembebanan) berhenti pada saat spesimen patah atau gagal
8. Pada saat pembebanan berhenti, di komputer akan muncul grafik pembebanan vs perpindahan
9. Cetak (*print*) data hasil pengujian.



Gambar I
Proses Pengujian Three Point Bending

Dari proses uji didapat grafik pembebanan terhadap defleksi



Gambar J
Grafik Beban vs Perpindahan Hasil Uji Three Point Bending



3. Analisis

Tahapan analisis pada penelitian ini terlihat pada bagan di bawah ini.

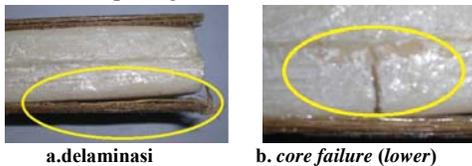


Gambar K
Diagram Pembagian Proses Analisis

3.1 Analisis Modus Kegagalan

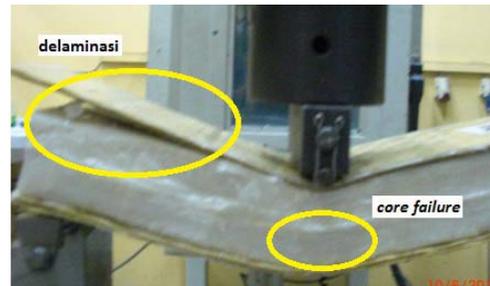
Selama proses pengujian berlangsung, terjadi beberapa modus kegagalan pada spesimen. Modus kegagalannya yaitu:

1. **Delaminasi dan gagal core pada spesimen bagian bawah.** Hal ini terjadi pada spesimen 1 (D2) dan spesimen 5 (D6). Kegagalan yang sama yang terjadi pada kedua spesimen ini, seperti terlihat pada grafik J, *trend* grafik kedua spesimen ini mirip. Bentuk fisik kegagalan kedua spesimen ini terlihat pada gambar di bawah ini.



Dari gambar di atas terlihat bahwa struktur mengalami gagal pada bagian bawahnya (*lower*). Hal ini bisa disebabkan oleh ikatan *adhesive* antara *core* dan *face* di bagian bawah yang kurang kuat, sehingga pada saat pembebanan *bending* ikatan *adhesive* ini langsung terlepas sehingga kekuatan *core* di bagian bawah tidak mampu menahan pembebanan sehingga *core* bagian bawah pun gagal.

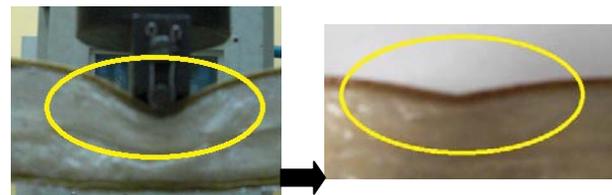
2. **Delaminasi dan gagal core di bagian bawah terlebih dahulu yang diikuti dengan bagian atas.** Hal ini terjadi pada spesimen 2 (D3) dan spesimen 3 (D4). Kegagalan yang sama yang terjadi pada kedua spesimen ini terlihat pada grafik J, *trend* grafik kedua spesimen ini mirip, yaitu grafiknya mengalami dua kali turun (mengalami dua kali penurunan grafik yang drastis). Bentuk fisik kegagalan kedua spesimen ini terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar L
Modus Kegagalan yang terjadi pada spesimen D3 dan D4

Dengan adanya gagal *core* terlebih dahulu, hal ini membuat kekuatan spesimen menjadi turun drastis (terlihat di grafik dengan penurunan grafik secara drastis). Namun karena *face* belum mengalami gagal, spesimen ini masih mampu menahan beban yang diberikan. Namun karena kurang kuatnya ikatan *adhesive* antara *core* dan *face* di bagian atas, delaminasi pun tidak dapat dihindari yang berakibat pada terjadinya gagal kedua (*core* bagian atas juga rusak).

3. **Gagal lokal pada face.** Hal ini terjadi pada spesimen 4 (D1). Kegagalan yang terjadi yaitu adanya rusak lokal pada bagian *face* atas hingga mengalami gagal. Berbeda dengan spesimen yang lainnya, spesimen D1 ini tidak mengalami delaminasi ataupun gagal pada *core*. Bentuk fisik kegagalan pada spesimen D1 terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar M
Modus Kegagalan yang terjadi pada spesimen D1

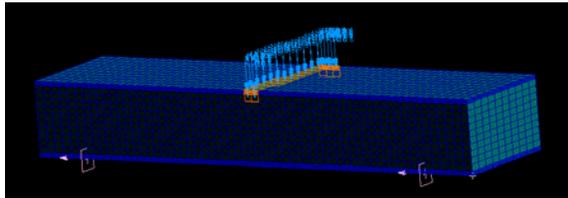
Dari gambar di atas terlihat bahwa yang mengalami kegagalan hanya *face* bagian atas saja dengan adanya pelengkungan. Hal ini menunjukkan kuatnya ikatan *adhesive* antara *core* dan *face* serta bagian *core* yang memiliki kelenturan yang lebih baik dibandingkan *core* pada spesimen yang lain. Bagian *core* yang lebih “kenyal” dan ikatan *adhesive* yang lebih kuat membuat spesimen ini mampu menahan beban yang lebih besar hingga mencapai 59 kg seperti yang terlihat pada grafik J. Kondisi seperti inilah yang memerlukan persamaan perhitungan yang unik karena kondisinya yang unik juga. Hal ini dikarenakan modus kegagalan yang terjadi



bukan *overall buckling* melainkan rusak lokal pada bagian *face*.

3.2 Analisis Melalui Pemodelan pada MSC Patran/Nastran

Pada analisis dengan menggunakan bantuan *software* MSC Patran/Nastran, parameter yang dimasukkan adalah berdasarkan hasil dari pengujian yang telah dilakukan (uji *three point bending*). Untuk mempermudah perhitungan dan pengerjaan, dimensi untuk spesimen model pada pemodelan ini adalah nilai rata-rata. Nilai beban maksimum yang diterapkan pada bahan adalah beban maksimum berdasarkan hasil uji.



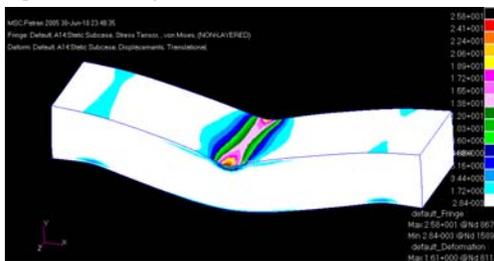
Gambar N
Pemodelan uji *three point bending* spesimen pada MSC Patran

Sehingga didapat hasil perhitungan berdasarkan *software*:

Tabel 2
Defleksi Maksimum Spesimen Hasil Pemodelan pada MSC Patran

Spesimen	Kode	Δ (mm)
1	D2	1.1560144
2	D3	3.0171988
3	D4	2.7771456
4	D1	3.6015279
5	D6	1.6133636
rata-rata		2.43305006

Gambar di bawah ini akan memperlihatkan pola tegangan yang dialami spesimen pada saat dilakukan *three point bending*.



Gambar O
Distribusi Tegangan yang dialami Spesimen pada pemodelan MSC Patran

Dari gambar O terlihat bahwa bagian *face* paling mengalami dampak dari pembebanan *bending* ini. Hal ini dikarenakan sifat dari *core* yang terbuat dari bahan

polyurethane foam yang sifatnya kenyal sehingga mampu meredam tekanan/tegangan yang ada di atasnya. Pada kenyataannya pada proses uji terjadi *core* yang mengalami kegagalan. Dalam hal ini yang berperan penting yaitu kesempurnaan dari spesimen hasil manufaktur. Dari gambar di atas juga terlihat distribusi tegangan yang berbeda antara kedua tumpuan. Hal ini dikarenakan tuntutan dari program *software* yang mengharuskan salah satu tumpuan yaitu tumpuan pin. Hal ini tentu saja akan mempengaruhi akurasi dari data hasil analisis.

3.3 Perhitungan Analitik

3.3.1 Tegangan Geser pada Core

Core pada struktur *sandwich* dirancang untuk menahan beban geser pada struktur tersebut. Untuk mendapatkan besarnya tegangan geser yang dialami *core* menggunakan persamaan:

$$\tau = \frac{P}{(d+c)b} \quad (x.2)$$

- P : Beban yang diberikan (N)
d : Tebal *sandwich* (mm)
c : Tebal *Core* (mm)
b : Lebar *Sandwich* (mm)

Dengan nilai τ dalam satuan Mpa

Dengan memasukkan parameter-parameter untuk masing-masing spesimen (dimensi masing-masing spesimen) dan memasukkan nilai beban maksimum (pada kondisi *yield*) dari hasil uji, maka didapat:

Tabel 3
Tegangan Geser *Core* Maksimum pada Masing-masing Spesimen

Spesimen	Kode	τ (MPa)
1	D2	0.078342
2	D3	0.124461
3	D4	0.152361
4	D1	0.149276
5	D6	0.114985
rata-rata		0.123885

3.3.2 Tegangan Lentur (*bending*) pada Face

Pembebanan *bending* pada struktur *sandwich* mengakibatkan bagian *face* merupakan bagian yang paling dominan menanggung beban tersebut. Untuk



mendapatkan besarnya tegangan lentur yang dialami *face* menggunakan persamaan:

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad (x.3)$$

P : Beban yang diberikan (N)
L : Panjang *span* specimen yang ditumpu (mm)
t : Tebal *face* (mm)

Dengan nilai σ dalam satuan MPa

Dengan memasukkan parameter-parameter untuk masing-masing specimen (dimensi masing-masing specimen) dan memasukkan nilai beban maksimum (pada kondisi *yield*) dari hasil uji, maka didapat:

Tabel 4
Tegangan Lentur *Face* Maksimum pada Masing-masing Spesimen

Spesimen	Kode	σ (MPa)
1	D2	3.525407
2	D3	5.600757
3	D4	4.570831
4	D1	6.717409
5	D6	5.174312
rata-rata		5.117743

3.3.3 Defleksi pada Spesimen *Sandwich*

Pembebanan lentur pada suatu batang akan menyebabkan batang tersebut mengalami defleksi. Pada struktur *sandwich*, persamaan untuk mendapatkan besarnya defleksi yang dialami oleh batang sedikit berbeda dengan batang pada umumnya. Hal ini dikarenakan adanya faktor modulus kelenturan bagian *face* dan modulus geser bagian *core*. Persamaannya yaitu:

$$\Delta = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4U} \quad (x.4)$$

Dengan $D = \frac{E_f(d^3 - c^3)b}{12}$ (x.4a) dan

$$U = \frac{G_c(d+c)^2 b}{4c} \quad (x.4b)$$

E_f = Modulus Kelenturan bagian *face*,

G_c = Modulus Geser bagian *core*

Karena keterbatasan alat uji, maka nilai G_c didapat dari

persamaan $G_c = \frac{E_c}{2(1+\nu_c)}$. Dengan nilai:

$E_f = 7.092$ Gpa [Ref 6]

$E_c = 8.796$ MPa [Ref 2]

$\nu_c = 0.3$ [Ref 2]

Sehingga didapat:

Tabel 5
Defleksi Maksimum pada Masing-masing Spesimen

Spesimen	Kode	Δ (mm)
1	D2	2.04
2	D3	3.24
3	D4	3.79
4	D1	3.88
5	D6	2.99

Perbandingan hasil perhitungan analitik di atas jika dibandingkan dengan data hasil uji dan data hasil pemodelan pada MSC Patran/Nastran terdapat pada tabel di bawah ini.

Tabel 6
Perbandingan Defleksi
Hasil Perhitungan Analitik, Pemodelan Elemen Hingga, dan Hasil Pengujian

Spes	Kode	Δ (mm)			Perbedaan	
		Analitik	Nastran	Hasil Uji	Uji vs Analitik	Uji vs Nastran
1	D2	2.04	1.16	2.136	4.7%	84.8%
2	D3	3.24	3.02	3.166	2.3%	4.9%
3	D4	3.79	2.78	2.614	31.0%	5.9%
4	D1	3.88	3.60	3.458	11.0%	4.0%
5	D6	2.99	1.61	3.750	25.5%	132.4%

Dari tabel di atas terlihat bahwa **spesimen D3** memiliki data hasil pengujian yang paling akurat, yaitu mendekati hasil dari perhitungan analitik dan pemodelan elemen hingga. Lain halnya di **spesimen D2** dan **D6**, kedua specimen ini mengalami perbedaan nilai defleksi yang **sangat jauh** dibandingkan dengan pemodelan numerik. Hal ini terjadi berkaitan dengan modus kegagalan yang dialami oleh kedua specimen ini. Lebih jelas tentang fenomena ini akan dijelaskan selanjutnya.

3.3.4 Modulus Kelenturan (E)

Pada pembebanan batang dengan material konvensional melalui *three point bending*, nilai Modulus Kelenturan (E) bisa langsung didapatkan berdasarkan persamaan x.1 sehingga persamaan untuk mencari E menjadi:

$$E = \frac{P L^3}{\Delta 48I}, \text{ dengan } \frac{P}{\Delta} \text{ merupakan gradien}$$

kemiringan daerah elastis pada grafik hasil uji *three point bending*. Lain halnya dengan struktur *sandwich*, nilai defleksi (Δ) merupakan fungsi dari Modulus



Kelenturan *face* (E_f) dan Modulus Geser *core* (G_c).

Melalui tugas akhir ini penulis ingin membuktikan persamaan yang mampu menunjukkan nilai E ekivalen / E struktur *sandwich* keseluruhan. Langkah yang dilakukan yaitu:

- Mengubah persamaan x.1 menjadi:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{E} \frac{L^3}{48I}, \quad \text{dengan} \quad \frac{1}{m} = \frac{\Delta}{P} \quad (\text{x.5})$$

- Lakukan hal yang sama terhadap persamaan x.2 sehingga didapat:

$$\frac{1}{m} = \frac{L^3}{48} \left(\frac{1}{D} + \frac{12}{UL^2} \right) \quad (\text{x.6})$$

- Dengan mensubstitusi persamaan x.6 ke x.5 sehingga didapat persamaan:

$$E = \frac{1}{I \left(\frac{1}{D} + \frac{12}{UL^2} \right)} \quad (\text{x.7})$$

- Dengan memasukkan nilai U dan D dari persamaan x.4a dan x.4b sehingga didapat persamaan E untuk struktur *sandwich*:

$$E = \frac{1}{d^3 \left(\frac{1}{E_f (d^3 - c^3)} + \frac{4c}{G_c (d+c)^2 L^2} \right)} \quad (\text{x.8})$$

Dengan

- E : Modulus kelenturan (MPa)
- L : Panjang *span* spesimen yang ditumpu (mm)
- c : Tebal *core* (mm)
- d : Tebal *sandwich* (mm)
- E : Modulus kelenturan bahan *face* (MPa)
- G_c : Modulus Geser bahan *core* (MPa)

Dengan memasukkan parameter-parameter dari masing-masing spesimen ke dalam persamaan di atas, maka nilai E didapat. Perbandingan perhitungan ini dengan hasil pengujian *three point bending* terlihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 7
Perbandingan Modulus Kelenturan yang didapat pada Perhitungan Analitik dan Hasil Pengujian

Spes	Kode	E (MPa)		Perbedaan
		Analitik	Hasil Uji	
1	D2	85.27	47.2	80.66%
2	D3	84.56	97.2	13.00%
3	D4	84.59	105.7	19.98%
4	D1	88.10	109.2	19.32%
5	D6	96.78	44.9	115.55%

Dari tabel terlihat bahwa D3 juga merupakan spesimen dengan tingkat kedekatan nilai dari data hasil uji dengan perhitungan analitik yang paling dekat (persentase perbedaan paling kecil).

Dari tabel 7 juga terlihat bahwa pada spesimen D2 dan D6 memiliki perbedaan nilai E yang sangat jauh jika dibandingkan dengan perhitungan analitik (hampir setengah). Hal ini dipengaruhi oleh besarnya defleksi yang dialami spesimen pada saat terjadi pembebanan maksimum. Defleksi yang maksimum ini juga dipengaruhi oleh kesamaan modulus kegagalan yang dialami oleh kedua spesimen.

Untuk lebih meyakinkan analisis, maka perlu diselidiki nilai dari kelenturan dari setiap spesimen. Berdasarkan persamaan $P = k \cdot \Delta$, maka nilai k yaitu $\frac{P}{\Delta}$. Mencari nilai kelenturan (k) untuk tiap metode yaitu:

1. Analitik

Berdasarkan persamaan x.4, sehingga nilai k didapat dengan persamaan:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{L^3}{48D} + \frac{L}{4U} \right)} \quad (\text{x.9})$$

Dengan satuan k yaitu N/mm .

2. Numerik (Pemodelan Elemen Hingga)

Nilai k yang didapat dari perhitungan secara numerik yaitu dengan memasukkan nilai beban pada saat *yield* di *software* PATRAN/NASTRAN dan berdasarkan hasil perhitungan *software* didapat nilai defleksi pada saat *yield*. Sehingga nilai k bisa langsung didapat dengan membagi nilai P (beban) dalam Newton dengan defleksi (Δ) dalam *mm*.



3. Eksperimental (Hasil Uji)

Pada metode eksperimental, nilai k didapat dengan cara membaca grafik, yaitu melihat beban (P) dan defleksi (Δ) pada saat *yield*. Sama halnya dengan numeric, nilai k bisa langsung didapat dengan mendapatkan rasio beban terhadap defleksi.

Berdasarkan perhitungan dari ketiga metode di atas, maka didapat nilai k yang terlihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 8
Perbandingan Nilai Faktor Kelenturan (k) yang didapat dari Perhitungan Analitik, Numerik, dan Eksperimental

Spe s	Nilai k			Perbedaan	
	Analitik (Pers. ASTM)	Numerik (PATRAN/ NASTRAN)	Eksperimental (Grafik Hasil Uji)	Uji vs Analitik	Uji vs Numerik
D2	149.09	135.70765	73.45	51%	46%
D3	149.89	135.70759	129.33	14%	5%
D4	153.27	135.70757	144.18	6%	6%
D1	148.43	135.70760	141.34	5%	4%
D6	137.40	135.70756	58.39	58%	57%

Sama halnya seperti hasil yang didapat pada analisis defleksi, pada perhitungan nilai kelenturan (k), spesimen D2 dan D6 juga memiliki perbedaan nilai hasil uji yang cukup jauh (dua kali lipat) jika dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik (berdasarkan persamaan di ASTM) dan perhitungan numerik oleh *software* PATRAN/NASTRAN. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, kegagalan yang dialami kedua spesimen ini yaitu adanya delaminasi yang cukup parah dan disertai dengan gagal *core* yang cukup parah pula. Hal inilah yang sangat mempengaruhi kekuatan lentur dari spesimen ini. Untuk lebih jelasnya kondisi kegagalannya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar P
Modus Kegagalan pada Spesimen D2&D6 yang menyebabkan kekuatan sangat kecil

Dari gambar di atas terlihat bahwa ikatan *adhesive* sangat berperan penting terhadap kekuatan lentur struktur *sandwich*. Dari modus kegagalan yang terjadi pada spesimen D2 dan D6 terlihat bahwa akibat lemahnya ikatan *adhesive* menyebabkan adanya

delaminasi yang menginisiasi adanya gagal *core* yang membuat *core* hampir terbelah dua akibat pembebanan *bending* yang terjadi.

Dari hasil pengujian terlihat bahwa modulus kelenturan spesimen pada tugas akhir ini berkisar pada nilai 100 MPa. Jika kita bandingkan dengan kekuatan spesifik lenturnya, maka didapat nilai pada tabel 9.

Tabel 9
Kekuatan Lentur Spesifik Spesimen

Spe s	Kode	Kekuatan Lentur (MPa)	Rapat Massa (g/cm ³)	Kekuatan Lentur Spesifik (kNm/kg)
1	D2	5.202	0.182	28.62
2	D3	8.302	0.181	45.91
3	D4	9.946	0.176	56.64
4	D1	9.739	0.157	62.04
5	D6	7.129	0.206	34.63

Jika dibandingkan dengan paduan aluminium secara umum dengan kekuatan lentur sebesar 330 MPa dan rapat massa 2.7 g/cm³ [Ref 18] didapat kekuatan lentur spesifik aluminium sebesar **122.2 kNm/kg**. Dengan mengambil nilai maksimum dari hasil percobaan (62.04 kNm/kg), maka besarnya kekuatan lentur spesifik spesimen ini sebesar 50.76% dari aluminium. Nilai yang cukup kecil, namun spesimen ini masih memiliki keunggulan yaitu proses manufakturnya yang jauh lebih murah dan tentu saja tahanan korosi yang juga lebih baik dari aluminium.

4. Kesimpulan

Melalui penelitian pada tugas akhir ini maka dapat disimpulkan beberapa hal, antara lain:

- Persamaan untuk mendapatkan E (modulus kelenturan) ekuivalen yang diturunkan oleh penulis (persamaan 5.7) **terbukti keakuratannya**. Hal ini terlihat pada hasil perhitungan dari pemodelan di MSC Patran/Nastran dengan kedekatan nilai kurang dari 4% dan hasil dari pengujian *three point bending* yang nilainya juga tidak terlalu jauh perbedaannya (13%).
- Nilai modulus kelenturan spesimen *sandwich* dengan *core polyurethane* tergolong sangat kecil yaitu hanya berkisar 100 MPa dan kekuatan lentur spesifik berkisar pada nilai 64.02 kNm/kg. Jika dibandingkan dengan paduan aluminium yang memiliki kekuatan lentur spesifik sebesar 122.2 kNm/kg. Besarnya kekuatan lentur spesifik spesimen ini sebesar 50.76% dari aluminium. Nilai yang cukup kecil, namun spesimen ini masih memiliki keunggulan yaitu proses manufakturnya yang jauh lebih murah dan tentu saja tahanan korosi yang juga lebih baik dari aluminium. Hal ini dapat disiasati dengan



mengurangi tebal *core* agar mengurangi inersia penampang sehingga kekuatan lentur spesimen dapat ditingkatkan.

- Ikatan *adhesive* antara *face* dan *core* sangat memegang peranan penting pada kekuatan struktur *sandwich*. Hal ini terlihat dari hasil pengujian, spesimen yang mengalami modulus kegagalan delaminasi rata-rata memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen yang tidak mengalami delaminasi.
- Perbedaan hasil perhitungan (baik defleksi maupun kelenturan) yang didapat pada perhitungan secara numerik (menggunakan *software* elemen hingga) dikarenakan adanya perbedaan kondisi tumpuan. Tuntutan program dari *software* yang mengharuskan adanya salah satu tumpuan yang berupa pin, sementara pada kenyataannya spesimen diuji dengan ditumpu pada tumpuan *roll* di kedua ujungnya, hal inilah yang mengurangi keakuratan hasil perhitungan yang didapat, namun hal ini masih dapat ditoleransi.
- Adanya perbedaan nilai yang cukup jauh antara hasil uji dengan hasil perhitungan analitik dan numerik merupakan konsekuensi dari **tidak berlakunya teori Kirchhoff-Love** (seperti yang telah dijelaskan pada subbab 2.6) pada struktur *sandwich*. Perhitungan analitik dan numerik pada *software* masih mengambil asumsi pada teori Kirchhoff-Love, yaitu pelat tipis, sehingga untuk struktur *sandwich* yang fenomenanya sama seperti pada pelat tebal, maka perhitungan yang dilakukan akan lebih rumit dan butuh penelitian lebih lanjut.

Pengakuan

Laboratorium Komposit Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, serta kelompok komposit bambu terimakasih atas dukungannya.

Referensi

- [1] Allen, Howard. 1969. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. New York: Pergamon Press
- [2] Aseno, Adi. 1998. Tugas Akhir Sarjana. *Analisis Beban Tekuk Kritis Kolom Sandwich Komposit Orthotropik*. Jurusan Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
- [3] ASTM C 393 – 00. 2000. *Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions. Annual Book of ASTM Standards*. United States: ASTM International
- [4] Hadi, Bambang Kismono. 2006. *Diktat Kuliah PN-5022 Mekanika Struktur Komposit*. Bandung: Penerbit ITB
- [5] Hibbeler, R.C. 2005. *Mechanics of Materials Sixth Edition in SI units*. Singapore: Prentice Hall
- [6] Iffannossa, Arfie Armelia. 2010. Tugas Akhir Sarjana. *Analisis Kekuatan Tarik Komposit Serat Bambu Helai dan Anyam dengan Metode Manufaktur Hand Lay-Up*. Bandung: Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
- [7] Jamaludin. 2009 Tugas Akhir Sarjana. *Analisis Kekuatan Bearing pada Sambungan Baut dengan Bushing pada Pelat Komposit Serat Bambu dengan Metode Eksperimental*. Bandung: Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
- [8] Julianti, Elisa dan Mimi Nurminah. 2006. *Buku Ajar Teknik Pengemasan*. Departemen Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara
- [9] Kuntjoro, Wahyu. 2005. *An Introduction to the Finite Element Method*. Singapore: Mc Graw Hill
- [10] Plantema, Frederik. 1966. *Sandwich Construction*. California: John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Purnawijaya, Yudi. 2009. Tugas Akhir Sarjana. *Analisis Kekuatan Lentur Komposit Serat Bambu Arah Lengthwise dan Crosswise dengan Uji Three Point Bending*. Bandung: Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
- [12] Subianto, Nicki. 2009. Tugas Akhir Sarjana. *Analisis Kekuatan Tarik Komposit Serat Bambu yang Dibuat dengan Metode Manufaktur Hand Lay-Up*. Bandung: Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
- [13] Willy, Deny. 2005 *Furnitur Tradisional (Bambu Rotan)*. Bandung: Penerbit ITB
- [14] Yudhanto, Arief. 2002. Tugas Akhir Sarjana. *Overall Buckling and Wrinkling Analysis of Anisotropic Sandwich Panels by Finite Element Method (A Three-Dimensional Approach)*. Departemen Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
- [15] <http://www.bamboo.web>
- [16] <http://en.wikipedia.org>
- [17] <http://iqmal.staff.ugm.ac.id>
- [18] <http://www.accuratus.com>



