

Terbit online pada laman web jurnal : <http://metal.ft.unand.ac.id>

METAL: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal

| ISSN (Print) 2598-1137 | ISSN (Online) 2597-4483 |



Artikel Penelitian

Kaji Eksperimental Sifat Mekanik *Honeycomb Sandwich* Komposit Serat Karbon dengan Uji Bending

Marsono*, Nuha Desi Anggraeni, Fajar Ahmad Faisal

Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung, Jl. PHH. Mustopa No. 23, Bandung 40124, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 16 Juni 2021

Revisi Akhir: 8 Oktober 2021

Diterbitkan Online: 21 Oktober 2021

KATA KUNCI

Honeycomb sandwich

Komposit serat karbon

Kekuatan lentur

Kekakuan

KORESPONDENSI

E-mail: marsono@itenas.ac.id

A B S T R A C T

A higher energy efficiency in a high efficient energy car can be reached by using a honeycomb sandwich structure that is made from fiber-carbon composite which is lighter in weight. With a lighter weight, a higher power-to-weight ratio can be reached. In this research, honeycomb sandwich panels are made from fiber-carbon composite and tested to determine their flexural strength and stiffness. These honeycomb sandwich panels are made with varying thickness of core cell wall, which are made by 1 layer and 2 layers of fiber-carbon sheet. Matrix that is used is epoxy resin that is prepared in two methods, with and without heating. The bending test result shows that the highest flexural strength that can be reached is 5.193 kgf/mm² which is reached by the specimen that has 2 layers' fiber carbon with heating epoxy resin. Flexural stiffness is also reached by the same specimen, of 67.49 kgf/mm.

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan material dengan struktur berlapis (*sandwich structure*) semakin meningkat karena material dengan struktur berlapis ini memiliki kelebihan dalam hal perbandingan kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi. *Sandwich structure* ini juga memiliki kekakuan geser dan bending (*shear/bending stiffness*) yang tinggi persatuan beratnya. Hal ini membuat material dengan struktur berlapis banyak digunakan pada banyak sektor seperti teknologi ruang angkasa, penerbangan dan automotif [1].

Struktur berlapis dengan inti berbentuk sarang lebah (*honeycomb sandwich structure*) memiliki potensi yang besar untuk menggantikan panel body mobil

yang dibuat dari bahan pelat logam karena memiliki performa vibrasi dan statik yang mirip, tapi dengan bobot yang lebih ringan. *Honeycomb sandwich structure* juga memiliki kemampuan untuk meningkatkan kekakuan lentur dan puntir (*bending and torsional stiffness*) dari sebuah panel body mobil. Dengan bobot yang lebih ringan, *honeycomb sandwich structure* tentu akan memiliki rasio kekakuan struktur terhadap berat (*stiffness-to-weight ratio*) yang lebih tinggi [2].

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa *honeycomb sandwich structure* telah terbukti memiliki kemampuan untuk meredam benturan. Jika dibandingkan dengan *impact attenuator* (peredam benturan) lain, struktur ini memiliki karakteristik *anti-shock* yang lebih kuat [3]. Pada

kendaraan mobil, panel *sandwich structure* banyak digunakan untuk dinding badan mobil, pilar dan tulang atap sebagai penyerap energi dengan tujuan untuk melindungi penumpang ketika terjadi tabrakan [4].

Pemanfaatan material *Fibre Reinforced Polymer* (FRP) dalam pembuatan *sandwich structure* akan membuat performanya menjadi semakin meningkat. Dengan bobot yang lebih ringan, maka *specific flexural rigidity* dari *sandwich structure* akan menjadi lebih tinggi. Material FRP juga dapat dibentuk dengan lebih mudah untuk menghasilkan geometrik yang kompleks serta memiliki fleksibilitas yang baik dalam perakitan [5]. Dengan demikian, penerapan *honeycomb sandwich structure* dengan bahan *Fibre Reinforced Polymer* pada sasis mobil hemat energi jenis *monocoque* akan menjadi salah satu upaya yang baik untuk mencapai *power to weight ratio* yang lebih tinggi.

Penelitian ini adalah penelitian lanjutan dengan fokus pada pembuatan dan pengujian struktur berlapis dengan inti berbentuk sarang lebah (*honeycomb sandwich structure*). Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pembuatan dan pengujian panel *honeycomb sandwich* dengan ukuran *cell-pitch* 40 mm dan *cell-height* 30 mm dari bahan komposit serat kaca (*fiberglass*) untuk mengetahui karakteristik mekaniknya oleh Marsono et al [6]. Panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat kaca ini juga telah digunakan oleh Ramadhan [7] untuk membuat *chassis monocoque* mobil hemat energi, namun masih memiliki kekurangan, yaitu kekakuan yang belum cukup tinggi serta bobotnya yang masih terlalu berat.

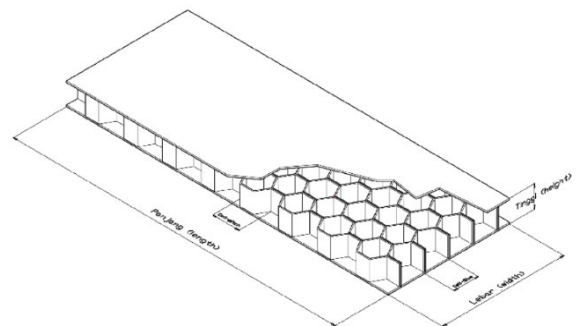
Dalam penelitian ini dibuat spesimen panel *honeycomb sandwich* dengan ukuran *cell-pitch* dan *cell-height* yang sama dengan penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Marsono et al [6], tapi menggunakan material yang berbeda, yaitu dengan material komposit serat karbon. Penggunaan material komposit serat karbon diharapkan dapat memberikan performa mekanik yang lebih baik. Spesimen panel *honeycomb sandwich* dibuat dengan 2 variasi ketebalan dinding sel inti *honeycomb* dan 2 variasi cara persiapan resin (matriks). Spesimen panel *honeycomb sandwich* diuji dengan metoda uji bending untuk mengetahui

kekakuan lentur (*flexural strength*) serta kekakuan lentur (*flexural stiffness*).

2. METODOLOGI

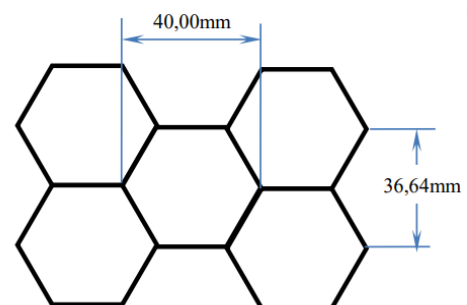
2.1. Rancangan *honeycomb sandwich structure*

Konstruksi panel *sandwich structure* tersusun dari material inti (*core*) yang dilapisi di kedua permukaannya dengan lapisan kulit tipis (*skin*), sebagaimana terlihat pada Gambar 1. *Sandwich structure* telah banyak dikembangkan dan diaplikasikan dengan berbagai bentuk inti, namun bentuk inti yang paling banyak digunakan adalah bentuk heksagonal seperti bentuk sarang lebah.



Gambar 1. Panel Struktur *Honeycomb Sandwich* [6]

Panel struktur *honeycomb sandwich* yang dibuat dan diuji pada penelitian ini memiliki sel inti dengan detail dimensi *cell-pitch* 40mm dan *cell-size* 36,64 mm seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Dimensi *cell-pitch* dan *cell-size* [6]

Spesimen panel *honeycomb sandwich* memiliki ukuran panjang 500 mm, lebar \pm 200 mm. *Cell-height* inti *honeycomb sandwich* adalah 30mm dan jika ditambah dengan tebal kulit (*skin*), maka ketebalan spesimen panel adalah 34 mm.

2.2. Pembuatan Spesimen Panel

Inti *honeycomb sandwich* disusun dari lembaran-lembaran bergelombang (*corrugated sheet*) hingga membentuk sel segi enam, seperti yang dilakukan pada penelitian sebelumnya oleh Marsono et al [6]. Lembaran bergelombang yang telah tersusun menjadi inti *honeycomb* selanjutnya ditutup bagian atas dan bawahnya dengan lapisan kulit.

Seluruh bagian dari panel struktur *honeycomb sandwich* dibuat dari bahan komposit serat karbon, termasuk bagian inti *honeycomb* serta kulitnya. Serat karbon yang digunakan untuk komposit ini adalah jenis WR240-3K dan sebagai matriksnya digunakan resin epoxy EPR 174 dengan katalis Epoxy Hardener Versamide KCA 2340.

Bagian inti dari *sandwich structure* ini dibuat dengan dua variasi ketebalan dinding sel inti yang didapatkan dari penggunaan jumlah lapisan serat karbon yang berbeda untuk pembuatan lembaran bergelombang. Jumlah lapisan serat karbon yang digunakan untuk mendapatkan variasi ketebalan lembaran bergelombang adalah 1 lapis dan 2 lapis. Variasi ketebalan dinding sel inti *honeycomb sandwich* dibuat untuk mengetahui pengaruh perbedaan ketebalan dinding sel inti *honeycomb sandwich* terhadap kekuatan lentur dan kekakuan. Kulit atas dan kulit bawah dari semua spesimen panel dibuat dengan ketebalan yang sama, yaitu dengan menggunakan 1 lapis serat karbon. Ketebalan kulit dibuat sama agar kekuatan lentur dan kekakuan dari setiap spesimen panel struktur *honeycomb sandwich* dapat dibandingkan secara imbang (proporsional) dan perbedaan yang terjadi betul-betul hanya berasal dari pengaruh ketebalan dinding sel inti *honeycomb*.

Proses persiapan awal resin epoxy sebagai matriks pengikat, yaitu pencampuran resin epoxy dengan katalis, dilakukan sebelum resin ini diterapkan pada lembaran serat karbon. Proses persiapan resin epoxy dilakukan dengan dua cara, yaitu persiapan resin epoxy tanpa pemanasan dan persiapan resin epoxy dengan pemanasan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perbedaan perlakuan awal pada resin epoxy terhadap kualitas dan performa

resin epoxy sebagai pengikat (*bonding agent*) pada komposit serat karbon. Pemanasan dilakukan pada saat pencampuran resin epoxy dan katalis dengan menggunakan *heat gun* pada temperatur 80°C

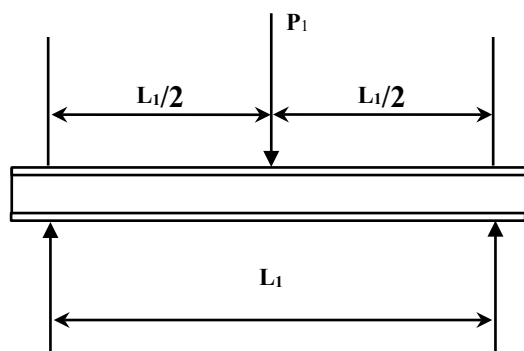
Spesimen panel yang dibuat berjumlah 4 buah, dengan 2 variasi ketebalan dinding sel inti dan 2 variasi proses perlakuan awal resin epoxy. Spesimen panel struktur *honeycomb sandwich* yang telah jadi terlihat pada Gambar 3.



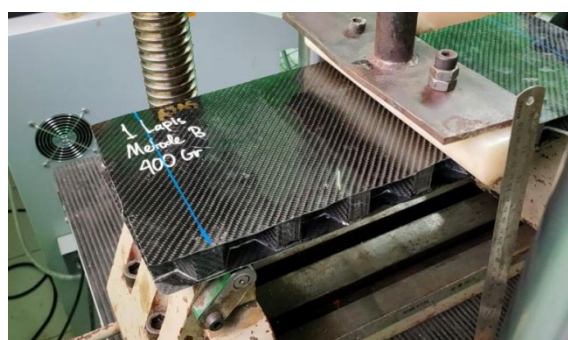
Gambar 3. Specimen panel struktur *Honeycomb Sandwich* berbahan komposit serat karbon

2.3. Pengujian Spesimen Panel *honeycomb sandwich*

Pengujian specimen panel *honeycomb sandwich* dilakukan dengan metoda uji bending dengan memperhatikan standar ASTM C393-00 [10], yaitu dengan pembebanan terpusat di satu titik, tepat di tengah-tengah jarak tumpuan, seperti yang terlihat pada Gambar 4. Jarak antara tumpuan (L_1) adalah 420 mm. Pembebanan diberikan pada jarak ($L_1/2$) sebesar 210mm dari kedua tumpuan. Uji bending dilakukan di atas mesin Gotech Testing Machine, Model GT-7001-LS10, seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Pengujian dengan pembebanan satu titik [10]



Gambar 5. Pengujian specimen Panel struktur *Honeycomb Sandwich*

Dari pengujian bending ini akan diperoleh karakteristik mekanik dari panel tersebut, yaitu kekuatan lentur (*flexural strength*) dan kekakuan lentur (*flexural stiffness*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perbandingan berat serat dan berat resin

Perbandingan berat antara fraksi serat karbon dan fraksi resin diperlukan untuk mengetahui besar kontribusi sifat dari masing-masing fraksi dalam komposit terhadap sifat komposit yang dihasilkan. Untuk mendapatkan perbandingan berat dari masing-masing fraksi, dilakukan penimbangan serat karbon sebelum dibentuk menjadi panel struktur *honeycomb sandwich* serta berat akhir dari panel *honeycomb sandwich* yang telah jadi. Tabel 1 memperlihatkan perbandingan berat serat karbon

dan berat resin pada masing-masing spesimen panel *honeycomb sandwich* yang telah jadi.

Tabel 1 Perbandingan berat serat dan berat resin

Variasi Lapisan	Berat Serat (gr)	Berat Resin (gr)	Berat Panel (gr)	Perbandingan	
				Serat (%)	Resin (%)
Persiapan Resin tanpa pemanasan					
1	160	280	440	36	64
2	230	311	541	43	57
Persiapan Resin dengan pemanasan					
1	160	240	400	40	60
2	230	260	490	47	53

Data pada Tabel 1 menunjukkan adanya penurunan persentase penggunaan resin pada spesimen panel yang menggunakan lapisan serat lebih banyak. Penggunaan resin menjadi lebih efisien untuk aplikasi jumlah lapisan serat yang lebih banyak, dimana terdapat resin pengikat yang digunakan secara bersama oleh dua lapisan serat, yaitu pada bagian pertemuan permukaan lapisan serat.

Data pada Tabel 1 juga memperlihatkan bahwa panel spesimen yang dibuat dengan resin yang dipersiapkan dengan pemanasan membutuhkan resin yang lebih sedikit daripada panel spesimen yang dibuat dengan resin yang dipersiapkan tanpa pemanasan. Proses pemanasan pada saat persiapan membuat resin epoxy menjadi lebih encer sehingga resin lebih mudah terserap ke dalam serat karbon. Resin yang lebih encer juga membuatnya lebih mudah keluar dari serat karbon ketika mengalami tekanan dari cetakan pada saat pembuatan lembaran bergelombang.

Fluiditas resin yang lebih tinggi tentu akan sangat menguntungkan karena resin yang digunakan tidak akan berlebihan, cukup sebatas kebutuhan serat karbon untuk dapat terikat dengan baik dan sesuai dengan ketebalan serat karbon. Jika ada kelebihan, maka resin akan terperas keluar dari serat karbon akibat tekanan dari cetakan. Lebih jauh lagi, penggunaan resin yang tidak berlebihan akan menghasilkan panel struktur *honeycomb sandwich* yang lebih ringan.

Fluiditas resin yang lebih tinggi juga akan membuat gelembung-gelembung udara dapat keluar dari larutan resin dengan lebih mudah. Gelembung-gelembung udara sangat mungkin terjadi pada saat pencampuran (pengadukan) resin dan katalis. Resin akan terlihat lebih kusam jika terdapat gelembung-gelembung udara berukuran mikro yang terjebak di dalamnya, sebaliknya resin akan terlihat lebih mengkilap dan tembus pandang jika tidak terdapat gelembung-gelembung udara berukuran mikro yang terjebak di dalamnya.

Perbedaan kejernihan resin yang telah mengeras sebagai dampak dari perbedaan metoda yang digunakan pada tahap persiapan resin terlihat pada Gambar 6. Yang terlihat pada Gambar 6 adalah lembaran bergelombang inti *honeycomb sandwich* yang dibuat dengan cetakan.



Gambar 6. Perbedaan tampak luar lembaran bergelombang yang dibuat dengan dua metoda

3.2. Hasil Uji Bending

Uji bending yang diterapkan terhadap spesimen panel struktur *honeycomb sandwich* memberikan data seperti yang terlihat pada Tabel 2, yaitu berupa data beban maksimum yang mampu ditahan sampai spesimen patah dan defleksi bending maksimum yang terjadi pada saat beban maksimum terjadi.

Tabel 2. Hasil Uji Bending

No	Variasi Lapisan	Beban maksimum (kgf)	δ Defleksi maksimum (mm)
Persiapan resin tanpa pemanasan			
1	1	234,70	6,2

2	2	394,20	8,5
Persiapan resin dengan pemanasan			
1	1	324,40	8,8
2	2	565,60	8,6

3.3. Beban Maksimum

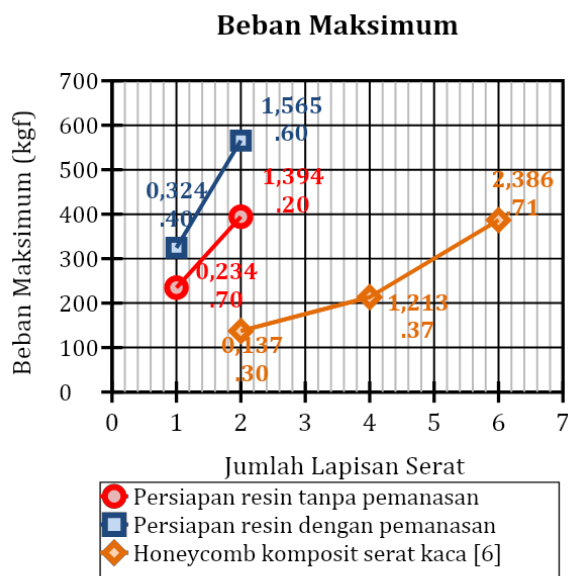
Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kemampuan menahan beban dari spesimen panel *honeycomb sandwich* meningkat sejalan dengan penambahan jumlah lapisan serat karbon. Hal ini sangat logis karena jumlah serat yang lebih banyak akan menambah ketebalan dinding sel inti, yang artinya luas penampang lintang dari struktur panel juga akan bertambah. Struktur panel dengan luas penampang lintang yang lebih besar tentu akan memiliki kemampuan untuk menahan beban yang lebih besar.

Proses pemanasan pada saat persiapan resin ternyata memberikan efek yang cukup signifikan terhadap peningkatan kemampuan menahan beban dari spesimen panel *honeycomb sandwich*. Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa untuk spesimen panel dengan dinding sel inti yang dibuat dengan 1 lapis serat karbon, kemampuan menahan beban maksimum dari spesimen panel yang dibuat dengan resin yang dipanaskan meningkat 1,4 kali lebih besar daripada spesimen panel yang dibuat dengan resin yang tidak dipanaskan. Pada spesimen panel dengan dinding sel inti yang dibuat dengan 2 lapis serat karbon juga terjadi peningkatan kemampuan menahan beban maksimum yang sama, yaitu 1,4 kali lebih besar,

Data peningkatan kemampuan peningkatan kemampuan menahan beban dari panel yang dibuat dengan resin yang dipanaskan pada saat persiapan mengindikasikan bahwa resin yang lebih encer membuat penyerapan resin ke dalam serat karbon menjadi lebih sempurna dan membuat ikatan yang lebih kuat. Di samping itu, resin yang lebih encer juga membuat gelembung-gelembung udara menjadi lebih mudah keluar dari resin sehingga gelembung yang dapat dianggap sebagai cacat ini dapat ditekan sekecil mungkin. Dengan cacat gelembung udara minimum, maka luas penampang lintang dari struktur panel *honeycomb sandwich*

akan lebih sempurna, sekaligus memaksimalkan kemampuannya dalam menahan beban.

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya oleh Marsono et al. [6], yaitu penelitian tentang *honeycomb sandwich* yang dibuat dari bahan komposit serat kaca dengan dimensi yang sama, maka *honeycomb sandwich* yang dibuat dari bahan komposit serat karbon memiliki kemampuan menahan beban yang lebih besar, seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Beban maksimum yang mampu ditahan *honeycomb sandwich* serat karbon dan serat kaca

Pada Gambar 7 terlihat bahwa pada penggunaan jumlah serat yang sama untuk dinding sel inti *honeycomb* (yaitu 2 lapis), panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dari bahan komposit serat karbon mampu menahan beban lebih besar daripada panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dari bahan komposit serat kaca.

Panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dari bahan komposit serat karbon mampu menahan beban 2,9 kali sampai 4,1 kali lebih besar daripada panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dari bahan komposit serat kaca. Hal ini sangat wajar karena serat karbon memang memiliki kekuatan di atas serat kaca.

Penelitian sebelumnya oleh Marsono et al. [6], memberikan data bahwa panel *honeycomb sandwich* yang dinding sel intinya dibuat dengan 2 lapis bahan serat kaca WR-200 memiliki memiliki berat 630 gram serta mampu menahan beban sebesar 137,30 kgf [6]. Sedangkan penelitian terakhir memberikan data bahwa panel dengan ketebalan dinding sel inti *honeycomb* yang dibuat dengan 2 lapis bahan serat karbon WR-240-3K dan resin tanpa pemanasan awal memiliki berat 541 gram serta mampu menahan beban sampai 394,20 kgf, sementara panel dengan ketebalan dinding sel inti *honeycomb* yang dibuat dengan 2 lapis serat karbon WR-240-3K dan resin dengan pemanasan awal memiliki berat 490 gram serta mampu menahan beban sampai 565,60kgf. Dari data tersebut dapat diperoleh rasio beban maksimum terhadap berat (*maksimum load-to-weight ratio*) untuk masing-masing specimen panel, yaitu 218 kgf/kgm untuk specimen panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat kaca, 729 kgf/kgm untuk specimen panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon dengan resin tanpa pemanasan dan 1.154 kgf/kgm untuk specimen panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon dengan resin yang dipanaskan. Jika dilihat dari rasio beban maksimum terhadap berat maka komposit serat karbon memang jauh lebih unggul dibandingkan komposit serat kaca.

3.4. Kekuatan Lentur

Data hasil uji bending yang terlihat pada Tabel 2 digunakan untuk menghitung kekuatan lentur (*flexural strength*). Kekuatan lentur dihitung dengan menggunakan persamaan tegangan yang terjadi pada *simple beam*, yaitu $\sigma = (M.C/I_{zz})$ [8]. Dengan menggunakan persamaan tersebut, didapatkan angka kekuatan lentur maksimum dari masing-masing spesimen panel seperti yang terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kekuatan lentur (*flexural strength*)

Variasi Lapisan	Beban maksimum (kgf)	I _{zz} (mm ⁴)	σ _{max} (kgf/mm ²)
Persiapan resin tanpa pemanasan			
1	234,70	202.560	2,068
2	394,20	217.313	4,626
Persiapan resin dengan pemanasan			
1	324,40	182.375	3,175
2	565,60	194.414	5,193

Pada Tabel 3 terlihat bahwa kekuatan lentur yang lebih besar dimiliki oleh spesimen panel *honeycomb sandwich* dengan dinding sel inti yang memiliki jumlah lapisan serat lebih banyak, baik specimen panel yang dibuat dengan menggunakan resin tanpa pemanasan maupun spesimen panel yang dibuat dengan menggunakan resin dengan pemanasan.

Pada spesimen panel yang dibuat dengan menggunakan resin tanpa pemanasan, kekuatan lentur dari spesimen panel dengan dinding sel inti yang dibuat dengan 2 lapis serat karbon memiliki angka 2,2 kali lebih besar daripada spesimen panel dengan dinding sel inti yang dibuat dengan 1 lapis serat karbon. Pada spesimen panel yang dibuat dengan menggunakan resin dengan pemanasan, kekuatan lentur dari spesimen panel dengan dinding sel inti yang dibuat dengan 2 lapis serat karbon memiliki angka 1,6 kali lebih besar daripada spesimen panel dengan dinding sel inti yang dibuat dengan 1 lapis serat karbon.

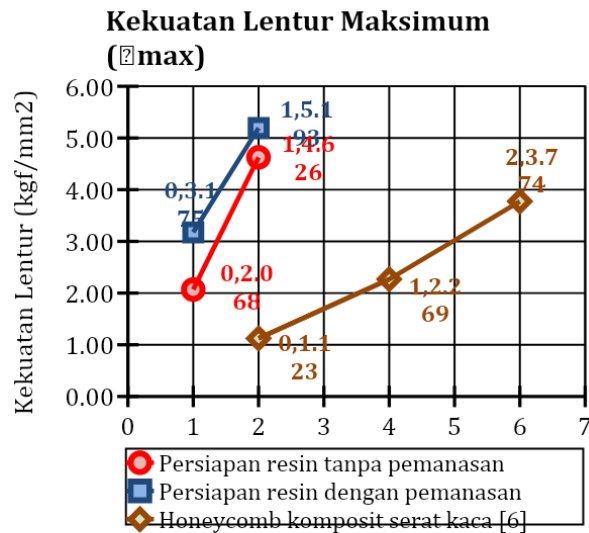
Penambahan ketebalan dinding sel inti *honeycomb* tentu saja berdampak langsung terhadap kenaikan kekuatan lentur sebagaimana juga berdampak kepada peningkatan kemampuannya menahan beban. Dinding sel inti yang lebih tebal akan membuat luas penampang lintang struktur tersebut menjadi lebih besar dan angka momen inersia penampangnya juga akan menjadi lebih besar.

Tambahan pemanasan pada saat persiapan resin memberikan peningkatan kekuatan lentur panel *honeycomb sandwich*. Pada spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti 1 lapis serat karbon terjadi

peningkatan kekuatan lentur sebesar 1,5 kali dan pada spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti 2 lapis serat karbon terjadi peningkatan kekuatan lentur sebesar 1,1 kali.

Pemanasan resin yang dilakukan sebelum diterapkan pada serat karbon memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kekuatan lentur dari dua sisi. Kontribusi dari sisi pertama adalah efisiensi penggunaan resin yang lebih baik membuat ketebalan dinding sel inti *honeycomb* menjadi lebih tipis sehingga didapatkan angka momen inersia penampang yang lebih kecil, dan tentu saja bobot spesimen panel *honeycomb sandwich* yang lebih ringan. Angka momen inersia penampang yang lebih kecil sebagai dampak dari penggunaan resin yang dipanaskan pada saat persiapan ditunjukkan pada Tabel 3. Kontribusi dari sisi kedua adalah proses terserapnya resin ke dalam serat karbon terjadi dengan lebih sempurna, hilangnya cacat akibat gelembung udara yang terjebak dalam resin serta terbentuknya ikatan yang lebih kuat di antara serat karbon. Kontribusi dari sisi kedua ini membuat spesimen panel *honeycomb* mampu menahan beban yang lebih besar. Perpaduan kontribusi dari dua sisi ini, yaitu angka momen inersia penampang yang kecil serta kemampuan menahan beban lebih besar, menjadikan panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dengan resin yang dipanaskan memiliki kekuatan lentur yang lebih tinggi.

Jika dibandingkan dengan data hasil penelitian tentang karakteristik mekanik dari *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat kaca yang telah dilakukan oleh Marsono et al, [6], maka *honeycomb sandwich* yang dibuat dengan bahan komposit serat karbon memiliki angka kekuatan lentur yang jauh lebih tinggi, seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Kekuatan Lentur honeycomb sandwich fiberglass dan fibercarbon

Grafik pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa pada penggunaan jumlah serat yang sama untuk dinding sel inti honeycomb, yaitu 2 lapis serat, spesimen panel honeycomb sandwich yang dibuat dari bahan komposit serat karbon memiliki angka kekuatan lentur 4,1 kali sampai 4,6 kali lebih besar daripada angka kekuatan lentur yang dimiliki oleh spesimen panel honeycomb sandwich yang dibuat dari bahan komposit serat kaca. Hal ini bisa terjadi karena bahan serat karbon memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi sehingga kekuatan lenturnya juga lebih tinggi.

Berdasarkan dari data penelitian yang dilakukan oleh Marsono et al [6] dan data dari penelitian terakhir ini dapat diketahui rasio kekuatan lentur terhadap berat (*flexural strength-to-weight ratio*) untuk masing-masing spesimen panel, yaitu $1,78(\text{kgf}/\text{mm}^2)/\text{kgm}$ untuk spesimen panel honeycomb sandwich berbahan komposit serat kaca, $8,55(\text{kgf}/\text{mm}^2)/\text{kgm}$ untuk spesimen panel honeycomb sandwich berbahan komposit serat karbon tanpa pemanasan resin dan $10,60(\text{kgf}/\text{mm}^2)/\text{kgm}$ untuk spesimen panel honeycomb sandwich berbahan komposit serat karbon dengan pemanasan resin. Jika dilihat dari rasio kekuatan lentur terhadap berat maka komposit serat karbon memang memiliki performa mekanik

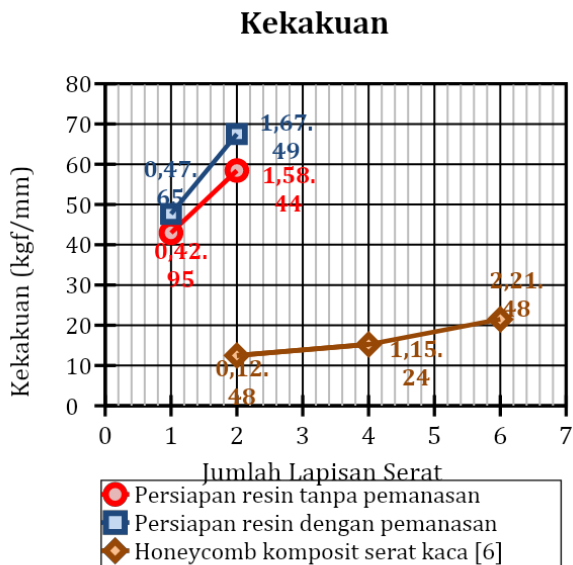
yang lebih unggul dibandingkan komposit serat kaca.

3.5. Kekakuan lentur

Kekakuan lentur (*bending stiffness*) spesimen panel honeycomb sandwich didapatkan dengan memanfaatkan data dari hasil uji bending. Angka kekakuan spesimen panel diperoleh dengan cara membagi beban bending dengan besar defleksi yang terjadi pada saat panel mendapat beban tersebut. Persamaan yang digunakan untuk menghitung kekakuan spesimen panel adalah persamaan defleksi untuk simple beam, yaitu $K = F/\delta$ [9]. Kekakuan spesimen panel honeycomb sandwich dihitung pada daerah elastis dari kurva grafik uji bending. Angka kekakuan dari masing-masing spesimen panel terhadap variasi jumlah lapisan serat pada dinding sel inti honeycomb terlihat pada Gambar 9.

Grafik pada Gambar 9 memperlihatkan bahwa angka kekakuan yang lebih besar dimiliki oleh spesimen panel honeycomb sandwich dengan dinding sel inti yang dibuat dengan jumlah lapisan serat karbon lebih banyak. Hal ini terjadi pada spesimen panel honeycomb sandwich yang dibuat dengan resin tanpa pemanasan dan juga pada spesimen panel honeycomb sandwich yang dibuat dengan resin yang dipanaskan.

Pada spesimen panel yang dibuat dengan resin tanpa pemanasan, spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti yang dibuat dari 2 lapis serat karbon memiliki angka kekakuan 1,36 kali lebih besar daripada spesimen panel yang memiliki ketebalan dinding sel inti yang dibuat dari 1 lapis serat karbon. Pada spesimen panel yang dibuat dengan resin yang dipanaskan, spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti yang dibuat dari 2 lapis serat karbon memiliki angka kekakuan 1,41 kali lebih besar daripada spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti yang dibuat dari 1 lapis serat karbon.



Gambar 9. Kekakuan *honeycomb sandwich* komposit serat kaca dan komposit serat karbon

Hasil yang diperoleh dari Gambar 9 sangat logis karena penambahan jumlah serat akan menambah ketebalan dinding sel inti *honeycomb*, yang artinya besar momen inersia penampang dari struktur panel juga akan bertambah. Persamaan defleksi untuk struktur *simple beam*, yaitu $\delta = (FL^3)/(48EI)$ [9], memperlihatkan bahwa momen inersia penampang (I) berbanding terbalik terhadap defleksi (δ). Atau dengan kata lain, semakin besar angka momen inersia penampang dari suatu struktur, maka defleksi yang terjadi akan semakin kecil. Sementara pada persamaan yang lain diketahui juga bahwa defleksi suatu struktur berbanding terbalik dengan kekakuannya. Dengan demikian, maka besar kekakuan akan berbanding lurus dengan besar momen inersia penampang. Jadi sangat logis jika peningkatan momen inersia penampang akan diikuti dengan peningkatan kekakuan struktur.

Spesimen panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dengan metoda persiapan resin epoxy yang berbeda juga menunjukkan efek yang berbeda terhadap nilai kekakuan. Metoda persiapan resin epoxy yang dilakukan dengan pemanasan menghasilkan spesimen panel *honeycomb sandwich* dengan angka kekakuan yang lebih tinggi. Hal ini terlihat pada Gambar 9

Angka kekakuan yang lebih tinggi pada spesimen panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dengan resin yang dipanaskan sangat menarik untuk diteliti, karena secara fisik spesimen panel ini memiliki momen inersia penampang yang lebih kecil. Artinya angka kekakuan yang lebih tinggi pada spesimen panel yang dibuat dengan resin yang dipanaskan bukan merupakan efek dari momen inersia penampang yang lebih besar. Faktor yang paling potensial menjadi penyebab peningkatan angka kekakuan pada spesimen panel ini adalah modulus elastisitas (E) dari bahan komposit serat karbon.

Indikasi adanya peningkatan modulus elastisitas (E) pada bahan komposit serat karbon yang dibuat dengan resin yang dipanaskan terlihat pada data dalam tabel 1. Tabel 1 menunjukkan bahwa beban yang dapat ditahan oleh spesimen panel yang dibuat dengan resin yang dipanaskan lebih besar kira-kira 1,4 kali daripada spesimen panel yang dibuat dengan resin tanpa pemanasan, sementara defleksi yang terjadi pada panel-panel tersebut tidak terlalu jauh berbeda. Dari data beban maksimum dan defleksi yang terjadi pada setiap spesimen panel dapat diperkirakan bahwa grafik uji bending dari panel spesimen yang dibuat dengan resin yang dipanaskan memiliki kemiringan (*slope*) grafik di daerah proporsional (daerah elastis) yang lebih besar (lebih tegak). Artinya spesimen panel ini memiliki modulus elastisitas yang lebih besar.

Jika dibandingkan dengan panel *honeycomb sandwich* komposit serat kaca hasil penelitian Marsono et al [6], maka panel *honeycomb sandwich* komposit serat karbon memiliki angka kekakuan yang jauh lebih tinggi, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 9. Dan jika dibandingkan angka kekakuan spesifiknya (*stiffness-to-weight ratio*) maka performa mekanik dari panel *honeycomb sandwich* komposit serat karbon akan semakin jauh meninggalkan panel *honeycomb sandwich* serat kaca, karena panel *honeycomb sandwich* komposit serat karbon memiliki bobot yang lebih ringan. Angka kekakuan spesifik dari spesimen panel *honeycomb sandwich* yang dibuat dengan resin yang dipanaskan mencapai 137,74(kgf/mm)/kgm, spesimen panel *honeycomb sandwich* yang dibuat

dengan resin tanpa pemanasan mencapai 108,01(kgf/mm)/kgm, sedangkan spesimen panel *honeycomb sandwich* berbahan serat kaca memiliki angka kekakuan spesifik yang berada jauh di bawah angka kekakuan spesifik panel *honeycomb sandwich* berbahan serat karbon, yaitu 19,81 (kgf/mm)/kgm.

3.6. Modus Kegagalan Spesimen

Modus kegagalan yang terjadi pada spesimen panel *honeycomb sandwich* yang terlihat dalam penelitian ini adalah terlepasnya ikatan antara inti (*core*) dan kulit (*skin*). Disamping itu, terjadi juga pengerutan (*wrinkling*) pada permukaan atas specimen panel *honeycomb sandwich* dan *buckling* pada dinding sel inti (*core cell*). Modus kegagalan seperti ini sangat umum terjadi pada *honeycomb sandwich structure*. Terlepasnya ikatan antara inti dan kulit pada specimen *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon terlihat pada Gambar 10.



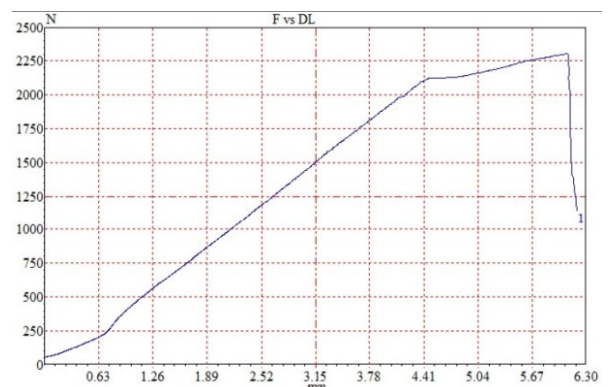
Gambar 10. Terlepasnya ikatan antara inti dan kulit dari spesimen panel *honeycomb sandwich* komposit serat karbon

Fenomena patah juga terjadi pada spesimen ini dengan bentuk patahan yang cenderung patah getas. Fenomena patah getas ini terjadi pada kulit bagian atas dari specimen panel, yaitu permukaan yang berhadapan langsung dengan bagian penekan dari mesin uji bending. Fenomena patah getas pada permukaan atas specimen panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon terlihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Fenomena patah getas pada kulit bagian atas dari spesimen panel *honeycomb sandwich* komposit serat karbon

Jika melihat bentuk patahan yang cenderung getas pada salah satu specimen panel *honeycomb sandwich* serat karbon (pada Gambar 10), maka bisa diduga bahwa komposit serat karbon memiliki sifat yang cenderung getas. Sifat yang cenderung getas juga terlihat pada grafik hasil uji bending, seperti yang terlihat pada Gambar 12. Gambar 12 adalah grafik uji bending dari salah satu specimen panel *honeycomb sandwich* komposit serat karbon, yaitu specimen dengan ketebalan dinding sel inti yang dibuat dengan 1 lapis serat karbon dengan resin tanpa pemanasan.



Gambar 12 Grafik hasil uji bending pada spesimen *honeycomb sandwich* dengan dinding sel inti yang dibuat dari 1 lapis serat karbon dengan resin tanpa pemanasan

Grafik pada Gambar 12 memperlihatkan adanya kenaikan beban yang cepat hingga mencapai beban maksimum dengan defleksi yang kecil, yaitu kenaikan beban sampai 234,70 kg (2300N) dengan defleksi 6,2 mm. Setelah mencapai beban maksimum, grafik langsung turun dengan cepat

hingga spesimen panel patah. Bentuk grafik seperti ini cukup menjadi bukti bahwa spesimen panel *honeycomb sandwich* berbahan serat karbon memiliki sifat yang cenderung getas. Grafik hasil uji bending dari specimen panel yang lain dalam penelitian ini juga menunjukkan pola grafik yang sama. Sifat ini sangat berbeda dengan sifat dari specimen panel *honeycomb sandwich* berbahan serat kaca yang memiliki sifat cenderung ulet [6].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Beban maksimum yang dapat ditahan oleh spesimen panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon adalah sebesar 565,60 kgf. Beban maksimum itu dapat ditahan oleh spesimen panel yang memiliki ketebalan dinding sel inti yang dibuat dari 2 lapis serat karbon dengan resin epoxy yang dipanaskan. Spesimen panel dengan kemampuan menahan beban yang berada di bawahnya adalah specimen panel dengan ketebalan dinding sel inti yang dibuat dari 2 lapis serat karbon dengan resin epoxy tanpa pemanasan, yaitu sebesar 394,20 kgf, spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti yang dibuat dari 1 lapis serat karbon dengan resin epoxy yang dipanaskan, yaitu sebesar 324,40 kgf, dan yang terendah adalah spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti *honeycomb* yang dibuat dari 1 lapis serat karbon dengan resin epoxy tanpa pemanasan, yaitu sebesar 234,70 kgf.

Kekuatan lentur tertinggi didapatkan pada specimen panel *honeycomb sandwich* yang memiliki ketebalan dinding sel inti dengan 2 lapis serat karbon dan resin epoxy yang dipanaskan, diikuti specimen panel dengan ketebalan dinding sel inti dengan 2 lapis serat karbon dan resin epoxy tanpa pemanasan, kemudian spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti dengan 1 lapis serat karbon dan resin epoxy yang dipanaskan, dan yang terendah adalah spesimen panel dengan ketebalan dinding sel inti dengan 1 lapis serat karbon dan resin epoxy tanpa pemanasan. Angka kekuatan lentur berturut-turut adalah 5,193 kgf/mm², 4,626 kgf/mm², 3,175 kgf/mm² dan 2,068 kgf/mm².

Angka kekakuan spesimen panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon juga menunjukkan urutan spesimen panel yang sama sebagaimana urutan spesimen panel pada angka beban maksimum dan angka kekuatan lentur. Adapun angka kekakuan panel berturut-turut adalah: 67.49 kgf/mm, 58.44 kgf/mm, 47.65 kgf/mm dan 42.95 kgf/mm

Proses pemanasan pada saat persiapan resin epoxy terbukti memberikan efek positif terhadap karakteristik mekanik panel *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon, yaitu peningkatan kemampuan menahan beban, peningkatan kekuatan lentur serta peningkatan kekakuan. Proses pemanasan membuat resin epoxy menjadi lebih encer sehingga penyerapannya ke dalam serat karbon dapat berlangsung dengan lebih sempurna. Hal ini berdampak kepada efisiensi penggunaan resin yang lebih baik sehingga membuat spesimen panel *honeycomb sandwich* menjadi lebih ringan. Pemanasan resin pada saat persiapan juga berdampak kepada peningkatan kekuatan ikatan di antara serat karbon.

Honeycomb sandwich berbahan komposit serat karbon memiliki sifat mekanik yang berada jauh di atas *Honeycomb sandwich* berbahan komposit serat kaca. Bahkan dengan bobot yang lebih ringan, *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat karbon memiliki rasio beban maksimum terhadap berat (*maximum load-to-weight ratio*), rasio kekuatan lentur terhadap berat serat (*flexural strength-to-weight ratio*) serta rasio kekakuan terhadap berat (*stiffness-to-weight ratio*) yang lebih tinggi daripada *honeycomb sandwich* berbahan komposit serat kaca.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Hussain, R. Khan, N. Abbas, "Experimental and Computational Studies on Honeycomb Sandwich Structure under Static and Fatigue Bending Loads", *Journal of King Saud University – Science*, Volume 31, Issue 2, pp 222-229, April 2019.
- [2] D. Hara, G.O. Özgen, "Investigation of weight reduction of automotive body structures with

- the use of sandwich materials”, *Transportation Research Procedia* 14, pp. 1013 – 1020, (2016)
- [3] Pankaj Prakash Anand “Honeycomb Safety Structure: Design, Analysis and Application in Safe Road Transport”, *International Journal of Science and Research (IJSR)* ISSN: 2319-7064, Volume 7 Issue 9, pp133-141, September 2018.
- [4] Shujuan Hou, Lili Ren, Duo Dong and Xu Han, “Crashworthiness Optimization Design of Honeycomb Sandwich Panel Based on Factor Screening”, *Journal of Sandwich Structure and Materials* 0 (00), pp 1-24, November 2012.
- [5] Davide Tumino, Tommaso Ingrassia, Vincenzo Nigrelli, Giuseppe Pitarresi, Vincenzo Urso Miano, “Mechanical behavior of a sandwich with corrugated GRP core: numerical modeling and experimental validation”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 30 pp 317-326, 2014; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.39
- [6] Marsono, Ali, Nico Luwis, “Karakteristik Mekanik Panel Honeycomb sandwich Berbahan Komposit Fiberglass dengan Dimensi Cell-Pitch 40mm dan Cell-Height 30mm”, *Jurnal Rekayasa Hijau* ISSN 2550-1070; No.2 Vol.3, pp.107-116, Juli 2019
- [7] Muhammad Wildan Rinaldi, “Proses Pembuatan *Chassis Monocoque* Mobil Hemat Energi Dengan Menggunakan Panel Struktur *Honeycomb Composite*”, Tugas Akhir S-1, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional, Bandung, 2019
- [8] Robert L Mott and Joseph A. Untener, “Stress due to Bending” in *Applied Strength of Materials*, 6th Edition, Boca Raton, Taylor & Francis, CRC Press, 2017, Chapter 7(5), pp 391-434
- [9] Robert L Mott and Joseph A. Untener, “Deflection of Beam” in *Applied Strength of Materials*, 6th Edition, Boca Raton, Taylor & Francis, CRC Press, 2017, Chapter 9(4), pp 497-564
- [10] *Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions*, ASTM C393-00, 2000.

NOMENKLATUR

σ	Tegangan Normal
M	Momen Lentur
C	jarak titik terluar penampang dari sumbu netral
I_{zz}	Momen inersia penampang terhadap sumbu netral z-z
K	Kekakuan bending struktur
F	Beban pada struktur
δ	Defleksi struktur batang
E	Modulus Elastisitas