

Pengujian *Crashworthiness Honeycomb Sandwich* Dengan Variasi Jumlah Lapisan Inti Menggunakan *Software Ansys*

Marsono, Mochamad Rafli Januarizki, Muhammad Luthfi Rasyad, Erika Rachmadini, dan Ghazi Ahmad Ghifari

Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Jl. PHH. Mustafa No.23 Bandung 40124

e-mail : marsono@itenas.ac.id

Received 17 November 2023 | Revised 17 Desember 2023 | Accepted 12 Januari 2024

ABSTRAK

Crashworthiness dapat diartikan sebagai kemampuan dari suatu material untuk bertahan dari kehancuran yang berkelanjutan serta mempertahankan beberapa bagian material setelah terjadinya tumbukan. Telah banyak penelitian yang menunjukkan bahwa material dengan struktur honeycomb sandwich memiliki sifat crashworthiness yang baik. Komposit bermatriks polimer (PMC) adalah material yang sangat sesuai untuk pembuatan honeycomb sandwich structure karena memiliki sifat yang ulet dan ringan. Kedua sifat ini akan menghasilkan material yang memiliki sifat crashworthiness yang baik dengan bobot yang ringan. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi dengan software Ansys untuk mendapatkan sifat crashworthiness dari spesimen material dengan struktur honeycomb sandwich dengan tiga variasi lapisan inti honeycomb, yaitu 1 lapisan inti, 2 lapisan inti dan 3 lapisan inti. Ketiga variasi specimen dibuat dengan bahan komposit fiberglass. Metoda pengujian yang disimulasikan dalam software adalah metoda vertical drop test. Parameter crashworthiness yang ingin didapatkan adalah defleksi maksimum yang terjadi dan energi maksimum yang dapat diserap oleh material dengan struktur honeycomb sandwich. Performa terbaik ditunjukkan oleh specimen dengan 3 lapisan inti dengan defleksi terkecil, yaitu sebesar 3,83 mm dengan waktu 0,0015 detik, dan serapan energy terbesar, yaitu sebesar 125,62 Joule dalam waktu 0,0015 detik.

Kata kunci : Honeycomb sandwich, crashworthiness, komposit fiberglass, defleksi, energi

ABSTRACT

Crashworthiness can be defined as the ability of a material to withstand continued destruction as well as retaining some parts of the material after a collision. Many studies have shown that material with a honeycomb sandwich structure have good crashworthiness properties. Polymer matrix composite is suitable for making honeycomb sandwich structure because it has ductile properties and light in weight. Both properties are perfect for obtaining material with good crashworthiness properties and light in weight. In this research, simulations were carried out using Ansys software to obtain the crashworthiness properties of material with a honeycomb sandwich structure with three variations of honeycomb core, namely 1 core layer, 2 core layers and 3 core layers. The specimens with three variations were made with fiberglass composite material. The testing method that was simulated in the software is the vertical drop test method. The crashworthiness to be obtained are the maximum deflection that occurs and the maximum energy that can be absorbed by a material with a honeycomb sandwich structure. The best performance was shown by the specimen with 3 core layer with the smallest deflection of 3.83mm and the largest energy absorption of 125.62 Joule in 0.0015 seconds

Keywords: Honeycomb sandwich, crashworthiness, fiberglass composite, deflection, energy.

1. Pendahuluan

Material dengan struktur berlapis (*sandwich structure*) dikembangkan untuk mendapatkan material yang memiliki kekuatan yang tinggi namun memiliki bobot yang ringan. Atau dengan kata lain, material ini memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi [1]. Material dengan struktur berlapis juga memiliki kekakuan geser dan bending (*shear/bending stiffness*) yang tinggi persatuan beratnya serta memiliki kemampuan untuk meredam benturan yang baik. Struktur honeycomb sandwich memiliki karakteristik anti-shock yang lebih kuat dibandingkan dengan impact attenuator (peredam benturan) [2]. Dengan kelebihan yang dimilikinya, material dengan struktur honeycomb sandwich akan memberikan efisiensi yang tinggi serta tingkat keamanan pada kendaraan [4]. Panel sandwich structure banyak digunakan untuk dinding badan mobil (*body shell*), pilar dan tulang atap sebagai penyerap energi dengan tujuan untuk melindungi penumpang ketika terjadi tabrakan [3].

Dalam dunia transportasi, kemampuan sistem struktur kendaraan untuk meredam benturan atau menyerap energi akibat tumbukan kinetik dikenal dengan istilah *crashworthiness*. *Crashworthiness* juga dapat dipahami sebagai ketahanan material terhadap kehancuran yang berkelanjutan serta kemampuan material tersebut untuk mempertahankan beberapa bagian pasca penghancuran. Karakteristik *crashworthiness* yang baik tentunya dimiliki oleh material yang mampu menyerap energi tumbukan sebesar mungkin ketika terjadi tabrakan pada kendaraan. Selain itu, material juga harus mampu mengurangi kerusakan akibat tabrakan yang mungkin diteruskan kepada penumpang [4]. Karakteristik *crashworthiness* ini sangat penting untuk dimiliki oleh sistem struktur kendaraan karena terkait dengan keselamatan penumpang ataupun muatan yang ada di dalamnya ketika terjadi benturan.

Karakteristik *crashworthiness* yang merupakan kemampuan dari sebuah struktur dalam menyerap energi tumbukan dapat diketahui dengan mengevaluasi respon yang terjadi pada struktur tersebut. Energi tumbukan yang diperlukan untuk mengetahui karakteristik *crashworthiness* bisa diperoleh dengan memanfaatkan energi potensial yang dimiliki oleh masa penumbuk yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu. Pengujian seperti ini dikenal dengan metoda *vertical drop test*. Metoda *vertical drop test* ini adalah salah satu metoda pengujian yang umum digunakan untuk mendapatkan karakteristik *crashworthiness*. Dengan menggunakan metoda *drop-test* ini, beban tumbukan dapat divariasikan dengan mudah, yaitu dengan cara mengubah tinggi jatuh penumbuk (impaktor) [5], [6].

Komposit bermatriks polimer (PMC) adalah material yang tentunya sangat sesuai untuk pembuatan *honeycomb sandwich structure* yang diharapkan memiliki sifat *crashworthiness* yang baik karena bahan PMC memiliki sifat yang ulet. Secara alamiah, bahan polimer telah memiliki keuletan yang tinggi. Terlebih lagi, jika bahan polimer tersebut dikombinasikan dengan serat penguat, maka komposit yang terbentuk akan memiliki sifat mekanik yang lebih baik lagi [7], [8]. Pemanfaatan komposit sebagai bahan untuk *honeycomb sandwich* akan semakin meningkatkan ratio kekuatan terhadap berat karena polimer juga memiliki bobot yang lebih ringan dibanding bahan logam [9]. Material PMC juga dapat dibentuk dengan lebih mudah untuk menghasilkan geometrik yang kompleks serta memiliki fleksibilitas yang baik dalam perakitan [10].

Pengujian *crashworthiness* tidak mudah dilakukan secara eksperimental karena instalasi pengujian yang cukup rumit dan memiliki resiko yang cukup tinggi. Oleh karena itu, pengujian awal *crashworthiness* ini dilakukan menggunakan simulasi numerik. Pengembangan simulasi ini digunakan untuk menganalisis masalah kompleks dampak *dynamic impact*. Salah satu alat yang digunakan untuk simulasi numerik tersebut yaitu Metode Elemen Hingga [11].

Penelitian ini adalah kelanjutan dari penelitian yang pernah dilakukan. Sebelumnya telah dilakukan pengujian terhadap *honeycomb sandwich* dengan inti berbentuk gelombang trapezoidal dua arah dengan bahan komposit fiberglass untuk mendapatkan angka kekuatan lentur (*flexural*

strength) dan kekakuan (*stiffness*). Kekuatan lentur dan kekakuan diperoleh melalui pengujian terhadap specimen berbentuk panel *honeycomb sandwich* dengan beban *bending* [12].

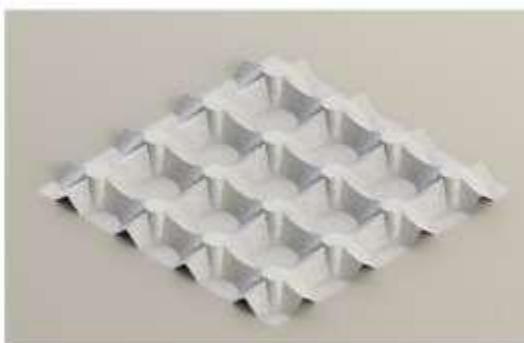
Pada penelitian, akan dilakukan simulasi pengujian *vertical drop test* terhadap *honeycomb sandwich* dengan inti berbentuk gelombang trapezoidal dua arah berbahan komposit fiberglass dengan menggunakan perangkat lunak FEA (*Finite Element Analysis*) untuk mendapatkan karakteristik *crashworthiness*. Simulasi pengujian ini akan dilakukan dengan 3 variasi jumlah lapisan inti *honeycomb* yang berbentuk gelombang trapezoidal dua arah. Karakteristik *crashworthiness* *honeycomb sandwich* ini dievaluasi melalui besar energy yang diserap oleh struktur *honeycomb sandwich* serta deformasi yang terjadi pada struktur tersebut.

2. Metodologi Penelitian

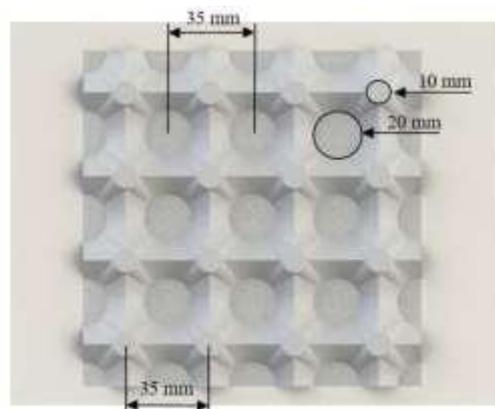
Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi pengujian dengan menggunakan software Finite Element terhadap struktur *honeycomb sandwich* untuk mengetahui karakteristik *crashworthiness*. Analisis numerik banyak digunakan dalam perancangan *honeycomb* struktur karena akurasi dan efisiensi yang tinggi serta biaya yang murah [5],[13].

Metoda pengujian yang digunakan dalam simulasi numerik untuk mendapatkan angka *crashworthiness* adalah metode *drop test*. Metode *drop test* merupakan salah satu metoda pengujian yang umum digunakan untuk mengevaluasi respon suatu struktur terhadap beban tumbukan. Metoda ini melibatkan penjatuhan beban impaktor (penumbuk) terhadap suatu struktur dari ketinggian tertentu serta evaluasi terhadap respon yang terjadi pada struktur yang diuji. Besaran *crashworthiness* yang dievaluasi adalah besarnya energi tumbukan yang diserap oleh struktur serta deformasi yang terjadi pada struktur tersebut.

Simulasi Pengujian *drop test* dalam penelitian ini menggunakan bola baja *stainless steel* sebagai impaktor (penumbuk) dengan memanfaatkan energy potensial dengan ketinggian jatuh tertentu. Objek pengukuran *crashworthiness* adalah material dengan struktur *honeycomb sandwich* dengan inti (core) yang berbentuk gelombang trapezoidal dua arah., seperti yang terlihat pada gambar 1.a dengan ukuran detail bentuk inti *honeycomb* terlihat pada gambar 1.b. adapun ketebalan dinding inti *honeycomb* adalah 0,3mm

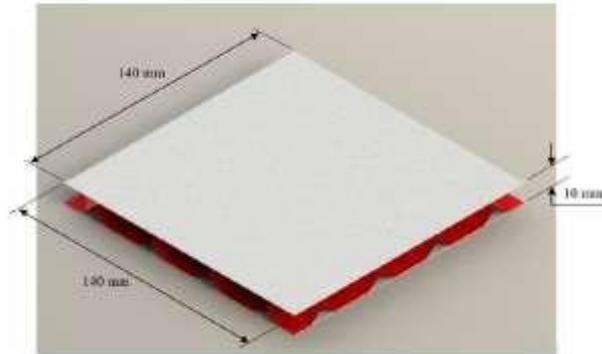


Gambar 1.a. inti honeycomb dengan bentuk gelombang trapezoidal 2 arah



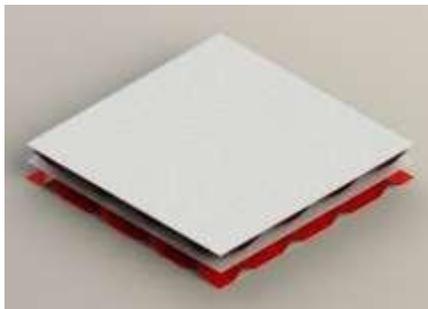
Gambar 1.b. ukuran detail inti honeycomb

Inti *honeycomb* yang berbentuk gelombang trapezoidal 2 arah yang terlihat pada gambar 1 itu diberi lapisan (*skin*) pada bagian atas dan bawahnya, hingga terbentuk panel *honeycomb sandwich* dengan satu lapisan inti *honeycomb* seperti yang terlihat pada gambar 2. Dalam gambar 2 terlihat juga ukuran panel specimen *honeycomb sandwich* untuk satu lapisan inti.



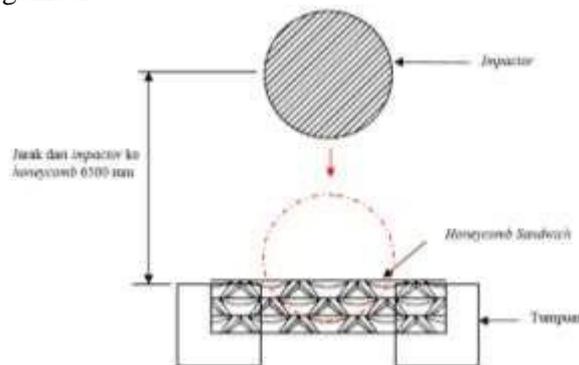
Gambar 2 Honeycomb sandwich 1 Lapis Inti

Dalam penelitian ini dibuat model panel specimen honeycomb sandwich dengan 3 variasi jumlah tumpukan (lapisan) inti honeycomb, yaitu 1 lapis inti, 2 lapis inti dan 3 lapis inti. Model panel specimen honeycomb sandwich dengan 1 lapisan inti terlihat pada gambar 2, model panel specimen dengan 2 lapisan inti terlihat pada gambar 3 dan model panel specimen dengan 3 lapisan inti terlihat pada gambar 4. Pemodelan objek yang terdiri dari *skin*, *core*, impaktor dan tumpuan yang digunakan dalam pengujian ini dibuat menggunakan *software Solidworks 2022*.



Gambar 3 Honeycomb sandwich 2 Lapis Inti **Gambar 4** Honeycomb sandwich 3 Lapis Inti

Skema pengujian *crashworthiness* pada *honeycomb sandwich two directional trapezoidal wave core* dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5 Skema Pengujian

Impaktor (penumbuk) yang digunakan adalah bola baja stainless steel dengan diameter 76,2mm dan massa sebesar 1,79 kg, seperti yang terlihat pada gambar 6.



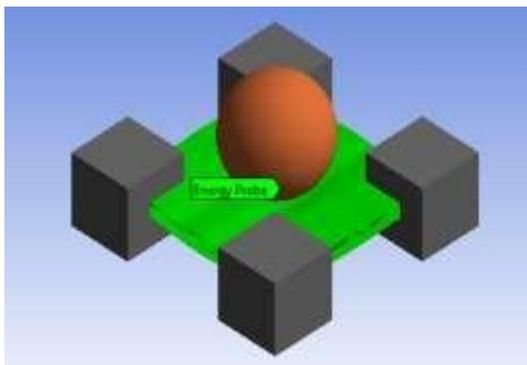
Gambar 6 impaktor stainless steel berdiameter 76,2mm

Kondisi batas yang diterapkan pada simulasi pengujian ini secara umum yakni, kondisi pertama *honeycomb sandwich* setiap variasi jumlah lapisan intinya dalam keadaan diam dengan tumpuan engsel di setiap sudutnya, kondisi kedua penumbuk dijatuhkan dari ketinggian 6500 mm terhadap *honeycomb sandwich*, kondisi ketiga gaya gravitasi secara umum digunakan sebesar 9,81 m/s, kondisi keempat waktu yang digunakan selama terjadinya tumbukan sebesar 0,005 s.

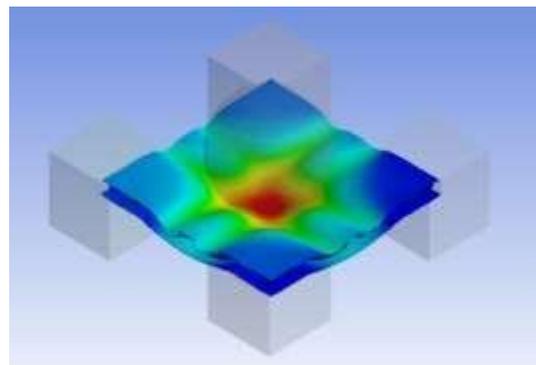
Parameter (indeks) *crashworthiness* yang umum digunakan untuk struktur *sandwich* adalah kedalaman lekukan akibat tumbukan, defleksi, area kerusakan dan penyerapan energi. Indeks *crashworthiness* ini telah diadopsi oleh para peneliti sebagai dasar untuk mempelajari strategi desain, metode pemodelan dan kerusakan struktur *sandwich*. Hal ini penting untuk dijadikan sebagai dasar dan panduan dalam pengembangan dan penerapan struktur *sandwich* [14]. Dalam penelitian ini, karakteristik *crashworthiness honeycomb sandwich* yang dievaluasi adalah besar energy yang diserap oleh struktur honeycomb sandwich serta deformasi yang terjadi pada struktur tersebut saat terjadi tumbukan.

3. Hasil Dan Pembahasan

Proses simulasi *drop test* terhadap tiga spesimen *honeycomb sandwich* dengan inti berbentuk gelombang trapezoidal dua arah terlihat pada gambar 7.a untuk specimen dengan satu lapis inti, gambar 8.a untuk specimen dengan 2 lapis inti dan gambar 9.a untuk specimen dengan 3 lapis inti. Gambar 7.b. memperlihatkan deformasi maksimal yang terjadi saat tumbukan.

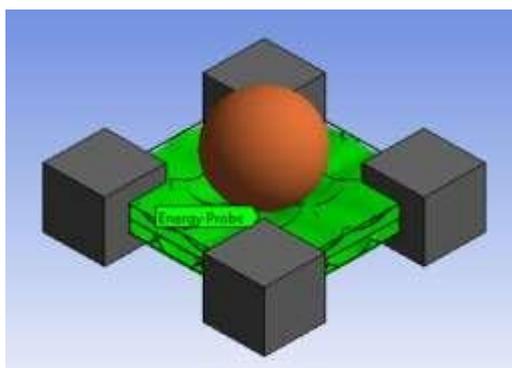


Gambar 7.a. simulasi pengujian drop test untuk specimen dengan 1 lapis inti honeycomb

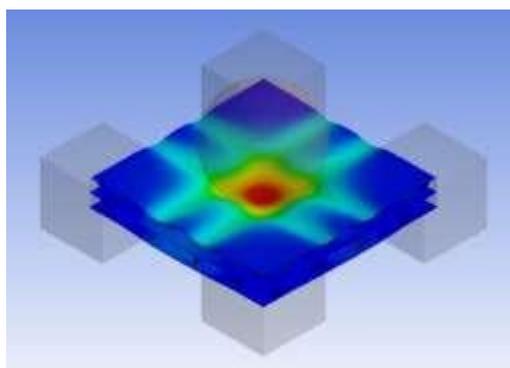


Gambar 7.b. deformasi maksimal yang terjadi saat pengujian drop test untuk specimen dengan 1 lapis inti honeycomb

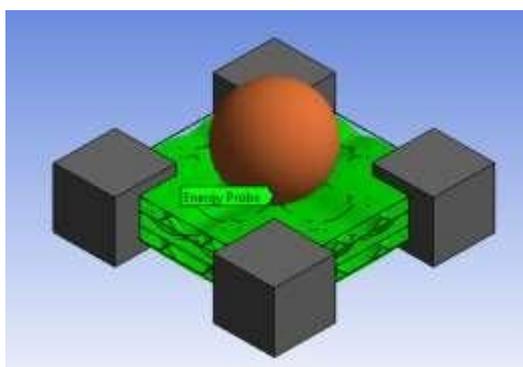
Gambar 7. Hasil Pengujian Simulasi 1 Lapisan Inti



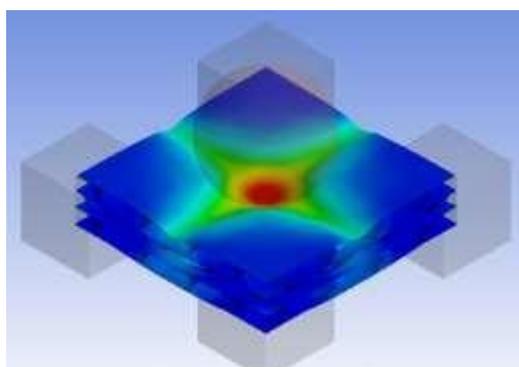
Gambar 8.a. simulasi pengujian drop test untuk specimen dengan 2 lapis inti honeycomb



Gambar 8.b. deformasi maksimal yang terjadi saat pengujian drop test untuk specimen dengan 2 lapis inti honeycomb



Gambar 9.a. simulasi pengujian drop test untuk specimen dengan 3 lapis inti honeycomb



Gambar 9.b. deformasi maksimal yang terjadi saat pengujian drop test untuk specimen dengan 3 lapis inti honeycomb

Setelah melalui proses simulasi pengujian drop test, diperoleh dan defleksi dan serapan energy untuk masing-masing specimen. Tabel 1 memperlihatkan pergerakan (perubahan) defleksi yang terjadi pada masing-masing specimen, mulai dari saat penumbuk menyentuh specimen ($t = 0$ detik), kemudian mencapai defleksi maksimum hingga defleksi mengecil kembali ketika impaktor memantul ke arah atas. Perubahan defleksi ini dicatat dalam rentang waktu 0 sampai 0,0050 detik. Data yang diberi *highlight* merah adalah defleksi maksimum yang terjadi pada setiap spesimen

Tabel 1 Perubahan defleksi yang terjadi pada specimen terhadap waktu

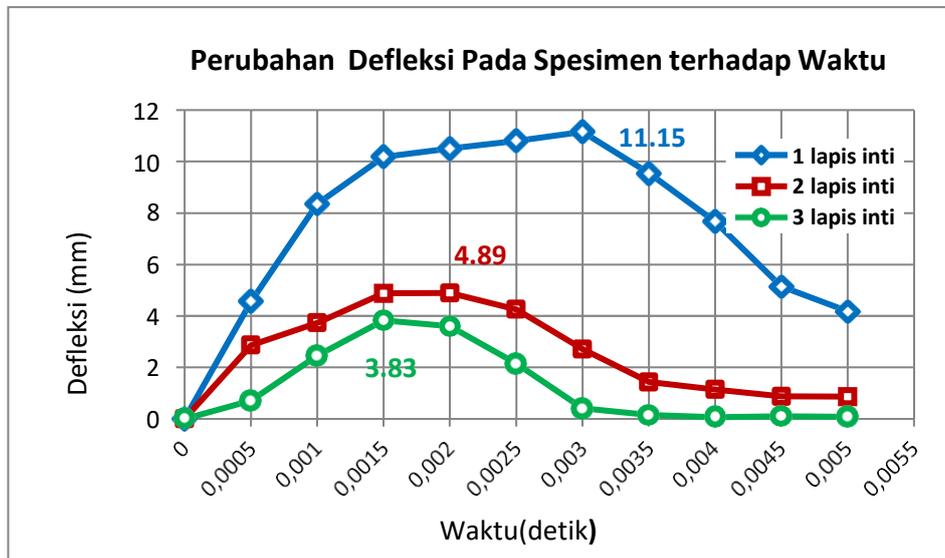
No	Waktu (s)	Maksimum Defleksi (mm)		
		1 lapis inti	2 lapis inti	3 lapis inti
1	0	0	0	0
2	0.0005	4.56	2.86	0.71
3	0.0010	8.35	3.73	2.46
4	0.0015	10.18	4.88	3.83
5	0.0020	10.5	4.89	3.6
6	0.0025	10.8	4.25	2.15
7	0.0030	11.15	2.71	0.41
8	0.0035	9.54	1.43	0.15
9	0.0040	7.66	1.14	0.07
10	0.0045	5.14	0.87	0.11
11	0.0050	4.17	0.86	0.08

Tabel 2 memperlihatkan pergerakan (perubahan) serapan energy oleh masing-masing specimen, mulai dari saat penumbuk menyentuh specimen ($t = 0$ detik), kemudian mencapai serapan energi maksimum hingga serapan energi mengecil kembali ketika impaktor memantul ke arah atas. Perubahan serapan energi ini dicatat dalam rentang waktu 0 sampai 0,0050 detik. Data yang diberi *highlight* merah adalah serapan energi maksimum oleh setiap spesimen

Tabel 2 Perubahan serapan energi yang terjadi pada specimen terhadap waktu

No	Waktu	Serapan Energi (Joule)		
		1 lapis inti	2 lapis inti	3 lapis inti
1	0.0000	0	0	0
2	0.0005	15.38	30.9	10.46
3	0.0010	43.42	62.38	62.09
4	0.0015	74.06	99.17	125.62
5	0.0020	94.27	115.88	106.37
6	0.0025	106.6	98.7	57.48
7	0.0030	106.85	67.66	24.23
8	0.0035	95.44	43.83	15.65
9	0.0040	75.38	29.73	13.69
10	0.0045	52.64	26.82	12.71
11	0.0050	31.74	24.32	12.72

Dari data pada tabel 1 dibuat grafik pada gambar 10 yang memperlihatkan perubahan defleksi pada masing-masing spesimen terhadap waktu selama rentang waktu pengujian, serta perbandingan defleksi dari masing-masing specimen yang memiliki perbedaan jumlah lapisan inti.

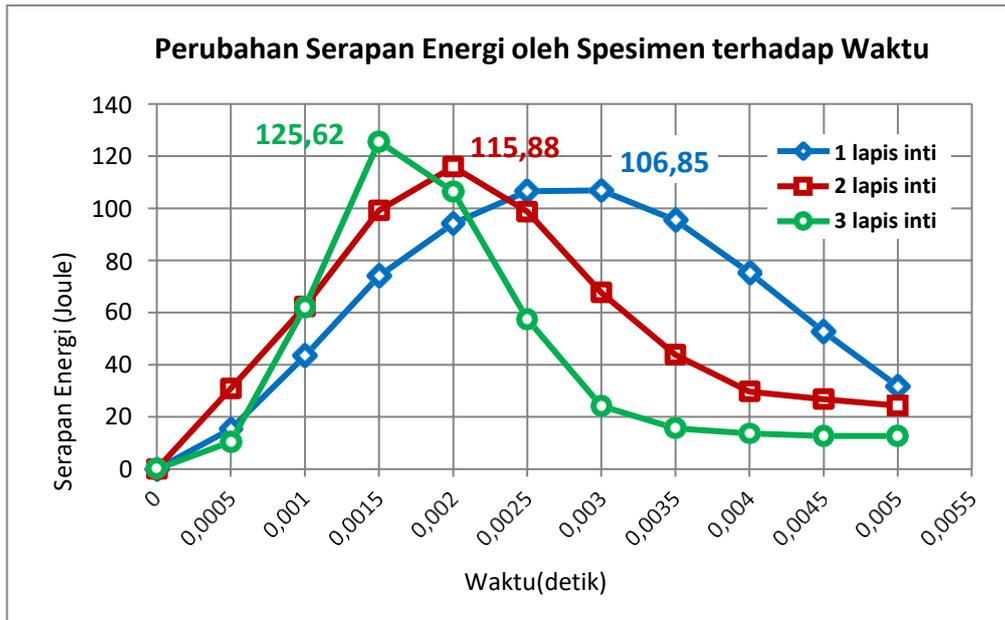


Gambar 10 Grafik perubahan defleksi masing-masing spesimen terhadap waktu

Pada grafik dalam gambar 10 terlihat bahwa specimen dengan satu lapis inti mengalami defleksi maksimum yang paling besar di antara ketiga variasi jumlah lapisan inti, yaitu mencapai 11,15 mm yang terjadi pada waktu 0,0030 s. Panel specimen honeycomb sandwich dengan 2 lapis inti mengalami defleksi maksimum sebesar 4,89 mm pada waktu 0,0020 s. Sedangkan pada panel specimen honeycomb sandwich 3 lapis inti terjadi defleksi maksimum terkecil dibandingkan 2 spesimen lainnya yaitu sebesar 3,77 mm pada waktu 0,0015 s.

Specimen dengan jumlah lapisan inti lebih banyak mengalami defleksi yang lebih kecil karena jumlah lapisan inti yang lebih banyak akan meningkatkan kemampuan specimen dalam menahan beban. Kemampuan specimen dalam menahan beban datang dari momen inersia penampang. Momen inersia penampang spesimen yang lebih besar akan meningkatkan kekakuan dan kekakuan yang lebih tinggi mencegah terjadinya defleksi pada specimen.

Dari data pada tabel 2 dibuat grafik perubahan serapan energi terhadap waktu selama rentang waktu pengujian untuk masing-masing spesimen, serta perbandingan serapan energi dari masing-masing spesimen yang memiliki perbedaan jumlah lapisan inti, sebagaimana yang terlihat pada gambar 11.



Gambar 11. Grafik perubahan serapan energi terhadap waktu untuk masing-masing spesimen

Pada grafik dalam gambar 11 terlihat bahwa ketiga panel spesimen honeycomb sandwich menunjukkan perbedaan kemampuan menyerap energy walaupun tidak terlihat signifikan. Kemampuan menyerap energi tertinggi ditunjukkan oleh specimen dengan 3 lapisan inti, yaitu sebesar 125,62 Joule. Specimen dengan 2 lapisan inti mampu menyerap energy sebesar 115,88 Joule sedangkan spesimen dengan 1 lapisan inti mampu menyerap energy sebesar 106,85 Joule.

Honeycomb sandwich memiliki struktur dengan inti yang terbentuk dari sel-sel berongga yang tersusun dengan rapat dan kompak. Dinding-dinding sel inti honeycomb terikat kuat dan mengunci antara satu dengan lainnya, sehingga terbentuk struktur yang kuat dan kokoh. Tidak mudah untuk melepaskan satu sel dengan sel-sel yang terikat di sebelahnya. Hal ini membuat honeycomb sandwich memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi. Penambahan jumlah lapisan inti pada struktur sandwich tentu akan meningkatkan jumlah sel inti honeycomb yang tentunya juga akan membentuk struktur penguat yang lebih banyak dan lebih kompleks. Jadi sangat wajar jika spesimen yang memiliki jumlah lapisan inti lebih banyak memiliki kemampuan menahan beban

Penambahan lapisan inti pada specimen honeycomb sandwich akan meningkatkan angka momen inersia penampang. Peningkatan momen inersia penampang akan berdampak kepada peningkatan kemampuan menahan beban, sebagaimana juga memberikan dampak terhadap peningkatan kekakuan dan mengurangi defleksi. Kemampuan material dalam menahan beban dapat juga dipandang dari sisi lain, yaitu kemampuan material dalam menyerap energi. Dengan demikian,

penambahan jumlah lapisan pada spesimen honeycomb sandwich memberikan dampak terhadap peningkatan kemampuannya menyerap energy.

Struktur material yang berlapis juga menjadi kunci dalam kemampuannya menyerap energi, dimana beban tumbukan yang diterima oleh struktur material akan terjadi secara bertahap, mulai dari permukaan paling atas yang menerima tumbukan secara langsung, kemudian diteruskan ke lapisan berikutnya yang berada di bawahnya hingga mencapai lapisan paling bawah. Respon material dalam penyerapan energi bisa ditunjukkan dalam bentuk defleksi, baik defleksi elastis maupun defleksi plastis. Pada material dengan struktur honeycomb sandwich dengan inti yang berongga, defleksi sebagai bentuk penyerapan energy juga terjadi di tingkat sel inti. Defleksi yang terjadi di tingkat sel inti juga terjadi secara bertahap dari sel pada lapisan teratas sampai ke lapisan terbawah. Keuntungan yang dapat diambil dari terjadinya defleksi di tingkat sel inti adalah bahwa defleksi yang terjadi dapat terdistribusi ke banyak sel inti sehingga beban tumbukan yang diterima oleh material akan tersebar ke area yang lebih luas.

Mekanisme penyerapan energi yang terjadi secara bertahap pada material dengan struktur berlapis bisa memberikan keuntungan dalam hal keamanan dan ketahanan terhadap kerusakan. Penyerapan energi yang terjadi secara bertahap akan dimulai dari lapisan paling atas. Lapisan yang paling atas dari material dengan struktur berlapis akan menerima dan menyerap energi tumbukan paling besar, kemudian lapisan kedua akan menerima sisa energi tumbukan yang tidak terserap di lapisan paling atas. Dan jika energi dari tumbukan sudah habis terserap oleh lapisan bagian atas, maka lapisan bagian bawah tidak perlu menyerap energi tumbukan. Hal ini berarti bahwa lapisan paling bawah mungkin saja tidak mendapatkan beban tumbukan sehingga tidak mengalami kerusakan walaupun lapisan terluar (teratas) mengalami kerusakan. Hal ini berarti juga bahwa penumpang ataupun muatan yang ada di dalamnya akan tetap aman.

Grafik pada gambar 11 juga memberikan informasi yang menarik yaitu waktu serapan energinya, dimana spesimen dengan jumlah lapisan inti lebih banyak menyerap energi dalam waktu yang lebih cepat disamping mampu menyerap energy lebih besar. Sementara spesimen dengan jumlah lapisan inti yang lebih sedikit memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai serapan energy yang maksimal dan kemampuannya menyerap energinya pun lebih rendah. Specimen dengan 3 lapisan inti mampu menyerap energy maksimum (125,62 Joule) dalam waktu 0,0015 detik, 2 kali lebih cepat daripada waktu yang dibutuhkan oleh specimen dengan 1 lapisan inti, yaitu 0,0030 detik dengan serapan energy 106,85 Joule. Hal ini menunjukkan bahwa material honeycomb sandwich dengan jumlah lapisan inti lebih banyak akan memberikan 2 keuntungan, yaitu serapan energi yang lebih besar dan waktu serapan energy yang lebih singkat. Dua hal ini akan memberikan kontribusi positif terhadap keamanan penumpang ataupun muatan yang ada di dalam kendaraan dengan *body shell* yang dibuat dengan struktur honeycomb sandwich.

4. Kesimpulan

Dari simulasi pengujian yang telah dilakukan dengan menggunakan software diketahui bahwa maksimum defleksi terjadi pada struktur *honeycomb sandwich two directional trapezoidal wave core* berbahan dasar komposit fiberglass dengan jumlah 1 lapisan inti, yaitu sebesar 11,15 mm dengan waktu 0,0030 detik. Specimen honeycombsandwich dengan 2 lapisan inti mengalami defleksi maksimum sebesar 4,89 mm dengan waktu 0,0020 detik, dan specimen dengan 3 lapisan inti mengalami defleksi sebesar 3,77 mm dengan waktu 0,0015 detik.

Simulasi pengujian crashworthiness juga memberikan angka energi maksimum yang dapat diserap oleh masing-masing specimen dengan 3 variasi jumlah lapisan inti honeycomb. Specimen honeycomb sandwich dengan 3 lapisan inti adalah specimen yang mampu menyerap energy paling besar, yaitu sebesar 125,62 Joule yang diserap dalam waktu 0,0015 detik. Specimen dengan 2 lapisan inti honeycomb dapat menyerap energi sebesar 115,88 Joule yang diserap dalam waktu 0,0020 detik. Specimen dengan 1 lapisan inti honeycomb dapat menyerap energi sebesar 106,85 Joule yang diserap dalam waktu 0,0030 detik.

5. Daftar Pustaka

- [1] Muzamil Hussain, Rafiullah Khan, Naseem Abbas, (2019) “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] Pankaj Prakash Ande, (2018) “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.
- [3] Shujuan Hou, Lili Ren, Duo Dong and Xu Han, (2012) “Crashworthiness optimization design of honeycomb sandwich panel based on factor screening”, *Journal of Sandwich Structures and Materials* 0(00) 1–24, DOI: 10.1177/1099636212445057
- [4] David M. Garner & Daniel O. Adams, (2008) “Test Methods for Composites Crashworthiness : A Review “, *Journal of Advanced Material- Covina* – 40 (4), pp 5-26.
- [5] Felix Dionisius, Joe Istiyanto, Suliono dan Yusup Nur Rohman, (2017), “Pengembangan Pengujian Crashworthiness dengan Simulasi Nomerik Menggunakan Model Impact Transferability, *Jurnal Teknologi Terapan*, Volume 3, Nomor 1, ISSN 2477-3506, pp 12-17
- [6] N Nasir Hussain , Srinivasa Prakash Regalla, Yendluri V Daseswara Rao, Tatapipta Dirgantara, Leonardo Gunawan and Annisa Jusuf, (2021) “Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material” *Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications* 2021, Vol. 235(1) 114–130 [sagepub.com/journals-permissions DOI: 10.1177/1464420720952813](https://doi.org/10.1177/1464420720952813)
- [7] Marsono, Ali, Nico Luwis, (2019), “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.
- [8] Marsono, Daud Haluk. (2021). Karakteristik Mekanik Honeycomb Sandwich Komposit Fiberglass dengan Dimensi Cell-Pitch 40mm dan Cell-Height 15mm. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, Vol. 16 No. 1, pp. 4-10.
- [9] Annamalai, & Balaji, G. (2018). Numerical Investigation of Aluminum Honeycomb Filled High Strength Steel Crash Box for the Effect of Honeycomb Physical Parameters on Crashworthiness Constant. *International Journal of Automotive Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.22068/ijae.8.1.2650>
- [10] Davide Tumino, Tommaso Ingrassia, Vincenzo Nigrelli, Giuseppe Pitarresi, Vincenzo Urso Miano, (2014), “Mechanical behavior of a sandwich with corrugated GRP core: numerical modeling and experimental validation”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 30 pp 317-326, DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.39
- [11] Kurtaran, H., Eskandarian, A., Marzougui, D., & Bedewi, N. E. (2002). Crashworthiness design optimization using successive response surface approximations. *Computational Mechanics*, 29(4–5), 409–421. <https://doi.org/10.1007/s00466-002-0351-x>
- [12] Marsono, Ferry Hidayat, & Gregorius Pain Purap, (2019) Karakteristik Bending Struktur Berlapis dengan Inti Berbentuk Gelombang Trapezoidal Dua Arah. *Jurnal Rekayasa Energi Dan Mekanika*, Vol.1. no2, 89. <https://doi.org/10.26760/jrem.v1i2.89>
- [13] Li Meng, Deng Zongquan, Guo Hongwei, Liu Rongqiang, and Ding Beichen, (2013), “Crashworthiness Analysis on Alternative Square Honeycomb Structure under Axial Loading”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp 784-792, DOI: 10.3901/CJME.2013.04.784,
- [14] Wang, Z., Wang, X., Liu, K., Zhang, J., & Lu, Z. (2021). Crashworthiness index of honeycomb sandwich structures under low-speed oblique impact. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 208, 15 Oktober2021,106683. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106683>