

Sifat Mekanik *Triangle Honeycomb Beam* dengan Bahan Komposit *Fiberglass***Ali, Gheva Fadel Muhammad Gani, Marsono*, Eka Taufik Firmansyah**

Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Jl. PHH. Mustafa No.23 Bandung 40124

email korespondensi : marsono@itenas.ac.id **Received 16 Maret 2021 | Revised 06 November 2022 | Accepted 17 November 2022***ABSTRAK**

Penggunaan material baja sebagai strut (batang penopang) pada chassis *space-frame* sudah sangat umum. Material baja masih memiliki kekurangan berupa bobot yang relatif berat. Hal ini berpengaruh pada kendaraan hemat energy, dimana mobil hemat energi membutuhkan bobot yang lebih ringan untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini digunakan material komposit *fiberglass WR-200* untuk membuat beam dengan struktur penguat di dalamnya agar dapat digunakan sebagai strut pada chassis *space frame*. Beam dengan inti penguat akan dibuat dengan variasi ketebalan dinding sel penguat, yaitu dengan variasi 1,2 dan 4 lapisan *fiberglass*. *Triangle core honeycomb beam* diuji dengan metoda uji bending untuk mendapatkan angka kekuatan lentur dan kekakuan. Dari pengujian yang dilakukan diketahui bahwa kekuatan lentur maksimum yang dicapai adalah sebesar 5,171kg/mm² dan kekakuan tertinggi adalah 7,339kg/mm.

Kata kunci : balok, komposit serat kaca, inti segitiga, sarang lebah

ABSTRACT

The use of steel as a struts on space frame type chassis is very common.. Steel material still has a weakness in the term of weight. Weight is very importance in the matter of high energy efficient vehicle, in which to reach higher power to weight ratio. In this research, fiberglass composite WR-200 will be used to develop a beam with reinforce structure inside so it can be used as strut on the space-frame chassis. Beam with reinforce core were made by varying the thickness of the wall with variation of the number of fiberglass layer, 1, 2 and 4 layer of fiberglass. These triangle core honeycomb beam will be test with a bending test to find the flexural strength and the stiffness. The test shows that the highest flexural strength is 5.171 kg/mm² and the highest stiffness is 7.339 kg/mm

Keywords: Beam, fiberglass composite, triangle core. Honeycomb.

1. Pendahuluan

Konstruksi *honeycomb sandwich* adalah rekayasa struktur material sudah yang tidak asing lagi di berbagai bidang industri, seperti industri penerbangan dan otomotif. Material dengan struktur *honeycomb sandwich* semakin banyak digunakan karena memiliki kelebihan dalam hal bobot yang ringan dengan kekuatan dan kekakuan yang tinggi. Atau dengan istilah lain, material dengan struktur *honeycomb sandwich* memiliki perbandingan kekakuan/kekuatan terhadap berat (*stiffness/strength-to-weight ratio*) yang tinggi [1].

Struktur sandwich umumnya tersusun dari dua lembar kulit (*skin*) dan di antara kedua kulit tersebut terdapat material inti (*core*). Kulit sandwich akan menerima sebagian besar beban lentur sementara inti sandwich akan menahan sebagian besar beban geser arah transversal dan beban arah normal. Material inti sandwich yang biasanya terbuat dari material yang ringan atau memiliki rongga (ruang kosong) akan membentuk jarak di antara dua kulit sehingga struktur sandwich memiliki kekakuan dan kekuatan lentur yang tinggi dengan bobot yang ringan. [2].

Fibre Reinforced Polymer (FRP) yang memiliki bobot yang ringan sudah banyak digunakan dalam pembuatan *sandwich structure*. Bobot yang rendah akan membuat material FRP memiliki kekakuan bending spesifik yang lebih tinggi. Kelebihan lain dari FRP adalah mudah dibentuk untuk mendapatkan geometrik yang kompleks serta lebih fleksibel pada saat dirakit [3], [4]. Pemanfaatan *honeycomb sandwich* yang terbuat dari FRP untuk *chassis* mobil hemat energi adalah upaya yang perlu dilakukan untuk mendapatkan *power-to-weight ratio* yang lebih baik.

Pengembangan *chassis* dengan struktur *space-frame* juga merupakan upaya untuk mendapatkan bobot kendaraan yang ringan namun tetap memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi agar pengendara tetap aman. *Chassis* jenis ini tersusun dari sambungan-sambungan batang (*strut*) yang membentuk struktur segitiga untuk mendapatkan kekakuan maksimum, serta mampu menahan beban lentur, beban torsi dan beban dampak [5]. Namun demikian, batang yang dipakai untuk membentuk *space-frame* juga harus memiliki kekuatan tarik, kekuatan lentur dan kekuatan *buckling* yang cukup tinggi. Kekuatan terhadap beban *buckling* merupakan pertimbangan penting dalam desain struktur, terutama jika strukturnya ramping dan ringan [6].

Penggunaan material baja sebagai strut (batang penopang) pada *chassis space-frame* sudah sangat umum, namun ini masih memiliki kekurangan berupa bobot yang relatif berat. Hal ini sangat berpengaruh pada kendaraan hemat energi, dimana mobil hemat energi sebaiknya dibuat dengan bobot yang lebih ringan untuk mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi. Pengembangan material yang lebih ringan sebagai pengganti baja akan menjadi sangat menarik untuk dilakukan. Penggunaan material komposit polimer sebagai pengganti baja menjadi pilihan yang cukup baik mengingat bahwa material ini memiliki masa jenis yang jauh berada di bawah baja, walaupun dari sisi kekuatannya pun masih jauh berada di bawah baja. Dengan kekuatan yang lebih rendah, bukan berarti komposit polimer tidak memiliki kesempatan untuk mengganti material baja. Material komposit polimer masih bisa direkayasa untuk mendapat kekuatan yang lebih tinggi dengan cara ditambah dengan struktur penguat. Penambahan struktur *honeycomb sandwich* bisa menjadi menjadi jalan untuk mendapatkan kekuatan yang lebih baik pada material komposit polimer.

Bentuk inti dari struktur *honeycomb sandwich* adalah bagian yang berpotensi besar untuk dikembangkan hingga diperoleh sifat mekanik yang lebih baik. Hal ini terlihat pada pengembangan bentuk inti yang tidak hanya terbatas pada bentuk *hexagonal* (segi enam), tapi telah berkembang dengan banyak variasi bentuk inti. Rancangan bentuk dan konfigurasi geometris inti dalam struktur *honeycomb sandwich* adalah salah satu faktor yang akan ikut menentukan inisiasi modus kegagalan pada struktur *honeycomb* tersebut [7]. Bentuk geometri segitiga (*triangle*) dapat menjadi salah satu pilihan untuk membentuk inti (*core*) *honeycomb sandwich* suatu batang (*beam*) hingga diperoleh peningkatan kekuatan dan kekakuan dari sebuah batang dengan bobot yang ringan. Inti berbentuk segitiga sangat sesuai untuk diaplikasikan sebagai penguat pada batang dengan penampang segiempat karena bentuk inti segitiga akan

mengisi penuh penampang segiempat dengan lebih sempurna dibandingkan inti dengan bentuk segiempat. bentuk inti segitiga juga memiliki kuncian simpul yang lebih kuat dibandingkan dengan bentuk segienam [1]. Honeycomb struktur dengan inti berbentuk segitiga tidak hanya memiliki ketahanan lentur, kekakuan dan ketangguhan yang sangat baik, tetapi juga memiliki ketahanan buckling yang lebih baik. [8], [9].

Pada penelitian ini dibuat batang persegi berlubang dengan bahan komposit polimer yang di bagian dalamnya dan ditambahkan penguat dengan struktur yang mirip dengan struktur *honeycomb sandwich*. Bentuk inti (*core*) penguat di bagian dalam dari batang persegi berlubang ini adalah bentuk segitiga. Bahan yang dipakai untuk membuat *triangle honeycomb beam* ini adalah komposit dengan penguat *fiberglass* dan matriks pengikat resin. Penambahan struktur penguat dalam batang persegi berlubang diharapkan dapat meningkatkan keluatan lentur dan kekakuan batang komposit polimer.

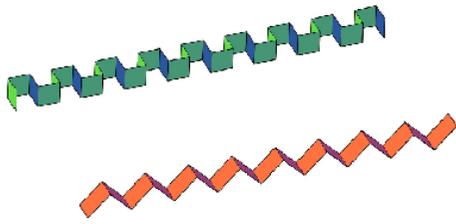
Triangle honeycomb beam dibuat dengan beberapa variasi ketebalan dinding sel, yaitu 1,2 dan 4 lapis *fiberglass*. Variasi ini bertujuan untuk menemukan angka perbandingan atau peningkatan kekuatan lentur (*flexural strength*) dan kekakuan (*stiffness*) dari setiap *honeycomb beam* dengan ketebalan dinding yang berbeda. Penelitian-penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa bahwa ketebalan *cell honeycomb* memberikan efek yang signifikan terhadap kekuatan bending dan kekakuan pada panel honeycomb [10], [11]. Peningkatan densitas sebagai dampak dari penambahan ketebalan juga ikut berperan dalam peningkatan sifat mekanik panel honeycomb [12]. *Honeycomb beam* ini diharapkan bisa menjadi alternatif pengganti batang-batang pada chassis *space-frame* mobil hemat energi agar didapatkan *power-to-weight ratio* yang lebih baik

2. Metodologi Penelitian

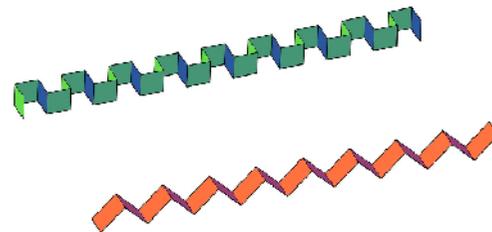
Dalam Penelitian ini, spesimen batang *Honeycomb sandwich* dibuat dengan inti (*core*) berbentuk segitiga. Bentuk segitiga menjadi pilihan yang sesuai untuk batang (*beam*) dengan penampang bujursangkar karena bentuk segitiga dapat membagi ruang yang tersedia secara maksimal, simetris dan seragam, tidak ada ruang yang tersisa dengan ukuran yang berbeda. *Honeycomb sandwich* dengan inti berbentuk segitiga ini dibuat dengan bahan komposit, yaitu dengan menggunakan serat kaca (*fiberglass*) WR-200 sebagai serat penguat (*reinforce agent*) dan resin SHCP2668 CM-M sebagai matriks (*bonding agent*).

Spesimen *honeycomb beam* dibuat dengan ukuran panjang 500mm, dengan bentuk penampang bujur sangkar, yaitu dengan lebar dan tinggi 30mm. Sel *honeycomb* dibuat dengan ukuran setiap segmen 30mm ke arah memanjang batang (*beam*). Di dalam segmen yang berbentuk kubus 30x30x30mm ini akan disisipkan lembaran serat kaca sehingga terbentuk sel inti *honeycomb* yang berbentuk segitiga. Spesimen *honeycomb beam* dibuat dengan 3 variasi ketebalan dinding sel. Perbedaan ketebalan dinding sel *honeycomb* ini dibuat untuk mengetahui dampak dari ketebalan dinding sel *honeycomb* terhadap kekuatan lentur dan kekakuannya. Perbedaan ketebalan dinding sel didapatkan dengan cara menggunakan jumlah lapisan fiberglass yang berbeda, yaitu 1 lapis, 2 lapis dan 4 lapis.

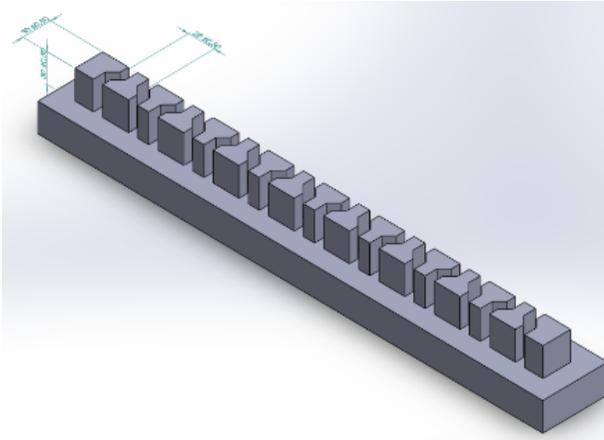
Inti *honeycomb* tersusun dari dua bagian lembaran yang terpisah, yaitu lembaran yang berbentuk segiempat zigzag dan lembaran yang berbentuk segitiga zigzag. Kedua lembaran berbentuk zigzag ditunjukkan pada gambar 1. Kedua lembaran berbentuk zigzag tersebut kemudian disatukan hingga terbentuk inti *honeycomb* sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2. Untuk pembuatan lembaran pembentuk inti *honeycomb* dengan bentuk segiempat zigzag digunakan cetakan seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3. Penggunaan cetakan ini dilakukan untuk mempermudah proses pembuatan lembaran inti segiempat serta menjaga konsistensi bentuk dan ukurannya.



Gambar 1 Bagian-bagian lembaran dari inti honeycomb beam



Gambar 2. Inti honeycomb beam yang telah disatukan



Gambar 3 Cetakan untuk membuat inti *Honeycomb* yang berbentuk segiempat

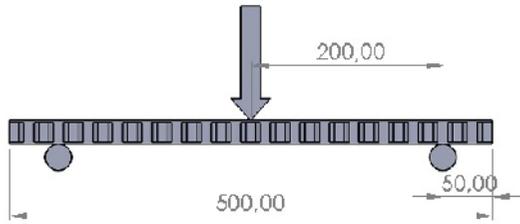
Lembaran Inti *honeycomb* dengan bentuk segitiga zigzag diterapkan secara langsung pada inti berbentuk zigzag segiempat. Penerapan inti segitiga zigzag ini dikerjakan dengan cara menyisipkan lembaran serat kaca di antara celah-celah zigzag segiempat yang telah kering dan mengeras. Setelah lembaran pembentuk segitiga zigzag disisipkan di antara celah segiempat zigzag, maka lembaran pembentuk segitiga zigzag tersebut dilapisi dengan resin, serta merekatkannya pada segiempat zigzag. Gabungan kedua bentuk zigzag tadi akan membentuk inti *honeycomb*. Pembuatan kulit (*skin*) dilakukan dengan cara melapisi inti *honeycomb* dengan serat fiberglass hingga seluruh inti *honeycomb* tertutupi serta melapisinya dengan resin. Bentuk *honeycomb beam* dengan inti berbentuk segitiga yang telah jadi ditunjukkan dalam gambar 4.



Gambar 4. *Honeycomb Beam* berbahan *Composite Fiberglass* yang telah jadi

Angka kekuatan lentur (*flexural strength*) dan kekakuan (*stiffness*) *honeycomb beam* diperoleh melalui metoda uji bending dengan beban terpusat, tepat di tengah-tengah tumpuan, mengacu

kepada standar ASTM C393-00, 2000) [13]. Pembebanan pada uji bending ini dilakukan di atas tumpukan yang berjarak (L) 400mm dan beban berada tepat di tengah tumpukan (1/2L), atau 200mm dari kedua tumpuannya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Posisi tumpuan dan pemberian pembebanan

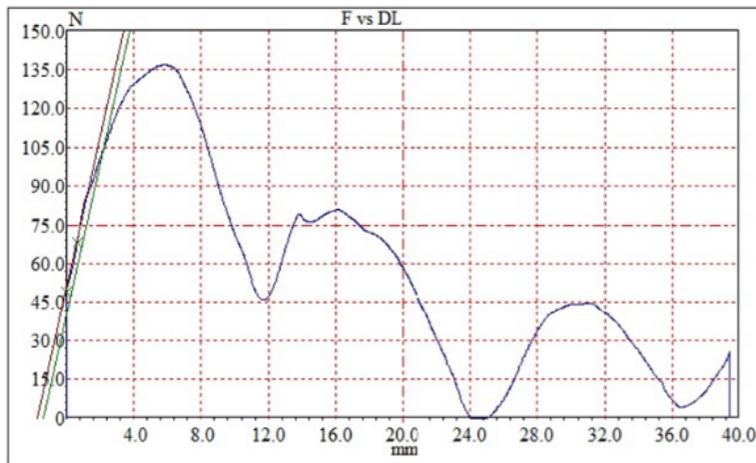


Gambar 6. Proses uji bending dengan mesin Gotech, model GT-7001 L510

3. Hasil Dan Pembahasan

Spesimen *honeycomb beam* diuji dengan mesin Gotech Testing Machine model GT-7001 L510, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 6. Mesin Uji bending ini memberikan hasil berupa grafik, data beban maksimal yang dapat ditahan oleh *honeycomb beam* serta defleksi yang terjadi pada saat terjadi beban maksimal.

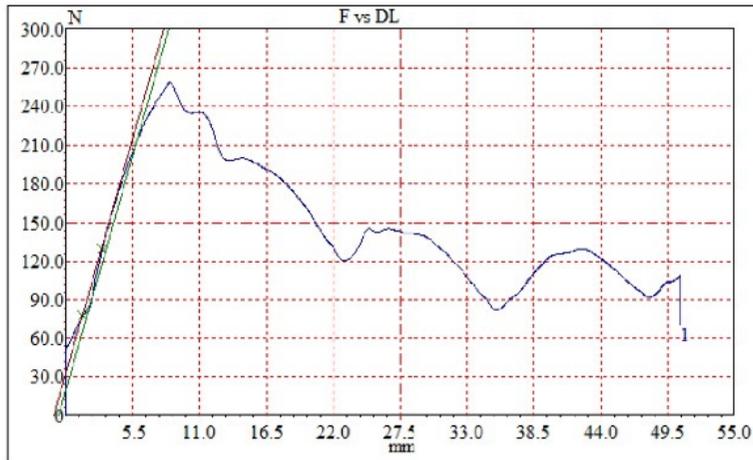
Dari pengujian bending dengan standar ASTM C393-00 didapat kurva beban terhadap defleksi seperti yang ditunjukkan pada gambar 7, gambar 8 dan gambar 9. Kurva pada gambar 7 memperlihatkan perubahan beban terhadap defleksi yang terjadi pada spesimen *honeycomb beam* dengan tebal dinding sel 1 lapis *fiberglass*, sedangkan gambar 8 dan gambar 9 secara berurutan adalah kurva perubahan beban terhadap defleksi yang terjadi pada spesimen dengan tebal dinding sel 2 lapis dan 4 lapis fiberglass.



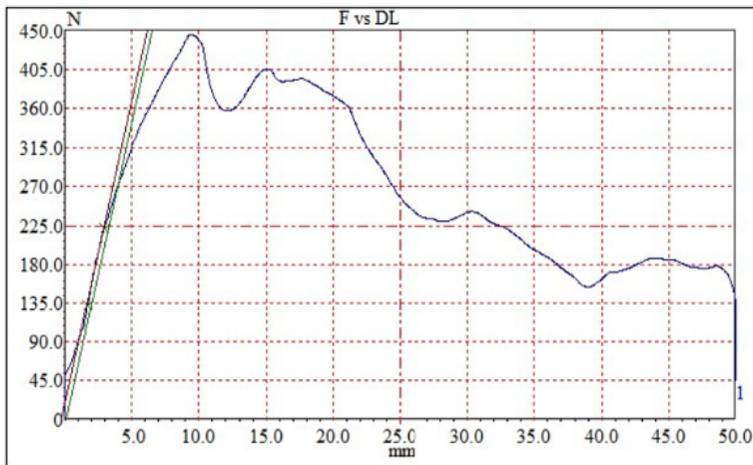
Gambar 7. Grafik beban terhadap defleksi dari specimen dengan tebal dinding sel 1 lapis fiberglass

Grafik hasil pengujian bending dari specimen *honeycomb beam* dengan ketebalan dinding sel 1 lapis serat kaca (gambar 7) memperlihatkan bentuk grafik yang naik turun, setelah melampaui beban maksimum. Grafik seperti ini terbentuk karena adanya kerusakan *struktur honeycomb beam* yang terjadi secara beruntun dari satu sel ke sel berikutnya. Lepasnya ikatan antara inti sel dalam *struktur honeycomb sandwich* dan kulit (*skin*) *honeycomb* berlangsung beberapa kali pada beberapa titik secara beruntun, tidak bersamaan. Hal yang sama juga ditunjukkan pada grafik pengujian specimen *honeycomb beam* dengan ketebalan dinding 2 lapis dan 4 lapis serat kaca

(gambar 8 dan gambar 9), yaitu grafik yang turun naik beberapa kali sampai akhirnya spesimen patah



Gambar 8. Grafik beban terhadap defleksi dari specimen dengan tebal dinding sel 2 lapis fiberglass



Gambar 9. Grafik beban terhadap defleksi dari specimen dengan tebal dinding sel 4 lapis serat kaca

Defleksi maksimum yang dialami oleh spesimen *honeycomb beam* ketika spesimen akan patah menunjukkan angka yang jauh lebih besar daripada angka defleksi yang terjadi ketika spesimen mendapat beban maksimum di daerah elastis. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen *honeycomb beam* mengalami defleksi yang besar setelah melampaui daerah elastis sampai mengalami patah. Angka defleksi maksimum yang besar memberikan informasi bahwa spesimen *honeycomb beam* dengan inti berbentuk segitiga dan terbuat dari bahan komposit fiberglass memiliki keuletan dan kelenturan yang cukup baik sehingga tidak mudah hancur atau pecah.

Tabel 1. Komposisi berat serat kaca dan berat resin dalam specimen *honeycomb beam*

Variasi lapisan	Berat serat kaca (gram)	Berat resin (gram)	Berat total spesimen (gram)	Presentase	
				Fiberglass	Resin
1	59	63	122	48%	52%
2	104	98	202	51%	49%
4	143	106	249	57%	43%

Tabel 1 memperlihatkan bahwa komposisi berat serat kaca dan berat resin untuk tebal dinding sel

honeycomb 1 dan 2 lapis serat kaca berada di sekitar angka 50% : 50%. Artinya dengan komposisi berat 50% : 50%, komposit serat kaca dan resin masih menunjukkan sifat yang cukup ulet dan tidak membuat specimen *honeycomb beam* menjadi patah getas.

Kondisi patah ulet yang terjadi pada spesimen *honeycomb beam* terlihat pada gambar 10. Specimen tidak pecah dan lepas, tetapi masih tetap tersambung walaupun spesimen telah mengalami defleksi yang besar. Gambar 10.a, 10.b dan 10.c memperlihatkan modus kegagalan yang sama pada ketiga spesimen *honeycomb beam* dengan variasi ketebalan dinding sel, yaitu lepasnya inti (*core*) *honeycomb* dari kulit (*skin*) di bagian samping.



Gambar 10. Bentuk patahan specimen honeycomb beam

Gambar 10a, 10.b dan 10.c. juga memperlihatkan bahwa sisi atas dari *honeycomb beam* yang berhadapan langsung dengan beban *bending* mengalami beban penekanan dan pengerutan, sedangkan pada sisi bagian bawah yang seharusnya mengalami tarikan tidak terlihat terjadi peregangan. Hal ini sesuai dengan teori mekanisme kegagalan yang terjadi pada struktur *simple beam* yang mengalami beban lentur, di mana di sisi sebelah atas sumbu netral akan mengalami tekanan dan di bagian bawah sumbu netral akan mengalami tarikan.

Dari gambar 10.a, 10b. dan 10.c juga didapatkan informasi bahwa struktur *honeycomb beam* dengan inti berbentuk segitiga, lebih kuat menahan beban tarik daripada beban tekan. Hal ini ditunjukkan dengan terjadinya pengerutan yang sangat jelas terlihat di sisi atas sebagai efek dari gaya tekan, sementara regangan di sisi bawah sumbu netral tidak terlihat dengan jelas.

Besar beban maksimum yang dapat ditahan oleh spesimen *honeycomb beam* ditunjukkan dalam tabel 2. Besar defleksi yang dialami spesimen pada saat beban maksimum terjadi juga ditunjukkan pada tabel 2. Kedua data tersebut dijadikan sebagai dasar untuk menghitung untuk kekuatan lentur (*flexural strength*) dan kekakuan (*stiffness*) dari spesimen *honeycomb beam*.

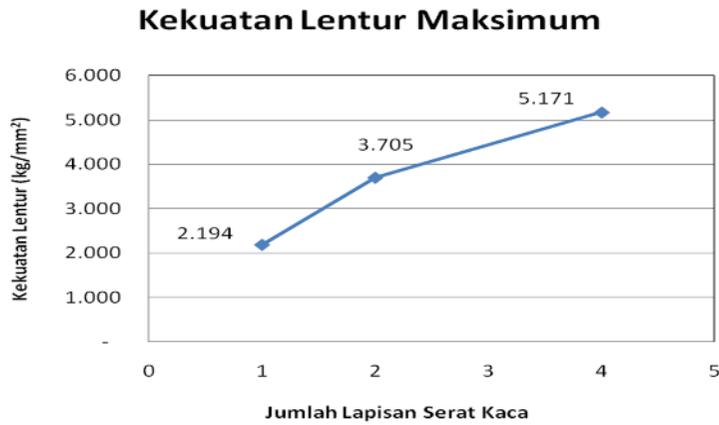
Tabel 2. Beban maksimum dan defleksi yang terjadi pada saat beban maksimum

Variasi lapisan serat kaca	Beban maksimal (kg)	Defleksi pada beban maks (mm)
1 lapis	14,07	5,6
2 lapis	26,30	8,8
4 lapis	44,95	9,5

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kekuatan lentur adalah persamaan tegangan pada struktur batang sederhana (*simple beam*), yaitu $\sigma = (M.C/I_{zz})$ [14]. Dari persamaan tersebut diperoleh kekuatan lentur untuk setiap specimen. Angka kekuatan lentur untuk setiap specimen terlihat pada tabel 3 gambar 11.

Tabel 3 Hasil perhitungan kekuatan

Variasi lapisan fiberglass	Beban maksimum (kg)	I_{zz} (mm ⁴)	Kekuatan lentur Kg/mm ²
1 lapis	14,07	10.256,93	2,194
2 lapis	26,30	12.068,08	3,705
4 lapis	44,95	15.474,23	5,171



Gambar 11. Kekuatan Lentur honeycomb beam untuk variasi ketebalan dinding honeycomb 1,2 dan 4 lapi fiberglass

Penambahan lapisan serat kaca pada dinding sel inti *honeycomb beam* akan mempengaruhi kekuatan lentur. Dari persamaan kekuatan lentur: $\sigma = (M.C/I_{zz})$ dengan nilai momen inersia penampang yang bertambah dengan rumus dasar : $I_{zz} = (1/12)b.h^3$, maka kekuatan lentur akan meningkat secara linier setara dengan penambahan ketebalan dinding sel. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 11, yaitu kurva kenaikan kekuatan lentur terhadap penambahan ketebalan dinding sel inti *honeycomb beam* (sebagai fungsi dari jumlah lapisan serat kaca) masih terlihat linier

Kekakuan specimen *honeycomb beam* dengan inti berbentuk segitiga diperoleh dengan menggunakan persamaan defleksi untuk struktur batang sederhana, yaitu $K = F/ \delta$ [14]. Kekakuan spesimen batang *honeycomb* dihitung di daerah elastis dalam kurva grafik uji bending. Angka kekakuan *honeycomb beam* untuk setiap jumlah lapisan fiberglass pada dinding sel dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Kekakuan honeycomb beam untuk variasi ketebalan dinding honeycomb 1,2 dan 4 lapi fiberglass

Dari hasil perhitungan yang telah di lakukan diketahui bahwa semakin banyaknya jumlah lapisan serat kaca yang digunakan, maka angka kekakuan menjadi semakin tinggi. Hal ini terlihat jelas

pada gambar 12. Hal ini sangat wajar karena semakin banyak lapisan fiberglass yang dipakai maka tebal dinding honeycomb beam akan bertambah demikian juga dengan penggunaan resin akan bertambah. Ketebalan dinding sel yang bertambah akibat jumlah lapisan fiberglass yang lebih banyak tentunya akan meningkatkan momen inersia penampang dari honeycomb beam dan hal ini akan berdampak kepada peningkatan kemampuan menahan beban, kekuatan lentur dan kekakuan.

Dari persamaan defleksi untuk *simple beam* yaitu $\delta = F.l^3/48.EI$ kekuatan, dengan kenaikan beban maksimum dan kenaikan angka momen inersia penampang yang bertambah secara linier, maka angka kekakuan juga akan meningkat secara linier. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 12, yaitu kurva kenaikan angka kekakuan terhadap penambahan ketebalan dinding sel inti *honeycomb beam* masih terlihat linier.

4. Kesimpulan

Dari pengujian yang telah dilakukan diketahui bahwa beban maksimum yang mampu ditahan spesimen *triangle core honeycomb beam* yang dibuat dari *composite fiberglass* dengan ketebalan dinding 1 lapis *fiberglass* adalah 14,07 kg, untuk ketebalan dinding 2 lapis *fiberglass* adalah 26,30 kg dan untuk ketebalan dinding 4 lapis *fiberglass* adalah 44,95 kg. Dalam hal kekuatan lentur, *honeycomb beam* dengan ketebalan dinding sel *honeycomb* sebanyak 1 lapis *fiberglass* mampu mencapai kekuatan lentur 2,194 kg/mm², dengan ketebalan dinding 2 lapis *fiberglass* mampu mencapai 3,705 kg/mm² dan untuk ketebalan dinding 4 lapis *fiberglass* mampu mencapai 5,171 kg/mm². Kekakuan struktur *triangle honeycomb beam composite* dengan variasi 1 lapis *fiberglass* adalah 3,277kg/mm, untuk variasi 2 lapis *fiberglass* adalah 4,077 kg/mm dan kekakuan untuk variasi 4 lapis *fiberglass* adalah 7,339 kg/mm.

Angka defleksi maksimum yang besar menunjukkan bahwa specimen *honeycomb beam* dengan inti berbentuk segitiga dan terbuat dari bahan komposit serat kaca memiliki keuletan dan kelenturan yang cukup baik sehingga tidak mudah hancur atau pecah. Modus kegagalan yang terjadi pada spesimen *honeycomb beam* dengan inti berbentuk segitiga adalah lepasnya inti (*core*) *honeycomb* dari kulit (*skin*) di bagian samping serta pengerutan kulit di bagian atas. Hal ini menunjukkan bahwa struktur *honeycomb beam* dengan inti berbentuk segitiga, lebih kuat menahan beban tarik daripada beban tekan.

5. Daftar Pustaka

- [1] Cui Xu, Huang Yanjiao, Wang Shou, Lu Chun, and Fang Luping “Stress Distribution on Sandwich Structure with Triangular Grid Cores Suffered from Bending Load” . Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Aerospace Engineering, Volume 2015, Article ID 723487, 8 pages, <http://sx.doi.org/10.1155/723487>
- [2] A. C. Manalo, “Behaviour of fibre composite sandwich structures under short and asymmetrical beamshear tests,” *Composite Structures*, vol. 99, may2013, pp. 339–349.
- [3] Suresh Babu K. S., Bylappa B. K., Dr. Shivanand, H. K., Rakshit Divakar Naik, and Sunil Kumar K. V. “Evaluation of Flexural Properties of FRP Honeycomb Core Sandwich Composite Reinforced with CNT”. *International Journal of Current Research* Vol. 9, Issue, 08, pp.55586-55588, August, 2017
- [4] Davide Tumino, Tommaso Ingrassia, Vincenzo Nigrelli, Giuseppe Pitarresi, Vicednzo 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
- [5] Tito Shantika, Eka Taufiq Firmansjah and Ilham Naufan, (2017), “Perancangan Chassis Type Tubular Space Frame untuk Kendaraan Listrik” *POROS*, Volume 15 Nomor 1, Mei 2017, pp. 9 – 17
- [6] Dezhong Qi, Qiang Sun, Sanqiang Zhang, Yuanfang Wang and Xiaoqiang Zhou, “Buckling Analysis of a Composite Honeycomb Reinforced Sandwich Embedded with Viscoelastic Damping Material”, *Applied Science*, 2022, 12, 10366.

- <https://doi.org/10.3390/app122010366>
- [7] M. S. Konsta-Gdoutos, E.E. Gdoutos, “The Effect of Load and Geometry on the Failure Modes of Sandwich Beams”, *Applied Composites Material*, Volume 12, 2015 pp 165-175.
 - [8] Zhen Wang, Xinlong Yang, Wengen Lai, Yifeng Zhong and Rong Liu, 2022, “A VAM-Based Equivalent Model for Triangular Honeycomb Sandwich Panels: Comparison with Numerical and Experimental Data”, *Materials* 2022, 15, 4766. <https://doi.org/10.3390/ma15144766>
 - [9] Qian Zhang, Wenwang Wu and Jianlin Liu, “Local Strengthening Design and Compressive Behavior Study of the Triangular Honeycomb Structure”. *Metals* 2022, 12, 1779. <https://doi.org/10.3390/met12111779>
 - [10] Joseph N. Grima, Reuben Cauchi, Ruben Gatt, Daphne Attard, 2013, “Honeycomb composites with auxetic out-of-plane characteristics”, *Composite Structures* 106 (2013) pp. 150–159, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.009>
 - [11] Jerzy Smardzewski, adam Majewski, “Mechanical properties of auxetic honeycomb core with triangular cells”, 25th International Scientific Conference New Materials and Technologies in The Function of Wooden Products, 2014.
 - [12] Balawi S.; Abot J.L. (2008): “The effect of honeycomb relative density on its effective in-plane elastic moduli: An experimental study”. *Composite Structures* Volume 84, Issue 4, August 2008, Pages 293-299
 - [13] Anonim, ASTM. (2000) ASTM C393-00 –Standard Test Method for Flexural Properties Of Sandwich Constructions.
 - [14] Mott, Robert L., (2002) “Applied Strength of Materials” 4th Edition, Prentice-Hall, New jersey.