



Pengaruh Ketebalan *Core* dan Jumlah *Layer Skin* terhadap Kekuatan Bending Komposit Sandwich Skin Fiberglass dengan *Core* Kardus Tipe A-Flute

Pires Hanif Palarto¹, Hilmi Iman Firmansyah^{2*}

¹⁻²Program Studi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: firmanyahilmi@polinema.ac.id

Abstract. Sandwich composites are lightweight structural materials with a high strength-to-weight ratio and have potential as alternatives to conventional materials. This study aims to analyze the effects of core thickness variation and the number of skin layers on the bending strength of fiberglass-skinned sandwich composites with an A-flute cardboard honeycomb core. The research employed an experimental method using three-point bending tests in accordance with ASTM C393. Core thicknesses of 10 mm, 20 mm, and 30 mm were investigated, while the number of fiberglass skin layers was varied at 1, 2, and 4 layers. Bending strength was evaluated based on core shear strength and skin bending stress, expressed in MPa. The results show that the highest average core shear strength was obtained at a core thickness of 10 mm with 4 skin layers, while the lowest value occurred at a core thickness of 30 mm with 1 skin layer. The highest skin bending stress of 43.40 MPa was achieved by the specimen with a 10 mm core thickness and 1 skin layer, whereas the lowest value of 11.83 MPa was observed at a 30 mm core thickness with 4 skin layers. These results indicate that increasing core thickness tends to reduce bending strength based on core shear strength, while increasing the number of skin layers enhances the bending performance of the sandwich composite, and an interaction effect between the two variables is present.

Keywords: Bending Strength; Core Shear Strength; Core Thickness; Sandwich Composite; Skin Bending Stress.

Abstrak. Komposit sandwich merupakan material struktural ringan yang memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi sehingga berpotensi digunakan sebagai alternatif material konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ketebalan core dan jumlah layer skin terhadap kekuatan bending komposit sandwich skin fiberglass dengan core honeycomb kardus tipe A-flute. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan pengujian bending three-point bending mengacu pada standar ASTM C393. Variasi ketebalan core yang digunakan adalah 10 mm, 20 mm, dan 30 mm, sedangkan jumlah layer skin fiberglass divariasikan sebanyak 1, 2, dan 4 layer. Parameter kekuatan bending dianalisis berdasarkan nilai core shear strength dan skin bending stress dalam satuan MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata core shear strength tertinggi diperoleh pada ketebalan core 10 mm dan jumlah layer skin 4 layer, sedangkan nilai terendah terjadi pada ketebalan core 30 mm dan jumlah layer skin 1 layer. Nilai skin bending stress tertinggi sebesar 43,40 MPa diperoleh pada spesimen dengan ketebalan core 10 mm dan 1 layer skin, sedangkan nilai terendah sebesar 11,83 MPa terjadi pada ketebalan core 30 mm dan 4 layer skin. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan core cenderung menurunkan kekuatan bending berdasarkan core shear strength, sedangkan penambahan jumlah layer skin meningkatkan kinerja bending komposit sandwich, serta terdapat interaksi antara kedua variabel tersebut.

Kata Kunci: Kekuatan Bending; Kekuatan Geser Core; Ketebalan Core; Komposit Sandwich; Tegangan Lentur Skin.

1. LATAR BELAKANG

Dalam industri transportasi dan konstruksi, kebutuhan akan material yang ringan namun memiliki kekuatan tinggi terus meningkat seiring tuntutan efisiensi energi dan performa struktural. Pada sektor otomotif, pengurangan berat kendaraan secara signifikan berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi bahan bakar dan performa operasional, di mana reduksi berat sekitar 10% dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi bahan bakar sebesar 6–8% (Ali et al., 2022).

Hal serupa juga berlaku pada industri kedirgantaraan, di mana material ringan berperan dalam meningkatkan kapasitas muatan serta menurunkan konsumsi bahan bakar (Prayoga et al., 2018). Kondisi ini mendorong pengembangan material komposit dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi sebagai solusi struktural yang lebih efisien.

Material komposit sandwich menjadi salah satu alternatif yang banyak dikembangkan karena kemampuannya mengombinasikan kekuatan tinggi dan bobot ringan melalui konfigurasi dua lapisan skin dan satu lapisan core. Skin berfungsi menahan tegangan tarik dan tekan akibat pembebanan lentur, sedangkan core berperan dalam mendistribusikan beban geser serta meningkatkan kekakuan struktur secara keseluruhan (Marsono et al., 2021). Penggunaan fiberglass sebagai material skin memberikan keunggulan berupa kekuatan spesifik tinggi dan ketahanan terhadap korosi, sementara core berbahan kardus tipe A-flute menawarkan kelebihan berupa bobot ringan, biaya rendah, serta potensi daur ulang yang mendukung aspek keberlanjutan (Mutasiana et al., 2014)

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi ketebalan core dan jumlah layer skin berpengaruh signifikan terhadap kekuatan bending komposit sandwich, di mana peningkatan ketebalan inti dapat meningkatkan kekuatan lentur hingga batas tertentu (Zainuri & Zaidan, 2011). Namun, kajian mengenai kombinasi core honeycomb berbahan kardus A-flute dengan skin fiberglass masih memerlukan eksplorasi lebih lanjut, khususnya dalam kaitannya dengan efisiensi kekuatan terhadap bobot dan mekanisme kegagalan struktural. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ketebalan core dan jumlah layer skin terhadap kekuatan bending komposit sandwich berdasarkan standar ASTM C393-94, guna memperoleh konfigurasi struktur yang optimal untuk aplikasi ringan di bidang otomotif, kedirgantaraan, dan konstruksi.

2. KAJIAN TEORITIS

Kajian teoritis dalam penelitian ini disusun untuk mendukung analisis terhadap variabel utama, yaitu variasi ketebalan core, jumlah layer skin, dan kekuatan bending pada komposit sandwich skin fiberglass dengan core honeycomb kardus tipe A-flute.

Komposit sandwich merupakan struktur yang terdiri dari dua lapisan luar (skin) yang kuat dan kaku serta satu lapisan inti (core) yang relatif ringan, sehingga menghasilkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan banyak digunakan pada aplikasi struktural ringan. Pada pembebanan lentur, skin berfungsi menahan tegangan tarik dan tekan akibat momen lentur, sedangkan core berperan menahan gaya geser serta menjaga jarak antar skin untuk meningkatkan momen inersia penampang.

Oleh karena itu, karakteristik mekanik komposit sandwich sangat dipengaruhi oleh konfigurasi dan sifat mekanik masing-masing komponen penyusunnya. Skin umumnya menggunakan material berkekuatan tinggi seperti fiberglass woven roving dengan orientasi serat dua arah ($0^\circ/90^\circ$), yang mampu menahan beban tarik dan tekan secara seimbang serta mudah difabrikasi. Penambahan jumlah layer skin dapat meningkatkan kekakuan lentur dan kapasitas penahan momen, namun juga memengaruhi distribusi tegangan serta mekanisme kegagalan struktur. Sementara itu, core berfungsi sebagai elemen penahan geser dan penopang stabilitas skin. Struktur honeycomb dikenal efisien dalam menghasilkan kekuatan dengan bobot ringan, dan kardus tipe A-flute sebagai material berbasis kertas memiliki bentuk gelombang yang menyerupai honeycomb sederhana, berbiaya rendah, mudah diperoleh, serta berpotensi digunakan sebagai alternatif core ringan. Namun, sifat mekaniknya yang relatif lebih lunak menyebabkan deformasi geser menjadi faktor dominan dalam respons bending struktur sandwich.

Evaluasi kekuatan bending komposit sandwich umumnya dilakukan melalui parameter core shear strength dan skin bending stress yang dihitung berdasarkan metode three-point bending sesuai standar ASTM C393, karena parameter tersebut lebih representatif dalam menggambarkan kontribusi mekanik masing-masing komponen dibandingkan hanya beban maksimum. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan core dapat meningkatkan kapasitas beban absolut hingga batas tertentu, namun juga berpotensi meningkatkan deformasi geser yang menurunkan tegangan efektif, sedangkan penambahan jumlah layer skin cenderung meningkatkan kekakuan dan kekuatan lentur. Meskipun demikian, kajian mengenai interaksi antara ketebalan core berbahan kardus A-flute dan jumlah layer skin fiberglass terhadap kekuatan bending masih terbatas, sehingga penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh masing-masing variabel serta interaksi keduanya sebagai dasar pengembangan material sandwich yang ringan, ekonomis, dan efisien secara struktural.

Penelitian ini didasarkan pada penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi referensi penting dalam pembahasan Adapun penelitian-penelitian pendukung yang menjadi landasan utama dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

Penelitian ini mengkaji tentang Pengujian tarik, tekan dan lentur bahan busa komposit sebagai material baru, penelitian ini melibatkan 9 variasi resin yang diuji, dan pengujian dilakukan di laboratorium menggunakan mesin *Universal testing Machine* (UTM). Hasil pengujian tekan menunjukkan penambahan pengencer resin memberikan peningkatan signifikan pada kekuatan mekanis komposit..(Alam et al., 2024)

Penelitian mengenai pengaruh variasi ketebalan core terhadap kekuatan bending pada komposit sandwich menunjukkan bahwa penambahan ketebalan core mengurangi tegangan bending yang diterima komposit. Hasil uji bending tertinggi yaitu 17,47 Mpa, sementara untuk ketebalan core 40 mm, nilai tegangan bending menurun hingga 4,40 Mpa (Mutasiana et al., 2014)

Penelitian mengenai penggunaan honeycomb pada balok komposit dengan struktur inti segitiga memperlihatkan bahwa ketebalan dinding sel core honeycomb sangat mempengaruhi kekuatan lentur dan kekakuan. Semakin tebal dinding sel honeycomb, semakin besar kekuatan lentur yang dihasilkan pada struktur komposit. Penambahan fiberglass pada core honeycomb juga memberikan peningkatan signifikan pada kekuatan bending. (Ali et al., 2022)

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi ketebalan skin terhadap kekuatan bending dan tarik komposit sandwich. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin banyak lapisan pada skin (2,3,4 lapis), semakin besar kekuatan bending yang dihasilkan. Komposit dengan skin 4 lapis mencatatkan kekuatan 11,11% lebih tinggi dibandingkan dengan 2 skin lapis. (Prayoga et al., 2018)

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan material komposit sandwich yang terdiri dari lapisan skin fiberglass dan core honeycomb kardus tipe A-flute. Material skin yang digunakan adalah fiberglass woven roving dengan orientasi serat dua arah ($0^{\circ}/90^{\circ}$), sedangkan material core berupa kardus bergelombang tipe A-flute. Matriks yang digunakan dalam proses laminasi adalah resin epoxy dengan hardener sebagai bahan pengeras. Variasi ketebalan core yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10 mm, 20 mm, dan 30 mm, sedangkan jumlah layer skin fiberglass divariasikan sebanyak 1, 2, dan 4 layer.

Pembuatan spesimen komposit sandwich dilakukan menggunakan metode vacuum bagging untuk memastikan impregnasi resin yang merata dan meminimalkan kandungan void pada struktur komposit. Proses fabrikasi diawali dengan pemotongan material core dan skin sesuai dimensi spesimen uji, dilanjutkan dengan proses laminasi skin fiberglass pada kedua sisi core menggunakan resin epoxy. Setelah proses laminasi, spesimen dikondisikan hingga mencapai proses curing sempurna sebelum dilakukan pengujian mekanik.

Pengujian mekanik yang dilakukan pada penelitian ini adalah uji bending menggunakan metode three-point bending yang mengacu pada standar ASTM C393-94. Pengujian dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dengan jarak tumpuan (span) dan dimensi spesimen yang disesuaikan dengan ketentuan standar.

Beban diberikan secara bertahap hingga spesimen mengalami kegagalan, dan data beban serta defleksi dicatat secara kontinu selama pengujian berlangsung. Spesimen dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Spesimen.

Kekuatan bending komposit sandwich dianalisis menggunakan parameter *core shear strength* dan *skin bending stress*. Beban maksimum hasil pengujian dikonversi ke dalam satuan Newton sebelum digunakan dalam perhitungan. Data hasil pengujian diolah menggunakan statistik deskriptif untuk memperoleh nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi. Selanjutnya, analisis varians (ANOVA) dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi ketebalan core, jumlah layer skin, serta interaksi keduanya terhadap kekuatan bending dengan tingkat kepercayaan 95%

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini juga mempertimbangkan fraksi volume material penyusun sandwich, yang terdiri dari core kardus, skin fiberglass, dan matriks resin poliester. Fraksi volume ini dihitung dalam satuan presentase (%) terhadap volume total spesimen pada tabel berikut.

Tabel 1. Fraksi Volume.

Tebal Core (mm)	Jumlah Layer	Presentase Komposisi %		
		Core Kardus	Skin Fiberglass	Matrix Resin Polyester
10	1	66	17	18
	2	52	24	23
	4	43	30	38
20	1	70	9	21
	2	63	15	22
	4	45	24	32
30	1	71	6	23
	2	63	11	26
	4	54	20	26

Hasil Pengujian

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik kekuatan lentur komposit sandwich sebagai respon terhadap variasi yang ditentukan, seperti jumlah layer skin dan ketebalan core. Data Pengujian diperoleh dari hasil uji menggunakan alat Universal Testing Machine di Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang. Setiap variasi spesimen di uji sebanyak tiga kali untuk memperoleh data yang representatif.



Gambar 2. Proses Pengujian Lengkung.

Hasil pengujian ditampilkan pada tabel 1 yang menunjukkan kekuatan bending dalam satuan kg dan dikoneversi ke N untuk setiap variasi spesimen pada masing-masing pengujian. Beban maksimum yang diperoleh dari pengujian mekanik dicatat dalam satuan kilogram (Kg) sesuai dengan pembacaan pada mesin uji. Namun, dalam analisis mekanika sturktur, besaran beban harus dinyatakan dalam satuan gaya, yaitu Newton (N). Oleh karena itu, data beban maksimum yang diperoleh dari hasil pengujian terlebih dahulu dikonversi dari satuan kilogram menjadi newton.

Tabel 2. Data Pengujian Bending.

Tebal Core (mm)	Jumlah Layer	Beban max Kg			Rata-rata (N)
		Pengujian 1	Pengujian 2	Pengujian 3	
10	1	45.2	52.1	49.3	479.4
	2	70.4	78.2	74.5	729.5
	4	115.6	123.1	119.4	1171.0
20	1	60.3	66.5	63.2	621.3
	2	88.7	95.4	92.1	903.2
	4	135.2	142.6	138.3	1360.6
30	1	75.8	82.4	79.1	776.0
	2	110.5	118.2	114.6	1122.6
	4	160.7	168.3	164.9	1615.1

Konversi dilakukan dengan menggunakan persamaan dasar gaya berat sebagai berikut:

$$P = m \times g$$

Dengan:

P :gaya (N)

m :massa beban (kg)

g :Percepatan gravitasi bumi, yang dalam penelitian ini diambil sebesar 9.81 m/s

Sebagai contoh, apabila beban maksimum yang tercatat sebesar 45,2 kg, maka gaya yang bekerja pada spesimen dihitung sebagai:

$$P = 45,2 \times 9,81 = 443,4 \text{ N}$$

Beban maksimum yang diperoleh dari pengujian selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menghitung parameter kekuatan bending, yang dalam penelitian ini di analisis melalui dua mekanisme utama, yaitu kekuatan geser core (core shear strength) dan tegangan lentur pada skin (*skin bending stress*). Analisis dua parameter ini diperlukan untuk menentukan mekanisme kegagalan dominan pada struktur sandwich

Core Shear Strength

a) Hasil Pengujian

Tabel 3. Hasil Pengujian.

Tebal core (mm)	Jumlah layer	Pengujian (MPa)			Rata-rata
		1	2	3	
10	1	0.294	0.340	0.320	0.318
	2	0.458	0.51	0.484	0.484
	4	0.752	0.804	0.778	0.778
20	1	0.196	0.216	0.206	0.206
	2	0.288	0.311	0.301	0.300
	4	0.441	0.464	0.451	0.452
30	1	0.164	0.179	0.172	0.172
	2	0.240	0.257	0.249	0.249
	4	0.349	0.366	0.358	0.358

Kekuatan geser core dihitung menggunakan persamaan berikut

$$\tau_{\text{core}} = \frac{P}{2bc}$$

Dengan:

τ_{core} : kekuatan geser core (MPa)

P : Beban maksimum hasil pengujian (N)

b : Lebar spesimen (mm)

c : Ketebalan core (mm)

Sebagai contoh:

$$\tau_{\text{core}} = \frac{443,4}{2 \times 75 \times 10}$$

$$\tau_{\text{core}} = \frac{443,4}{1500}$$

$$\tau_{\text{core}} = 0,295 \text{ MPa}$$

Hasil perhitungan kekuatan geser core untuk variasi spesimen disajikan pada tabel 3. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa peningkatan jumlah layer skin cenderung meningkatkan nilai beban maksimum, yang berimplikasi pada meningkatnya nilai kekuatan geser core. Sebaliknya, peningkatan ketebalan core tidak selalu menghasilkan peningkatan kekuatan geser, yang menunjukkan bahwa perilaku struktur sandwich dalam penelitian ini dikontrol oleh sifat geser material core.

b) Analisa ANOVA (*Analysis of Variance*)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0.663637	0.082955	393.71	0.000
Linear	4	0.642714	0.160679	762.59	0.000
Tebal Core	2	0.292523	0.146262	694.17	0.000
Jumlah Layer	2	0.339905	0.169952	806.61	0.000
2-Way Interactions	4	0.058329	0.014582	69.21	0.000
Tebal Core*Jumlah Layer	4	0.058329	0.014582	69.21	0.000
Error	15	0.003161	0.000211		
Total	23	0.666798			

Gambar 3. *Analysis of Variance.*

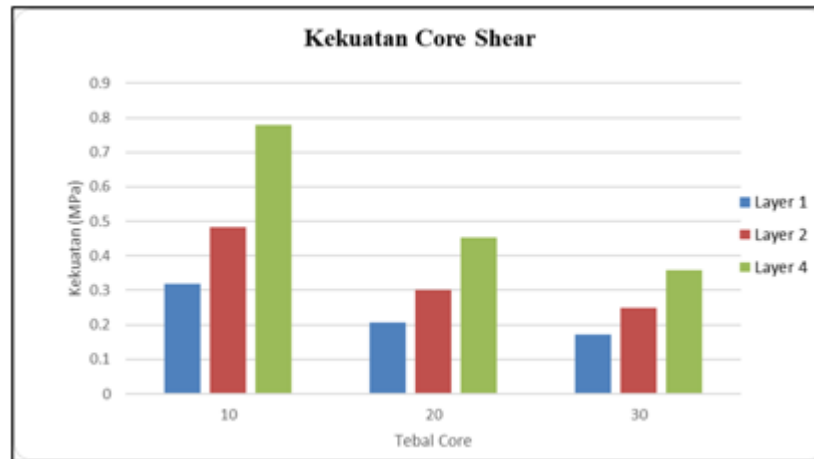
Tabel X menyajikan hasil analisis varians (ANOVA) untuk data core shear strength. Berdasarkan tabel tersebut, nilai p-value untuk faktor ketebalan core dan jumlah layer skin masing-masing bernilai lebih kecil dari 0,05, yang menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap nilai core shear strength. Selain itu, hasil ANOVA juga menunjukkan bahwa interaksi antara ketebalan core dan jumlah layer skin memiliki nilai p-value yang lebih kecil dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaruh ketebalan core terhadap core shear strength bergantung pada jumlah layer skin yang digunakan, dan sebaliknya.

Nilai F-value yang relatif tinggi pada faktor jumlah layer skin menunjukkan bahwa faktor ini memberikan kontribusi pengaruh yang lebih dominan terhadap variasi nilai core shear strength dibandingkan dengan ketebalan core.

Sementara itu, nilai galat (error) yang relatif kecil mengindikasikan bahwa variasi data yang tidak dapat dijelaskan oleh model berada pada tingkat yang rendah, sehingga model statistik yang digunakan cukup representatif dalam menggambarkan hubungan antara variabel bebas dan respons yang dianalisis

c) Analisis Visual Data

Analisis visual data digunakan untuk memperjelas dan memperkuat hasil analisis statistik melalui penyajian hubungan antara ketebalan core dan jumlah layer skin terhadap nilai core shear strength. Penyajian data secara visual bertujuan untuk memudahkan interpretasi kecenderungan pengaruh masing-masing faktor utama terhadap respons kekuatan geser core yang dihasilkan.



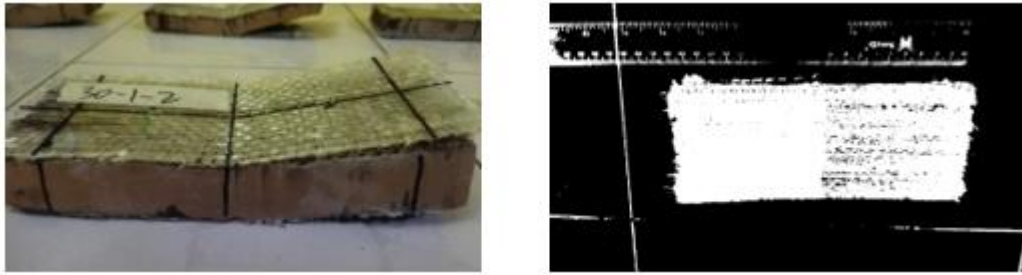
Gambar 4. Grafik Kekuatan *Core Shear*.

Grafik kekuatan core shear menunjukkan pengaruh variasi tebal core dan jumlah layer skin terhadap kemampuan panel sandwich dalam menahan tegangan geser pada bagian core. Pada struktur sandwich, core berperan utama dalam menahan gaya geser akibat pembebanan lentur, sehingga nilai core shear strength menjadi indikator penting stabilitas struktural. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa peningkatan tebal core dari 10 mm ke 30 mm menyebabkan penurunan kekuatan geser untuk seluruh variasi jumlah layer. Hal ini menunjukkan bahwa core yang lebih tebal mengalami deformasi geser yang lebih besar, sehingga tegangan geser efektif yang mampu ditahan menjadi lebih rendah.

Sebaliknya, penambahan jumlah layer skin dari 1 hingga 4 lapis meningkatkan nilai core shear strength pada setiap ketebalan core. Skin yang lebih tebal dan kaku mampu mendistribusikan beban secara lebih merata serta mengurangi deformasi geser pada core.

Meskipun demikian, peningkatan layer tidak sepenuhnya menghilangkan penurunan kekuatan akibat bertambahnya tebal core, yang menegaskan bahwa sifat mekanik material core tetap menjadi faktor dominan dalam menentukan kapasitas geser.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa desain struktur sandwich harus mempertimbangkan keseimbangan antara ketebalan core dan jumlah layer skin, karena core yang terlalu tebal dapat menurunkan performa geser, sementara penambahan layer skin hanya bersifat memperkuat, bukan menggantikan peran kekuatan material core itu sendiri.



Gambar 5. Hasil Pengolahan Citra.

Berdasarkan hasil pengolahan citra menggunakan aplikasi ImageJ dengan kalibrasi 1 cm, diperoleh luas area delaminasi sebesar 60,535 cm². Luas total permukaan spesimen adalah 150 cm² (200 mm × 75 mm), sehingga persentase area yang mengalami delaminasi mencapai 40,36% dari total luas permukaan spesimen.

$$\% \text{ Delaminasi} = \frac{A \text{ delaminasi}}{A \text{ total}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Delaminasi} = \frac{60,535}{150} \times 100\%$$

$$\% \text{ Delaminasi} = 40,36 \%$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa hampir setengah permukaan antarmuka skin–core mengalami kegagalan ikatan setelah pengujian. Delaminasi yang luas ini mengindikasikan terjadinya gangguan signifikan pada mekanisme transfer tegangan geser antar lapisan selama pembebanan.

Tabel 4. Hasil Pengujian.

Area	Mean	Min	Max
60,535 cm ²	200.97	0	255

Pada kondisi ideal, struktur sandwich bekerja secara komposit, di mana beban geser didistribusikan melalui ikatan adhesif antara skin dan core. Namun, ketika delaminasi terjadi pada area yang cukup besar, distribusi tegangan menjadi tidak merata dan terjadi konsentrasi tegangan di sekitar ujung delaminasi.

Konsentrasi tegangan ini mempercepat propagasi retak dan menyebabkan kegagalan terjadi sebelum material core mencapai kapasitas geser maksimumnya. Dengan luas delaminasi sebesar 40,36%, dapat disimpulkan bahwa penurunan nilai core shear strength pada spesimen ini tidak hanya disebabkan oleh sifat mekanik material core, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kegagalan laminasi pada antarmuka skin–core.

Tegangan Lentur Skin.

a) Hasil Pengujian

Tabel 5. Hasil Pengujian.

Tebal core (mm)	Jumlah layer	Pengujian (MPa)			Rata-rata
		1	2	3	
10	1	40.13	46.37	43.7	43.4
	2	28.61	31.88	30.25	30.25
	4	20.15	21.55	20.85	20.85
20	1	28.03	30.83	29.43	29.43
	2	19.62	21.18	20.51	20.44
	4	13.8	14.51	14.1	14.14
30	1	23.73	25.95	25	24.89
	2	16.86	18.09	17.47	17.47
	4	11.54	12.12	11.83	11.83

Momen lentur maksimum pada pengujian lentur tiga titik dihitung menggunakan persamaan:

$$M = \frac{P S}{4}$$

Dengan:

M : Momen lentur maksimum (N/mm),

P : Beban maksimum (N),

S : Jarak bentang (span) (mm)

Tegangan lentur pada skin kemudian di hitung dengan persamaan

$$\sigma_{\text{skin}} = \frac{M \cdot \gamma}{I}$$

Dimana:

σ_{skin} : tegangan lentur skin (MPa)

d : tebal total struktur sandwich (mm)

I : momen inersia penampang sandwich (mm^4)

Untuk struktur sandwich dengan skin relatif tipis dibandingkan core, momen inersia penampang dapat didekati dengan persamaan:

$$I = 2bt \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

t : tebal skin (mm)

Dengan contoh:

$$M = \frac{P S}{4}$$

$$M = \frac{443,4 \times 150}{4}$$

$$M = 16.627,9 \text{ N/mm}$$

Momen inersia penampang dapat didekati dengan persamaan:

$$I = 2bt \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$I = 2 \times 75 \times 0,5 \times (5,5)^2$$

$$I = 2.268,75$$

Tegangan lentur pada skin kemudian di hitung dengan persamaan

$$\sigma_{\text{skin}} = \frac{M \cdot \gamma}{I}$$

$$\sigma_{\text{skin}} = \frac{16.627,9 \times 5,5}{2.268,75}$$

$$\sigma_{\text{skin}} = \frac{16.627,9 \times 5,5}{2.268,75}$$

$$\sigma_{\text{skin}} = 40,3 \text{ Mpa}$$

Untuk melengkapkan analisis kekuatan bending struktur sandwich, dilakukan evaluasi terhadap tegangan lentur yang terjadi pada skin akibat pembebanan lentur tiga titik. Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan apakah kegagalan struktur sandwich yang terjadi selama pengujian dikontrol oleh mekanisme kegagalan lentur pada skin atau mekanisme kegagalan lainnya, khususnya kegagalan geser pada core.

Tabel 4 menyajikan hasil perhitungan tegangan lentur skin berdasarkan beban maksimum pada berbagai kombinasi ketebalan core dan jumlah layer skin. Nilai yang ditampilkan merupakan rata-rata dari setiap spesimen ulangan untuk merepresentasikan respons lentur masing-masing variasi. Secara umum, peningkatan jumlah layer skin menurunkan nilai rata-rata tegangan lentur, yang menunjukkan distribusi tegangan yang lebih merata dan peningkatan kekakuan struktur. Selain itu, peningkatan ketebalan core pada jumlah layer yang sama juga cenderung menurunkan tegangan lentur skin, mengindikasikan bahwa core yang lebih tebal membantu mengurangi deformasi lentur dan menekan tegangan maksimum pada lapisan skin.

b) Analisa ANOVA (*Analysis of Variance*)

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	2265.19	283.149	146.73	0.000
Linear	4	2190.39	547.598	283.77	0.000
Tebal Core	2	883.37	441.684	228.88	0.000
Jumlah Layer	2	1307.02	653.512	338.65	0.000
2-Way Interactions	4	74.80	18.699	9.69	0.000
Tebal Core*Jumlah Layer	4	74.80	18.699	9.69	0.000
Error	18	34.74	1.930		
Total	26	2299.92			

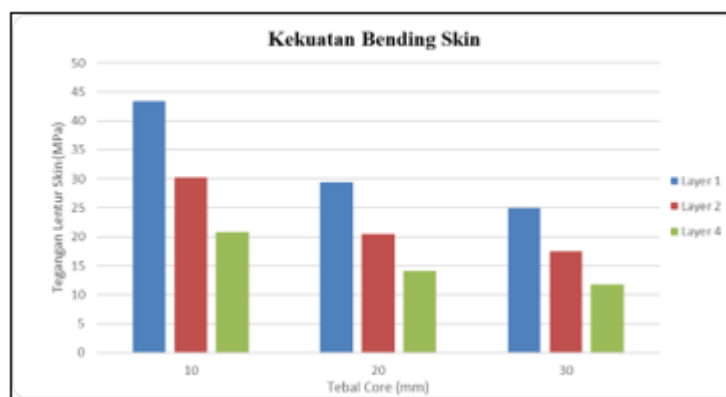
Gambar 6. *Analysis of Variance.*

Tabel 4 menyajikan hasil analisis varians (ANOVA) untuk data skin bending stress. Berdasarkan tabel tersebut, nilai p-value untuk faktor ketebalan core dan jumlah layer skin masing-masing bernilai lebih kecil dari 0,05, yang menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap nilai skin bending stress. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi ketebalan core dan jumlah layer skin berperan penting dalam menentukan besarnya tegangan lentur yang terjadi pada lapisan skin.

Selain itu, hasil ANOVA juga menunjukkan bahwa interaksi antara ketebalan core dan jumlah layer skin memiliki nilai p-value yang lebih kecil dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaruh ketebalan core terhadap skin bending stress bergantung pada jumlah layer skin yang digunakan, dan sebaliknya. Nilai F-value yang relatif tinggi pada faktor jumlah layer skin menunjukkan bahwa faktor ini memberikan kontribusi pengaruh yang lebih dominan terhadap variasi skin bending stress dibandingkan dengan ketebalan core. Sementara itu, nilai galat (error) yang relatif kecil mengindikasikan bahwa variasi data yang tidak dapat dijelaskan oleh model berada pada tingkat yang rendah, sehingga model statistik yang digunakan dapat dianggap cukup representatif dalam menggambarkan hubungan antara variabel bebas dan respons yang dianalisis

c) Analisis Visual Data

Analisis visual data dilakukan untuk memperjelas dan memperkuat hasil analisis statistik melalui penyajian hubungan antara ketebalan core dan jumlah layer skin terhadap nilai tegangan lentur skin (skin bending stress). Penyajian data secara visual bertujuan untuk memudahkan interpretasi pengaruh masing-masing faktor utama terhadap respons lentur skin yang dihasilkan.



Gambar 7. Grafik Kekuatan Bending Skin.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan core secara konsisten menurunkan nilai tegangan lentur skin pada seluruh variasi jumlah layer.

Secara mekanika, bertambahnya ketebalan core meningkatkan jarak antar skin dan momen inersia penampang, sehingga untuk momen lentur yang sama tegangan yang bekerja pada skin menjadi lebih rendah. Core yang lebih tebal juga mengurangi kelengkungan struktur saat pembebanan, sehingga regangan tarik dan tekan pada skin menurun.

Namun demikian, penurunan tegangan lentur skin tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekuatan struktural secara keseluruhan. Core yang lebih tebal cenderung mengalami deformasi geser lebih besar, sehingga kegagalan dapat diawali oleh geser core atau delaminasi sebelum skin mencapai kapasitas mekaniknya. Oleh karena itu, pemilihan ketebalan core harus mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan kekakuan lentur dan risiko kegagalan geser maupun delaminasi pada struktur sandwich.



Gambar 8. Core.

Tabel 6. Hasil Pengujian.

Area	Mean	Min	Max
60,535 cm ²	200.97	0	255

$$\% \text{ Delaminasi} = \frac{A \text{ delaminasi}}{A \text{ total}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Delaminasi} = \frac{60,361}{150} \times 100\%$$

$$\% \text{ Delaminasi} = 40,24 \%$$

Berdasarkan hasil analisis citra menggunakan ImageJ, diperoleh luas delaminasi sebesar 60,361 cm² atau setara dengan 40,24% dari total luas permukaan spesimen. Persentase ini menunjukkan bahwa hampir setengah area antarmuka skin–core mengalami kerusakan setelah pengujian lentur. Luas delaminasi yang signifikan ini mengindikasikan bahwa struktur tidak lagi bekerja secara komposit penuh pada saat mendekati beban maksimum, sehingga mekanisme transfer tegangan antara skin dan core terganggu.

Secara teoritis, peningkatan tebal core akan meningkatkan momen inersia penampang sehingga kekakuan lentur struktur bertambah. Namun, bertambahnya tebal core juga meningkatkan deformasi geser pada inti selama pembebanan lentur.

Deformasi geser yang lebih besar menyebabkan peningkatan tegangan geser pada antarmuka skin–core. Ketika tegangan ini melampaui kekuatan adhesi laminasi, terjadi inisiasi dan propagasi delaminasi, yang selanjutnya memperlemah ikatan antar lapisan.

Akibat delaminasi yang mencapai 40,24% area permukaan, terjadi hilangnya aksi komposit (loss of composite action), sehingga distribusi tegangan lentur menjadi tidak merata dan muncul konsentrasi tegangan di sekitar ujung delaminasi. Kondisi ini mempercepat kegagalan sebelum skin mencapai kapasitas tarik atau tekan maksimumnya. Dengan demikian, penurunan nilai tegangan lentur pada spesimen dengan tebal core lebih besar dapat dikaitkan dengan meningkatnya deformasi geser dan kegagalan antarmuka, bukan semata-mata akibat sifat material skin itu sendiri.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, pengolahan data, serta pembahasan mengenai kekuatan bending komposit sandwich dengan skin fiberglass dan core kardus tipe A-Flute, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut: 1) Variasi ketebalan core berpengaruh terhadap kekuatan bending komposit sandwich. Peningkatan ketebalan core meningkatkan beban maksimum, namun menurunkan nilai tegangan geser efektif akibat bertambahnya luas bidang geser dan meningkatnya deformasi geser pada core bermodulus rendah, 2) Peningkatan jumlah layer skin fiberglass secara konsisten meningkatkan performa bending melalui kenaikan momen inersia penampang, distribusi tegangan yang lebih merata, serta perbaikan transfer beban antara skin dan core. Faktor jumlah layer terbukti lebih dominan dibandingkan ketebalan core dalam menentukan respons bending, 3) Interaksi ketebalan core dan jumlah layer skin signifikan secara statistik. Kombinasi core tipis dan layer banyak memberikan performa terbaik, sedangkan core tebal dan layer sedikit menunjukkan respons terendah akibat dominasi deformasi geser dan risiko delaminasi.

Saran

1) Penelitian selanjutnya disarankan mengeksplorasi variasi material core dan konfigurasi skin untuk memperoleh kombinasi struktur yang lebih optimal, 2) Penambahan jenis pengujian mekanik (tekan, tarik, impak) diperlukan untuk karakterisasi yang lebih menyeluruh, 3) Analisis kegagalan secara mikroskopis dan optimasi proses manufaktur penting dilakukan untuk meningkatkan kualitas ikatan skin–core dan meminimalkan delaminasi,

4) Pengujian pada skala struktur yang lebih besar direkomendasikan agar hasil lebih representatif terhadap aplikasi industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Malang atas dukungan fasilitas dan sarana penelitian yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dan diselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya penulis sampaikan kepada Almarhum Agus Dani, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Skripsi, atas bimbingan, arahan, ilmu, serta dedikasi beliau selama proses penyusunan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Hilmi Iman Firmansyah, S.T., M.T. yang telah memberikan bimbingan, masukan, serta dukungan selama penyelesaian penelitian ini.

Terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada keluarga tercinta, terutama Mama, atas doa, kasih sayang, dukungan moral, dan semangat yang tiada henti sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini. Akhir kata, penulis berharap semoga segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang sebaik-baiknya.

DAFTAR REFERENSI

- Alam, J. S., Rochman, T., & Sugiarto, A. (2024). PENGUJIAN TARIK, TEKAN DAN LENTUR BAHAN BUSA KOMPOSIT SEBAGAI MATERIAL KONSTRUKSI BARU. In *JOS-MRK* (Vol. 5). <http://jurnal.polinema.ac.id/>
- Ali, Gani, G. F. M., Marsono, & Firmansyah, E. T. (2022). Sifat Mekanik Triangle Honeycomb Beam dengan Bahan Komposit Fiberglass. *JURNAL REKAYASA ENERGI DAN MEKANIKA*, 118–127.
- Marsono, M., Hanifa, S. F., & Akbar, F. (2021). Pembuatan dan Pengujian Panel Honeycomb Sandwich dengan Inti Berbentuk Gelombang Berbahan Komposit Serat Bambu. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 5(2), 165–177. <https://doi.org/10.26760/jrh.v5i2.165-177>
- Mutasiana, H. R., Estriyanto, Y., & Suharno. (2014). *PENGARUH VARIASI KETEBALAN CORE TERHADAP KARAKTERISTIK BENDING KOMPOSIT SANDWICH SERAT CANTULA DENGAN CORE HONEYCOMB KARDUS TIPE A-FLUTE*.
- Prayoga, A., Eryawanto, B., & Hadi, Q. (2018). *PENGARUH KETEBALAN SKIN TERHADAP KEKUATAN BENDING DAN TARIK KOMPOSIT SANDWICH DENGAN hONEYCOMB POLYPROPYLENE SEBAGAI CORE* (Vol. 18, Number 1).
- Zainuri, A., & Zaidan, N. H. S. M. (2011). *Kekakuan Bending Eksperimen komposit Sandwich Serat Sabut Kelapa... Achmad Zainuri*.