ANALISIS *IMPACT* KECEPATAN RENDAH PADA KOMPOSIT STRUKTUR *SANWICH* SERAT BAMBU DENGAN *POLYURETHANE CORE*

Maulana Abduh, Bambang Kismono Hadi, Muhammad Kusni

Program Studi Aeronotika dan Astronotika, Institut Teknologi Bandung, Jawa Barat, Indonesia
Email : tuanabduh@yahoo.com

ABSTRAK

Pada paper ini dibahas hasil penelitian karakteristik impact dari komposit struktur sandwich serat bambu dengan polyurethane core yang dikenai beban impact kecepatan rendah. Diharapkan dapat menjadi langkah menuju 100% komposit alam dan menjadi referensi dalam pembuatan komposit sandwich panel serat bambu. Spesimen dibuat dari bambu anyam, epoxy resin, dan polyurethane foam. Spesimen yang dibuat memiliki variasi tebal core dan lebar spesimen. Pengujian impact yang dilakukan adalah drop weight impact test dengan kondisi batas jepit menggunakan ketinggian dan massa beban yang bervariasi. Dilakukan analisis mengenai modus dan kecenderungan kegagalan impact yang terjadi, defleksi, energi yang diserap oleh spesimen, dan perbandingan dengan beban statik pada sandwich. Kegagalan yang terjadi adalah local indentation, matrix cracking, core failure, delaminasi, dan patah serat pada face. Core cracking yang terjadi lurus searah arah tumbukan. Perbedaan energi serapan karena geometri struktur dan core density.

Kata kunci: Komposit serat bambu, struktur sandwich, polyurethane foam, impact kecepatan rendah, modus kegagalan, energi.

1. Pendahuluan

Saat ini perkembangan material komposit salah satunya bergerak ke arah pencarian material komposit yang dapat diperbaharui (*renewable*) dan dapat diuraikan (*degradable*). Dengan semakin besarnya isu lingkungan serta pemanasan global yang muncul, kebutuhan untuk menghasilkan material yang dapat diperbaharui menjadi semakin tinggi. Solusi yang dihasilkan menjawab tantangan ini adalah penggunaan serat alam (*natural fiber*) dan matriks alam (*biopolymers*) dalam pembuatan material komposit alam (*biocomposite*).

Dalam keberjalanannya, perkembangan yang signifikan adalah dibagian penggunaan serat alam. Berbagai serat alam seperti serat rami, serat nanas, serat kelapa, dan sejenisnya telah cukup banyak didapatkan sifat mekaniknya. Serat bambu sebagai salah satu serat alam juga telah dilakukan penelitiannya. Karena ketergantungannya terhadap cuaca dan tempat tumbuh, serat alam yang diteliti terkadang memberikan sifat mekanik yang berbeda. Untuk serat bambu, karena banyaknya jenis bambu yang tumbuh maka penelitian mengenai sifat mekanik serat bambu tidak sekali selesai dilakukan. Beberapa *properties* serat alam dibandingkan dengan serat gelas sudah pernah dilakukan [3].

Berdasarkan uji yang telah dilakukan [6] , data kekuatan tarik (*yield strength*) dan lainnya dari komposit serat bambu diberikan dalam tabel berikut :

Tabel 1.1 *Modulus young* dan *ultimate strength* komposit serat bambu

Jenis Komposit	*Modulus Young, E (Gpa)*	*Ultimate Strength (MPa)*
Bambu Helai dengan Arah Serat 0°	13,9	79,5
Bambu Helai dengan Arah Serat 0°	12,41	123,5
Bambu Helai dengan Arah Serat 90°	2,32	8,98
Serat Bambu *Woven* dengan Arah +45˚/-45˚	2,46	16,7
Serat Bambu *Woven* dengan Arah 0˚/90˚	7,09	58,94

Salah satu bentuk material komposit alam adalah sebagai struktur *sandwich*. Pada penelitian ini dibuat komposit struktur *sandwich beam* dari serat bambu yang digunakan sebagai *face*, sedangkan untuk bagian *core* digunakan *polyurethane foam*. Konfigurasi struktur yang dipilih untuk diteliti adalah berbentuk *beam* atau batang.

Pada penelitian ini ingin diketahui bagaimanakah kecenderungan kegagalan yang terjadi pada struktur

sandwich serat bambu akibat beban *impact* serta dilihat besarnya energi *impact* yang diterima. Dengan diketahui kecenderungan kegagalannya, kedepannya diharapkan bisa dilakukan pencegahan awal atau peningkatan kualitas pada bagian yang mengalami kegagalan awal sehingga didapat struktur dengan karakteristik *impact* yang diinginkan.

Penggunaan struktur *sandwich* serat bambu dalam bentuk *panel* misalnya, walaupun belum bisa digunakan sebagai bagian penting seperti di sayap pesawat tetapi diharapkan bisa digunakan sebagai bagian dari interior pesawat seperti lantai, penutup bagasi, atau bagian-bagian yang tidak terlalu membutuhkan kekuatan tinggi. Selain di pesawat, struktur ini bisa juga diaplikasikan pada bidang automotif ataupun furniture.

2. Prosedur Eksperimental

2.1 Spesimen

Bahan yang digunakan untuk *face* adalah bambu anyam 2x2 *twill*. Ukuran anyaman adalah sekitar 4 mm lebar dan 0.5 mm tebal. Untuk semua spesimen dibuat 4 lapis bambu untuk tiap *face*. Jenis bambu yang digunakan adalah bambu apus atau bambu tali dengan nama ilmiah *Gigantochloa apus Kurz*. Dipilih bentuk anyaman karena lebih mudah untuk dimanufaktur daripada bambu helai. Sebelum anyaman bambu digunakan, bambu dibersihkan menggunakan alkohol 95% untuk menghilangkan *lignin* pada bambu lalu keringkan.

Core struktur dibuat dari *polyurethane foam*. Perbandingan yang digunakan antara *polyurethane A* dan *polyurethane B* adalah 1:1. Perlu dipastikan untuk menghilangkan seluruh *wax* pada permukaan *polyurethane foam* yang dibuat. Sebagai matrix struktur, digunakan resin *epoxy*. Perbandingan antara *epoxy resin* dan *epoxy hardener* adalah 1:1. Spesimen dibuat menggunakan metode *hand lay-up*.

Geometri spesimen uji semuanya memiliki panjang 197 mm dan tebal tiap *face* 25mm. Variasi geometrinya adalah sebagai berikut

Tabel 2.1 Data spesimen uji

Spesimen	*Lebar (mm)*	*Tebal Core (mm)*	*Tebal Total (mm)*	*Massa foam (gr)*	*Massa bambu @ face (gr)*
A1	60	13	18	8	12
A2	60	13	18	8	12
A3	60	13	18	8	13
A4	60	13	18	8	13
B1	60	28	33	22	14
B2	60	28	33	17	14
B3	60	28	33	17	13
B4	60	28	33	20	13
C1	80	25	30		16
C2	80	25	30		16

Gambar 2.1 Spesimen uji

2.2 Uji *Impact*

Jenis *impact test* yang digunakan adalah *drop weight impact test*. Kondisi tumpuan spesimen adalah jepit. Penumbuk yang digunakan berupa silinder pejal dengan diameter 4 cm dan panjang 8 cm. Ada beberapa kecepatan yang digunakan adalah hasil pembacaan ulang kecepatan dengan kondisi sama karena kesalahan pembacaan oleh sensor sebelumnya. Berat beban dan kecepatan jatuh beban yang digunakan bervariasi, berikut data pengujiannya

Tabel 2.2 Data hasil pengujian *impact*

Spesimen	*Beban (kg)*	*Tinggi (m)*	*Kecepatan (m/s)*
A1	9,7	1,05	
A2	4,7	1,05	2,96
A3	9,7	0,3	1,74
A4	14,7	0,32	1,97
B1	14,7	0,3	1,02
B2	14,7	0,48	2,69
B3	14,7	0,3	1,97
B4	14,7	0,3	1,97
C1	14,7	0,3	1,97
C2	14,7	0,3	1,97

3. Hasil dan Analisis

Respon *impact* dari struktur komposit dapat dibagi menjadi 4 kategori [5]. Pertama seluruh energi *impact* diserap oleh struktur pada deformasi elastis, dan kemudian dilepas ketika struktur kembali ke bentuk awalnya. Kedua adalah deformasi plastis, ketika sebagian energi diserap deformasi elastis dan sisa energi diserap oleh deformasi plastis permanen pada struktur. Ketiga, energi diserap melalui kerusakan pada struktur. Terakhir, level energi dapat melebihi kemampuan struktur dan menyebabkan *catastrophic failure*. Energi yang dapat diserap pada deformasi elastis tergantung pada kekakuan material dan geometri dari struktur.

Kegagalan dan defleksi yang terjadi pada spesimen uji cukup beragam. Karena uji yang dilakukan adalah untuk melihat bagaimana kecenderungan kegagalan yang terjadi pada struktur *sandwich* serat bambu ketika diberi beban *impact* dan bukan mencari *crashworthiness*, maka pengujian pada spesimen dilakukan tidak hingga

spesimen menjadi hancur. Untuk kasus *impact*, kemungkinan kegagalan yang terjadi pada komposit struktur *sandwich* adalah *core buckling, core failure, delaminasi, matrix cracking*,dan patahnya serat pada *face* [1]. Berikut kegagalan terjadi pada masing-masing spesimen :

a. Spesimen A1

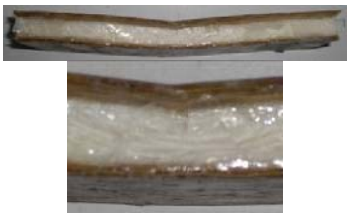
Karena penumbuk yang digunakan berupa silinder tidur, kontak antara spesimen dan penumbuk yang lebih lebar dari spesimen menyebabkan kegagalan yang terjadi pada satu garis daerah kontak saja.

Gambar 3.1 Spesimen A1 setelah *impact*

Pada percobaan pertama karena masih mencoba beban dan ketinggian, kerusakan spesimen mencapai *cathastrophic failure*, spesimen hampir patah seluruhnya. Beberapa modus kegagalan yang terjadi pada spesimen A1 adalah *core failure* dan patahnya serat pada *face*. Kegagalan diawali dengan defleksi spesimen yang sangat besar. Defleksi yang sangat besar terjadi karena lepasnya jepit pada spesimen sehingga kondisi spesimen seolah menjadi seperti *simply support*. *Face* bawah dari *sandwich* mengalami *clean failure*, yaitu serat terputus seluruhnya dengan rapih. *Clean failure* terjadi karena *face* bawah sudah tidak bisa menahan beban tarik akibat beban *impact* pada struktur. Untuk *face* atas juga terjadi patah serat, hanya saja lapisan serat paling atas tidak patah kemungkinan karena area kontak yang terjadi dengan penumbuk.

b. Spesimen A2

Beban yang diberikan pada spesimen A2 adalah 4,7 kg dengan ketinggian sama seperti spesimen A1 yakni 105 cm. Pengurangan beban diharapkan tidak membuat struktur *sandwich* menjadi patah. Keputusan untuk menurunkan beban memang memperkecil kerusakan yang terjadi, terlihat seperti gambar 3.2.



Gambar 3.2 Spesimen A2 setelah *impact*

Modus kegagalan yang terjadi hanya *core buckling, matrix cracking*, dan patahnya serat pada *face*. Karena *core* yang cukup tipis menyebabkan terjadinya *core buckling*, yang terlihat dari terdefleksinya seluruh bagian *core* walau tidak besar. *Matrix cracking* terlihat pada bagian bawah *face* atas area yang tertumbuk, dan sepertinya juga terjadi sedikit patah serat pada area tersebut.

c. Spesimen A3

Karena spesimen A2 sedikit mengalami kegagalan, dicoba dilakukan penambahan beban kembali menjadi 9,7 kg namun dengan ketinggian 30 cm. Pengurangan ketinggian juga dilakukan agar jatuhnya beban cukup mulus, tidak melambat ditengah jalan. Kondisi jepit yang masih bagus setelah pengujian, membuat kegagalan yang terjadi tidak besar.

Dengan kondisi-kondisi yang disebutkan, kondisi spesimen A3 setelah *impact* hanya mengalami defleksi pada *face* atas dan sedikit *face* bawah atau terjadinya *local indentation*. Pada saat *impact* terjadi defleksi cukup besar, namun kemudian batang *sandwich* kembali ke posisi seperti gambar 3.3.

Gambar 3.3 Spesimen A3 setelah *impact*

d. Spesimen A4

Untuk uji spesimen A4 dilakukan penambahan beban menjadi 14,7 kg dengan ketinggian sama 30 cm. Dengan dilakukan penambahan beban ternyata memberikan kerusakan yang cukup besar. Terlihat seperti gambar 3.4, terjadi *core failure*, *core buckling*, juga patahnya serat. *Core failure* yang cukup parah pada sisi kiri spesimen kemungkinan disebabkan karena jepit spesimen terlepas saat terjadi tumbukan sehingga spesimen berdefleksi cukup besar dan *core* robek mengenai mur penjepit. Namun *core failure* yang lurus arah tumbukan dan patahnya serat pada bagian bawah *face* atas, disebabkan oleh tumbukan yang terjadi. *Core failure*, patahnya serat, dan defleksi *face* pada spesimen ini lebih besar dibanding spesimen A2 dan A3.

Gambar 3.4 Spesimen A4 setelah *impact*

e. Spesimen B1

Dengan ketebalan *core* dua kali spesimen A, spesimen B1 diberi beban *impact* sebesar 14,7 kg dari ketinggian 30 cm. Untuk spesimen B1 hasil ujinya luar biasa, walau saat pengujian terjadi defleksi namun kemudian spesimen kembali ke keadaan awal dan tidak mengalami kegagalan, artinya energi tumbukan diserap oleh deformasi elastis yang terjadi. Kondisi jepit spesimen ini bagus pada saat tumbukan dan setelah tumbukan. Berat *core* untuk spesimen B1 paling besar dibandingkan spesimen B lainnya. Artinya *density* dari *core* spesimen B1 paling tinggi, yang dapat menjadi alasan kenapa spesimen B1 tidak mengalami defleksi setelah tumbukan seperti yang lainnya.

Gambar 3.5 Spesimen B1 setelah *impact*

f. Spesimen B2

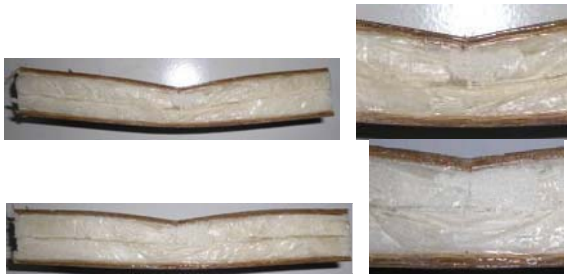
Karena pada spesimen B1 tidak terjadi kerusakan, pada pengujian spesimen B2 dilakukan penambahan ketinggian jatuh beban menjadi 49 cm dengan berat 14,7 kg. Pada spesimen ini terjadi kegagalan sama seperti sebelumnya yaitu *core failure, core buckling,* sedikit delaminasi, dan patahnya serat. Defleksi yang terjadi cukup besar, karena memang kondisi jepit terlepas pada saat pengujian. Patahnya serat juga tidak hanya terjadi pada bagian bawah *face* atas namun juga pada bagian bawah *face* bawah. Patahnya serat pada *face* bawah hanya satu lapis serat bambu saja yang berada dibagian bawah. Hal ini terjadi karena beban tarik, akibat defleksi spesimen yang cukup besar saat *impact*, pada bagian paling bawah *face* bawah sudah melebihi *ultimate strength* serat bambunya.

Delaminasi antara *core* dan *face* hanya sedikit terjadi di satu sisi ujung spesimen. Delaminasi tersebut kemungkinan karena *face* mengenai mur penumpu spesimen saat spesimen mengalami defleksi. Sedangkan di area kontak *impact*, sama seperti spesimen lainnya, tidak terjadi delaminasi antara *core* dan *face*. Delaminasi juga terjadi antar lapisan pada *face* bawah setelah patahnya serat. Delaminasi antar lapisan terjadi karena yang tidak mampu menahan tegangan tarik hanya satu lapis *face* bawah saja.

Gambar 3.6 Spesimen B2 setelah *impact*

g. Spesimen B3 dan B4

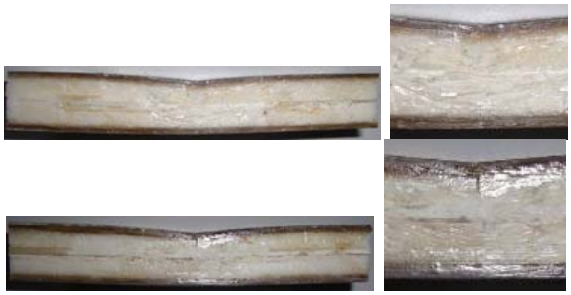
Spesimen B3 dan B4 memiliki kondisi uji yang sama, berat beban 14,7 kg, tinggi jatuh beban 30 cm, dan keduanya terlepas dari jepit setelah tumbukan. Sama seperti sebelumnya, modus kegagalan yang terjadi adalah *core failure*, *local indentation*, dan sedikit patahnya serat bagian bawah *face* atas. Panjang *core failure* pada spesimen B3 lebih pendek dari spesimen B4 yang *core failure*-nya setengah dari tebal *core*. Tapi sebaliknya *local indentation* pada area tumbukan membuat defleksi *face* atas dari spesimen B3 lebih besar daripada spesimen B4. Jika dilihat dari berat *polyurethane foam* kedua spesimen, spesimen B4 lebih ringan 3 gr daripada spesimen B3. Perbedaan berat *foam* berarti perbedaan kerapatan. *Core* spesimen B4 yang lebih tinggi bisa menjadi penyebab defleksi spesimen yang lebih kecil dibanding spesimen B3.



Gambar 3.7 Spesimen B3 dab B4 setelah *impact*

h. Spesimen C1 dan C2

Berbeda dengan spesimen-spesimen sebelumnya, spesimen C1 dan C2 memiliki lebar 20 mm besar, volume resin lebih banyak, dan *density core* lebih besar. Dengan pemberian beban yang sama yakni 14,7 kg dari ketinggian 30 cm, spesimen C1 dan C2 hanya mengalami *core failure* dan *local indentation* yang menyebabkan defleksi kecil. *Core failure* pada spesimen C1 hampir tidak terlihat. Defleksi pada *face* spesimen C2 sama dengan specimen C1, hanya saja *core failure* yang terjadi cukup besar hingga setengah *core*.



Gambar 3.8 Spesimen C1 dan C2 setelah *impact*

Defleksi yang cukup kecil pada kedua spesimen ini dapat disebabkan karena dimensi spesimen yang berbeda dengan spesimen sebelumnya. Dimensi, dalam hal ini lebar spesimen, yang lebih besar berarti area kontak lebih besar. Dengan gaya yang sama bekerja dan luas kontak lebih besar, tekanan yang didapatkan spesimen akan lebih kecil sehingga menyebabkan defleksi lebih kecil.

3.1 Kecenderungan Kegagalan

Dilihat dari spesimen uji, kegagalan yang terjadi pada struktur *sandwich* serat bambu dengan *core polyurethane foam* yang diberi beban *impact* memiliki kecenderungan dan pola yang sama. Jika respon *impact* melewati daerah elastis struktur, akan diawali dengan terjadinya *local indentation* pada daerah tumbukan. Selanjutnya terjadi *matrix cracking* pada bagian bawah *face* atas lurus arah *impact*. *Matrix cracking* yang terjadi menekan *core* sehingga menyebabkan *core cracking* atau *core failure* yang arah retaknya lurus searah dengan arah *impact*. Lebih dari itu terjadi sedikit patah serat pada lapisan bawah *face* atas dan *core failure* juga bertambah. Patahnya serat pada bagian bawah *face* atas seperti *clean failure*. Jika defleksi makin besar, akan terjadi patah serat pada lapisan bawah *face* bawah. Jika patah serat pada *face* bawah tidak semua lapisan, terjadi delaminasi antar lapisan *face*-nya. Lebih besar lagi akan terjadi *core failure* lebih besar, patah serat pada *face* makin besar hingga terjadinya *catastrophic failure*. Karena kegagalan yang terjadi pertama adalah m*atrix cracking* pada bagian bawah *face* atas, maka untuk menghindari kegagalan yang sama dapat dicoba penggunaan *adhesive* yang lebih kuat lagi.

Jika dibandingkan dengan struktur *sandwich beam fiber based* lain [14], *impact* menggunakan silinder pada struktur *sandwich* dengan *face* AS4-3501-6 *graphite/epoxy sheets laminate* dan *core Rohacell foam*, kegagalan yang terjadi hampir sama. Pada struktur *sandwich* tersebut, kegagalan yang terjadi adalah *matrix cracking*, delaminasi pada *laminated face*, dan *local crushing* pada *core*. Bentuk *core crushing* yang terjadi tidak terlalu dijelaskan. Pada struktur ini delaminasi antar lapisan terjadi pada *face* atas, sedangkan pada pengujian yang dilakukan, delaminasi pada *face* atas tidak terlalu terlihat.

a. Delaminasi

Delaminasi antar lapisan pada *face* dari hasil pengujian, paling terlihat hanya pada *face* bawah spesimen B2. Seharusnya pada *face* atas yang mengalami patah serat terlihat delaminasi antara lapisan yang patah dan belum patah walau sangat sedikit, tetapi tidak terlihat karena pengamatan hanya dilakukan dengan mata telanjang. Lagipula pada *face* atas, kecenderungan yang terjadi adalah patahnya serat seperti *clean failure* karena *face* atas dekat dengan kontak *impact*. Sedangkan untuk lapisan bawah yang mengalami patah serat lebih karena defleksi *beam*, jika patah serat hanya beberapa lapisan saja maka akan terjadi delaminasi yang jelas terlihat antara lapisan yang patah dan belum patah karena ketika defleksi maksimum akibat *impact* terjadi maka tegangan tarik yang terjadi akan membuat lapisan yang patah terakhir terpisah atau delaminasi dengan lapisan atasnya yang belum patah. Delaminasi antar lapisan *face* akan selalu terjadi, walau kecil, ketika terjadi patah satu atau beberapa serat (tidak semua).

Untuk delaminasi antara *core* dan *face* pada area kontak *impact*, tidak terjadi. Ini kemungkinan disebabkan karena patahnya serat pada *face* terjadi lebih dahulu daripada besar tegangan geser yang menyebabkan delaminasi antara *face* dan *core*. Berbeda dengan struktur *sandwich* dengan *face* alumunium [12], karena *face* tidak patah dan yang terjadi adalah defleksi besar sehingga besar tegangan geser yang menyebabkan delaminasi antara *face* dan *core* terjadi terlebih dahulu daripada patahnya *face*. Alasan lain tidak terdapat delaminasi antara *face* dan *core* adalah bagusnya rekatan antaran *face* dan *core* karena manufaktur spesimen yang baik. Lapisan *wax* pada *foam* yang menempel setelah mencetak *foam*, dihilangkan sebelum memberikan *adhesive* saat membuat struktur *sandwich* sehingga membuat rekatan antara *face* dan *core* lebih baik. Jika *foam* yang digunakan adalah *foam* jadi hasil beli, pastikan tidak terdapat *wax* atau material lain di permukaan *foam*.

b. Pengaruh *Foam Density*

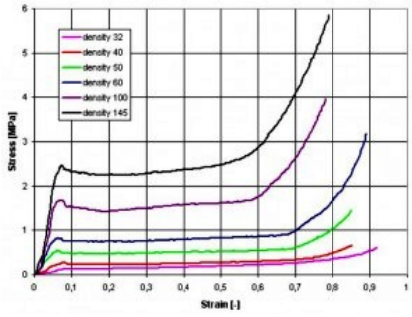
Tabel 3.1 Data *polyurethane core density* spesimen

Spesimen	***Massa polyurethane foam (gr)***	***Volume core (m^3)***	***Polyurethane core density (kg/m^3)***
A1	8	0.000154	52.06
A2	8	0.000154	52.06
A3	8	0.000154	52.06
A4	8	0.000154	52.06
B1	22	0.000331	66.47
B2	17	0.000331	51.37
B3	17	0.000331	51.37
B4	20	0.000331	60.43

Terjadinya perbedaan tingkat kerusakan dan defleksi pada spesimen sama dengan pembebanan yang sama, salah satunya kemungkinan disebabkan perbedaan massa jenis *core*. Pada spesimen uji, yang memberikan *core density* berbeda dengan konfigurasi yang sama adalah spesimen B. Struktur *sandwich* dengan massa jenis *core* yang lebih tinggi, akan mampu menahan beban yang lebih tinggi juga dan memberikan hasil lebih baik. Studi mengenai *impact* pada *sandwich panel* juga

mendukung pernyataan ini [5]. Pada studi tersebut ditemukan bahwa *panel* dengan *density core* lebih besar memberikan performa lebih baik dibandingkan dengan *panel* sama dengan *density core* lebih kecil, sedangkan *core* padat seperti balsa dan Nomex tidak semurah *foam*.

Hal ini juga sejalan dengan kurva *compressive stress-strain polyurethane foam* pada literatur [13] (gambar 3.9) yang didapatkan bahwa dengan meningkatnya massa jenis *polyurethane foam*, maka tekanan yang dapat diterima oleh *foam* lebih besar. Misalnya spesimen B1 yang tidak mengalami kegagalan, selain memang kecepatan tumbukannya paling kecil juga karena spesimen B1 memiliki *core density* paling besar. Juga spesimen B4 yang memiliki *core density* lebih besar daripada B3, memberikan defleksi dan kerusakan yang lebih kecil. Untuk mendapatkan *polyurethane doam* dengan *density* berbeda, dapat dilakukan variasi perbandingan percampuran *polyurethane A* dan *polyurethane B*. Sebagai saran bisa dilakukan percobaan untuk mengunakan perbandingan 6,5 : 5 [12].



Gambar 3.9 Kurva *compressive stress-strain polyurethane foam*

3.2 Energi Tumbukan Spesimen

Karena kecepatan spesimen sesaat sebelum tumbukan bisa didapatkan dari percobaan, seperti pada data pengujian, dapat dicari energi tumbukan pada struktur *sandwich beam* dengan mencari energi kinetiknya. Rumus energi kinetik adalah :

$$EK = \tfrac{1}{2}\, m\, v^2 \qquad (3.1)$$

m = massa beban
v = kecepatan tumbukan

Berikut data energi kinetik tiap spesimen :

Tabel 3.2 Energi kinetik dan kerusakan hasil uji

Spesimen	***Energi (J)***	***Kerusakan***
A2	20,59	*core buckling*, *matrix cracking*, dan patahnya serat pada *face*
A3	14,68	*Local indentation*
A4	28,52	*Core failure*, *core buckling*, patah serat pada lapisan bawah *face* atas
B1	7,64	-
B2	53,18	*Core failure*, *core buckling*,sedikit delaminasi, patah serat pada lapisan bawah *face* atas dan bawah
B3	28,52	*Local indentation*, *core failure*, sedikit patah serat pada lapisan bawah *face* atas
B4	28,52	*Local indentation*, *core failure*, sedikit patah serat pada lapisan bawah *face* atas
C1	28,52	*Local indentation*, *core failure*
C2	28,52	*Local indentation*, *core failure*

Besar energi *impact* terbesar dari pengujian *impact* yang dilakukan setara dengan jika kita terkena lemparan batu seberat 1 kg dengan kecepatan 10,3 m/s^2 atau 37,1 km/jam. Dalam aplikasinya, struktur *sandwich* yang dibuat berupa *panel* tentunya akan mampu menyerap energi *impact* yang lebih besar lagi dengan alasan-alasan seperti yang dijelaskan.

Perbedaan energi yang terjadi dapat dibandingkan dengan kerusakan yang terjadi pada spesimen. Seperti pada spesimen B1 dan B3 yang memiliki perbedaan energi tumbukan sebesar 21 Joule. Hal tersebut jika dilihat dari tingkat kerusakannya menjadi beralasan, spesimen B1 yang tidak mengalami defleksi setelah tumbukan menjadi wajar memiliki energi tumbukan yang lebih kecil dibandingkan spesimen B3. Begitu juga dengan spesimen B2 yang memiliki energi hampir dua kali lipat dibandingkan spesimen B3, walaupun spesimen B2 lebih besar energinya namun defleksinya juga lebih besar baik di *face* atas dan *face* bawah. Juga jika dilihat lagi dari penjelasan sebelumnya, kegagalan yang terjadi pada spesimen B2 jauh lebih fatal hingga terjadinya patah serat pada bagian bawah *face* bawah. Untuk lebih jelasnya berikut diberikan tabel antara energi tumbukan dan defleksi kesemua spesimen.

Tabel 3.3 Massa total spesimen dan defleksi yang terjadi

Spesimen	*Massa total spesimen (gr)*	*Energi Tumbukan (J)*	*Defleksi maks face atas (mm)*	*Defleksi maks face bawah (mm)*
A2	84	20,59	19	5
A3	82	14,68	5	2
A4	84	28,52	20	15
B1	90	7,64	0	0
B2	86	53,18	20	14
B3	76	28,52	18	8
B4	76	28,52	8	2
C1	120	28,52	5	2
C2	124	28,52	5	2

Untuk juga melihat hubungan antara energi yang diserap dibandingkan dengan geometri, berdasarkan literatur [5] didapatkan bahwa energi absorpsi *sandwich beam* adalah

$$EK = \frac{S^2 b\, t\, L}{4\, E} \qquad (3.2)$$

S = *skin stress* b = lebar *beam*
t = tebal *skin* L = panjang *span*
E = modulus elastisitas *skin*

Dari persamaan di atas, semakin panjang, lebar, dan tebal spesimennya maka energi absorpsi juga semakin besar. Secara umum juga dapat diketahui bahwa semakin besar area kontak (lebih lebar atau panjang) maka akan semakin luas daerah yang dapat menyerap energi *impact* sehingga energi *impact* yang diserap spesimen lebih besar. Pada tugas akhir ini spesimen yang dibuat hanya terdapat variasi lebar saja (lebar specimen C 20 mm lebih besar). Terlihat bahwa untuk specimen C, jika dibandingkan dengan beberapa spesimen B, walau energinya sama atau mendekati tetapi memiliki *local indentation* dan defleksi paling kecil. Artinya untuk spesimen C akan mampu menyerap energi lebih besar.

Dari persamaan juga terlihat bahwa *skin stress* atau tegangan pada *face* berbanding lurus kuadratik terhadap energi absorpsi. Jika dilihat dari hasil pengujian, spesimen B2 yang energinya paling besar mengalami patah serat pada lapisan bawah *face* bawah dan defleksi paling besar pada *face* bawah juga besar. Artinya *face* bawah spesimen B2 mengalami tegangan tarik paling besar dibanding spesimen lainnya, dan hal ini sesuai dengan persamaan di atas.

3.3 Perbandingan Dengan Beban Statik

Perbandingan yang akan dilakukan antara beban statik *bending* dan beban dinamik *impact* hanyalah dari segi geometri saja. Untuk *bending*, hubungan tegangan lentur dan geometri struktur *sandwich* adalah [4]

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \qquad (3.3)$$

P = beban yang diberikan c = tebal *core*
L = panjang spesimen b = lebar sandwich
t = tebal *skin* d = tebal *sandwich*

Untuk tegangan lentur, semakin kecil nilai tegangan lentur pada struktur maka akan semakin baik karena kecenderungan struktur untuk bending akan semakin kecil. Jika dilihat dari persamaan, terlihat bahwa tegangan lentur berbanding lurus dengan panjang spesimen dan berbanding terbalik dengan tebal *face* dan lebar *sandwich*, sehingga semakin besar lebar dan tebal spesimen maka tegangan lentur semakin kecil. Hal tersebut berbeda dengan energi absorpsi *impact* yang berbanding lurus dengan tebal *face* dan lebar *sandwich*, sehingga semakin besar lebar dan tebal spesimen maka energi absorbsi semakin besar.

Maka secara geometri struktur, untuk mendapatkan struktur *sandwich* dengan kualitas baik dengan nilai tegangan lentur rendah dan nilai energi absorpsi tinggi, dapat dilakukan dengan penambahan tebal *core,* tebal *skin*, dan lebar spesimen. Penambahan panjang spesimen juga dapat dilakukan, tetapi jika ingin mendapatkan tegangan lentur rendah maka penambahan panjang harus sejalan dengan penambahan lebar.

4. Kesimpulan

1. Manufaktur yang baik membuat hampir tidak ada delaminasi antara *core* dan *face*. Pastikan lapisan *wax* pada *foam* dihilangkan untuk mendapatkan hasil tersebut.
2. Modus kegagalan yang terjadi pada struktur *sandwich* serat bambu akibat *impact* adalah *local indentation, matrix cracking, core failure*, patah serat pada *face*, delaminasi antar lapisan *face*, dan delaminasi *core* dengan *face*. Kegagalan memiliki pola yang sama dengan urutan kegagalan sama dengan urutan penulisan kegagalan, dengan patahnya serat dimulai dari lapisan bawah *face* atas kemudian lapisan bawah *face* bawah hingga akhirnya patah keseluruhan *face* bawah.
3. *Core cracking* atau *core failure* yang terjadi lurus searah arah tumbukan.

4. Semakin besar *density polyurethane foam*, semakin besar juga energi absorpsi struktur *sandwich*-nya.
5. Makin besar energi tumbukan, makin besar defleksi yang terjadi. Nilai defleksi yang diambil adalah defleksi permanen akibat deformasi plastis setelah *impact*.
6. Untuk mendapatkan struktur *sandwich* yang bagus dengan nilai energi absorbsi tinggi dan nilai tegangan lenturnya rendah dapat dilakukan dengan melakukan penambahan panjang spesimen, lebar spesimen, tebal *core*, dan tebal *skin*.

Penghargaan

Laboratorium komposit Departemen Aeronotika dan Astronotika, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, serta kelompok komposit bambu terimakasih atas dukungannya.

Referensi

[1] Abrate, Serge. 1998. *Impact On Composite Structures*. Cambridge University Press, UK.
[2] Baker, Alan., Stuart Dutton, Donald Kelly. 2004. *Composite Materials for Aircraft Structures*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
[3] Brouwer, W. D. (Rik). *Natural Fibre Composites in Structural Components: Alternative Applications for Sisal ?*. The Netherlands. http://www.fao.org/docrep/004/Y1873E/y1873e0a.htm
[4] Eldo, Danny. 2010. Analisis Kekuatan Lentur Struktur *Sandwich* Komposit Serat Bambu Dengan *Core Polyurethane* Melalui Uji *Three Point* Bending Dan Metode Elemen Hingga. Tugas Akhir Program Studi Aeronotika dan Astronotika ITB.
[5] Eric Green Associates. *Marine Composite, second edition.* USA. http://www.marinecomposites.com
[6] Erissonia, Arfie Armelia. 2010. Analisis Kekuatan Tarik Komposit Serat Bambu Laminat Helai Dan *Wooven* Yang Dibuat Dengan Metode Manufaktur *Hand Lay Up*. Tugas Akhir Program Studi Aeronotika dan Astronotika ITB.
[7] Gay, Daniel. 2003. *Composite Material Design and Applications*. CRC Press, USA.
[8] Hadi, Bambang Kismono. 2000. Mekanika Struktur Komposit (Catatan Kuliah). Penerbit ITB, Bandung.
[9] Jones, Robert M. *Mechanic of Structure Materials*. 1975. Scripta Book Company, Washington, D.C.
[10] Mazumdar, Sanjaya K. 2002. *Composite Manufacturing*. CRC Press, USA.
[11] Riedel, Ulrich. *Applications of Natural Fiber Composites for Constructive Parts in Aerospace, Automobiles, and Other Area*. Institutf'r Struktur mechanik, Deutsches Zentrumf'r Luft-und Raumfahrt, German.
[12] Simanjuntak, Bungaran. 2006. Beban Tumbukan Kecepatan Rendah Pada Batang *Sandwich* Dengan Inti *Polyurethane*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Penerbangan ITB.
[13] Vladimír, Goga. *Measurement of the Energy Absorption Capability of Polyurethane Foam*. University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Ilkovičova, Bratislava. http://www.posterus.sk/
[14] Wu, C.L. & C.T. Sun. 1996. Low *Velocity Impact Damage on Composite Sandwich Beams*. Elsevier Science Ltd, Great Britain.