

Pengaruh Variasi Waktu *Curing* Pada Kegagalan Uji *Bending* Komposit *Sandwich* Serat Karbon Dengan *Core PVC Foam*

Fajar Paundra^{1*}, Joy Rivaldo Aritonang², Eko Pujiyulianto³, Abdul Muhyi⁴, Puguh Elmiawan⁵

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Sumatera

⁵Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Gajah Tunggal

^{1,2,3,4}Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia

⁵Jl. Gajah Tunggal No.16, RT.001/RW.002, Alam Jaya Jatiuwung, Kota Tangerang, Banten 15133, Indonesia

E-mail: fajar.paundra@ms.itera.ac.id¹, aritonang@student.ac.id², ekopujiyulianto@student.ac.id³,

abdul.muhyi@ms.itera.ac.id⁴, elmiawan@gmail.com⁵

Abstrak

Info Naskah:

Naskah masuk: 27 Maret 2025

Direvisi: 19 Juni 2025

Diterima: 21 Juli 2025

Curing adalah metode untuk memperbaiki kemampuan dari material komposit dengan cara memanaskan komposit di dalam oven listrik dengan waktu dan temperatur tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk pengaruh variasi waktu *curing* pada analisa kegagalan uji *bending* komposit *sandwich* serat karbon dengan *core PVC foam*. Material yang digunakan adalah resin polyester, serat karbon *twill* 240 gsm dan *core pvc foam* dengan ketebalan 5 mm. Metode pembuatan yang digunakan adalah *vacuum bagging* dan dilakukan proses *curing* dengan variasi waktu 30 menit, 60 menit, 90 menit, 120 menit dengan suhu penahan 80°C. Pengujian *bending* menggunakan standar ASTM C393. Nilai kekuatan *bending* maksimal komposit *sandwich* terdapat pada waktu *curing* 120 menit yakni sebesar 45,55 MPa, sedangkan nilai kekuatan *bending* terendah terdapat pada tanpa *curing* yakni sebesar 25,76 MPa. Kegagalan yang terjadi setelah pengujian *bending* meliputi kegagalan pada inti (*core*) seperti *core crush*, *indentation*, dan delaminasi, serta kegagalan pada lapisan luar (*skin*) seperti *micro buckling*.

Abstract

Keywords:

curing;

sandwich composite;

bending failure;

ASTM C393.

Curing is a method used to enhance the performance of composite materials by heating them in an electric oven for a specific duration and at a controlled temperature. This study aims to examine the effect of curing time variations on the failure analysis of carbon fiber sandwich composites with a PVC foam core under bending tests. The materials used in this research include polyester resin, 240 gsm carbon twill fiber, and a 5 mm thick PVC foam core. The manufacturing method applied was vacuum bagging, followed by a curing process with time variations of 30 minutes, 60 minutes, 90 minutes, and 120 minutes at a constant holding temperature of 80°C. Bending tests were carried out according to ASTM C393 standards. The highest bending strength of the sandwich composite was achieved with a curing time of 120 minutes, reaching 45.55 MPa, while the lowest strength was observed in the specimen without curing, at 25.76 MPa. The failures observed after bending tests included core failures such as core crush, indentation, and delamination, as well as skin failures like micro buckling.

*Penulis korespondensi:

Fajar Paundra

E-mail: fajar.paundra@ms.itera.ac.id

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi industri dibidang otomotif maupun kedirgantaraan yang menuntut terciptanya inovasi untuk mengembangkan material yang ringan namun tetap kuat tanpa meninggalkan aspek-aspek keselamatan untuk terciptanya mutu kehidupan yang lebih baik. Salah satu pengembangan material tersebut adalah dalam perkembangan teknologi komposit. Komposit merupakan salah satu jenis rekayasa material yang bertujuan untuk mendapatkan sebuah material baru dan dapat digunakan sebagai alternatif penggunaan logam[1] [2].

Komposit merupakan suatu jenis bahan material hasil rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih bahan dimana sifat masing-masing bahan berbeda satu sama lainnya baik itu sifat fisik maupun sifat kimianya. Komposit terdiri dari matriks yang berfungsi sebagai pengikat atau perekat dan penguat (*reinforcement*). Dari paduan bahan tersebut akan didapatkan komposit yang memiliki karakteristik dan sifat mekanik yang berbeda dari material pembentuknya [3][4].

Salah satu jenis komposit yang tengah gencar dilakukan penelitian atau pengembangan adalah komposit *sandwich*[5][6]. Komposit *sandwich* tersusun dari 3 lapisan yaitu *face skin* yang biasa terdiri dari *sheet* metal atau lapisan laminat komposit sebagai kulit permukaan serta material inti (*core*) di bagian tengahnya. Komposit *sandwich* dibuat dengan tujuan untuk efisiensi berat yang optimal, namun mempunyai kekuatan dan kekakuan yang tinggi[7][8]. Ada beberapa cara untuk mendapatkan karakteristik kekuatan dan kekakuan yang baik salah satunya yaitu proses *Curing*[9].

Proses *Curing* merupakan proses polimerisasi atau pemanasan material komposit agar resin memiliki daya ikat yang tinggi terhadap serat yang dilakukan diatas temperatur kamar[10]. Peningkatan temperatur dan waktu *Curing* mengakibatkan terjadinya peningkatan kecepatan *Curing* pada komposit. Proses *Curing* di atas temperatur kamar ini dapat dilakukan dengan *furnace* atau oven listrik [11][12].

Penelitian yang dilakukan oleh Sari dkk. (2020) menganalisis kekuatan tarik dan *bending* komposit serat karbon-resin dengan variasi waktu *curing* (1–3 jam) pada suhu 80°C. Komposit dibuat menggunakan serat karbon 3K 240GSM dan resin lylcal GLR 1011 dengan metode *vacuum*. Hasil menunjukkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 629,799 MPa dan *yield stress* 479,44 MPa pada *curing* 1,5 jam, serta terendah 420,816 MPa dan 462,212 MPa pada 2 jam. Tegangan *bending* tertinggi tercatat 1008,670 MPa pada 3 jam, dan terendah 840,915 MPa pada 1 jam, hal ini menunjukkan pemilihan waktu *curing* yang tepat dapat meningkatkan kekuatan mekanik komposit[10].

Selain itu penelitian di bidang komposit karbon juga dilakukan oleh Wahyu Budi Utomo (2021) dengan judul “Pengaruh Variasi Jenis *Core*, Temperatur *Curing* Dan Post-*Curing* Terhadap Karakteristik *Bending* Komposit *Sandwich* Serat Karbon Dengan Metode *Vacuum Infusion*” penelitian yang dilakukan dengan jenis *core* (kayu balsa, *Honeycomb Polypropylene* (PP), dan temperatur *Curing* 27°C, *Curing* 27°C + *post-Curing* 90°C, *Curing* 90°C terhadap nilai uji *bending*. Hasil penelitian didapatkan bahwa hasil terbesar terdapat pada *core* kayu balsa dengan nilai kekuatan *bending* sebesar 27,04 MPa, *core*

Honeycomb Polypropylene (PP) memiliki nilai kekuatan *bending* sebesar 14,66 MPa, dan hasil kekuatan *bending* terendah terdapat pada *core* PVC *foam board* dengan nilai sebesar 10,69 MPa, hal ini terjadi karena adanya penguatan ikatan pada matrix dan penguatnya [12].

Penelitian lainnya menganalisis pengaruh suhu *curing* terhadap kekuatan lentur dan modulus elastisitas komposit *sandwich* berbahan resin poliester, serat karbon *twill* 240 gsm, dan inti PVC *foam* 5 mm. Proses manufaktur dilakukan dengan metode *vacuum bagging* dan variasi suhu *curing* 70°C, 80°C, serta tanpa *curing* selama 1 jam. Pengujian *bending* mengacu pada standar ASTM C393. Hasil menunjukkan peningkatan signifikan pada sifat mekanik komposit, di mana suhu *curing* 80°C menghasilkan kekuatan *bending* tertinggi sebesar 48,35 MPa dan modulus elastisitas sebesar 67,03 GPa dibandingkan tanpa *curing* yang hanya mencapai 30,07 MPa dan 33,67 GPa[11].

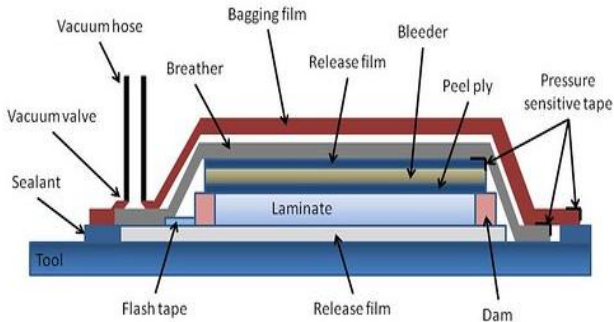
Beberapa peneliti telah banyak melakukan penelitian dibidang komposit karbon, tetapi masih belum banyak yang melakukan penelitian tentang pengaruh variasi waktu *Curing* komposit *sandwich* serat karbon dengan *core* PVC *foam* terhadap kekuatan *bending* menggunakan metode *vacuum bagging*. Untuk mengembangkan penelitian tersebut, peneliti tertarik melakukan kajian dan meneliti bagaimana meningkatkan kekuatan *bending* dan keringanan komposit dengan memvariasikan waktu menggunakan metode *vacuum bagging*. Harapan dari penelitian eksperimen ini adalah menghasilkan material komposit yang ulet, kuat, dan ringan sehingga dapat dimanfaatkan untuk pembuatan bodi pesawat.

2. Metode

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi serat karbon sebagai lapisan luar (*skin*) dan PVC *foam board* sebagai inti (*core*). Serat karbon yang digunakan berbentuk anyaman *twill* 3k 240 gsm. Komposit *sandwich* ini memiliki 2 lapisan serat karbon di bagian atas dan 2 lapisan di bagian bawah. PVC *foam board* yang digunakan memiliki ketebalan 5 mm, dengan dimensi panjang 110 mm dan lebar 38 mm. Sedangkan matriks yang digunakan adalah jenis polyester yukalac C-108b, dengan *hardener* atau katalis mepoxe. Perbandingan resin dan katalis yang digunakan adalah 100:1. Tabel 1 menunjukkan variasi pada penelitian ini. Sedangkan gambar 1 menunjukkan ilustrasi dari proses pembuatan dengan metode *vacuum bagging*.

Tabel 1. Variasi komposit

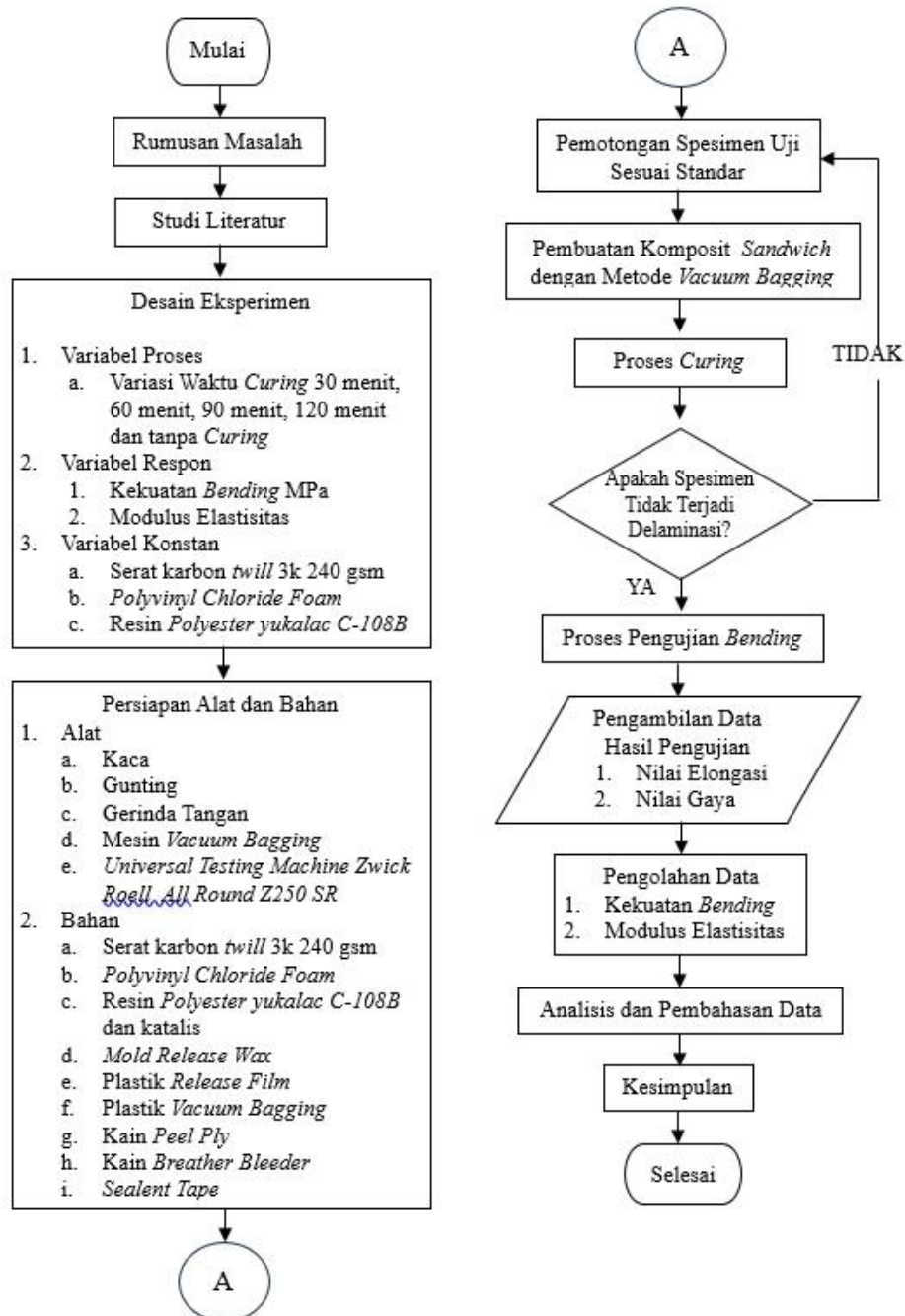
Variasi	<i>Skin</i>	<i>Core</i>
Non <i>curing</i>	Carbon fibre <i>twill</i> 3k 240 gsm	PVC <i>foam board</i>
30 menit	Carbon fibre <i>twill</i> 3k 240 gsm	PVC <i>foam board</i>
60 menit	Carbon fibre <i>twill</i> 3k 240 gsm	PVC <i>foam board</i>
90 menit	Carbon fibre <i>twill</i> 3k 240 gsm	PVC <i>foam board</i>
120 menit	Carbon fibre <i>twill</i> 3k 240 gsm	PVC <i>foam board</i>



Gambar 1. Skema *vacuum bagging*[13]

Metode pembuatan komposit *sandwich* menggunakan teknik *vacuum bagging* dengan tekanan vakum sebesar 14 psi. Tujuannya adalah untuk menghilangkan *void* pada resin dan membuat permukaan spesimen komposit *sandwich* lebih rata dan padat[13]. Gambar 2 menunjukkan diagram alir dari penelitian ini.

Proses pembuatan spesimen komposit *sandwich* dimulai dengan mencampurkan Polyester yupalac C-108b dengan katalis mepoxe dengan perbandingan 100:1. Setelah



Gambar 2. Diagram alir penelitian

larutan resin siap, wax dioleskan pada permukaan kaca yang akan digunakan sebagai cetakan. Resin kemudian dituangkan secukupnya di atas kaca lalu diratakan. Selanjutnya, serat karbon sebagai lapisan pertama (*skin*) diletakkan di atas resin. Resin kembali dituangkan di atas serat karbon dan diratakan, kemudian lapisan serat karbon kedua ditambahkan untuk membentuk dua lapisan bawah komposit *sandwich*. Setelah itu, resin kembali dituangkan dan diratakan di atas lapisan serat karbon, lalu inti (*core*) berupa PVC foam ditempatkan di atasnya. Resin kembali dituangkan dan diratakan di atas PVC foam, kemudian serat karbon diletakkan di atas resin. Langkah ini diulang untuk membentuk dua lapisan atas komposit *sandwich*.

Setelah langkah-langkah sebelumnya selesai, letakkan plastik *release film*, kain *peel ply*, dan kain *breather bleader* di atas spesimen komposit *sandwich*. Kemudian, pasang selang vakum di atas kaca dan tutup spesimen dengan plastik *vacuum bag*, lalu rekatkan dengan kaca menggunakan *sealant tape*. Selanjutnya, hidupkan mesin vakum hingga mencapai tekanan 14 psi dan tunggu beberapa saat sambil memeriksa apakah ada kebocoran pada plastik vakuum bag selama proses vakum berlangsung. Setelah itu, lepaskan selang vakum dari plastik *vacuum bagging*.

Setelah proses *vacuum bagging*, spesimen komposit *sandwich* menjalani proses *curing* menggunakan oven listrik. Waktu *curing* bervariasi antara 30 menit, 60 menit, 90 menit, 120 menit, dan tanpa *curing*, dengan temperatur 80°C. Proses *curing* ini bertujuan untuk memperbaiki karakteristik spesimen komposit *sandwich* dan membentuk ikatan *cross-linking* antara resin dan serat [4]. Proses pengujian *bending* menggunakan standar ASTM 393 dengan kecepatan penekanan sebesar 5 mm/s. Proses pengambilan gambar dilakukan menggunakan kamera DSLR Canon 750d.

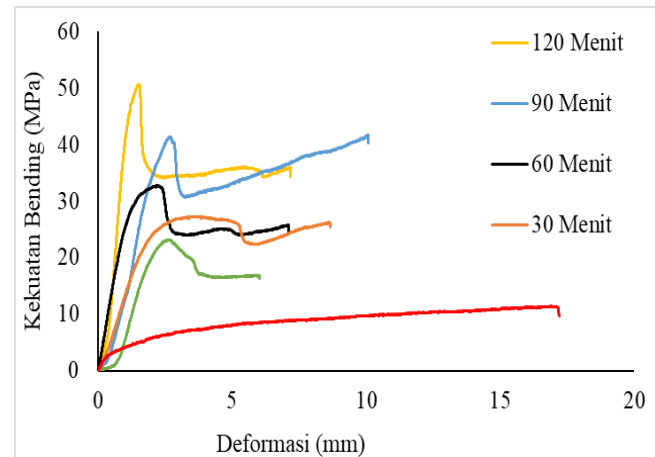
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Uji Bending

Pengujian *bending* dilakukan sebanyak tiga kali terhadap komposit *sandwich* dengan variasi waktu yang sama. Hal ini bertujuan agar mendapatkan nilai rata-rata dari kekuatan *bending* maksimal dan modulus elastisitas. Nilai rata-rata tersebut akan menjadi acuan dari besarnya nilai kekuatan *bending* maksimal dan modulus elastisitas dari PVC foam dan komposit *sandwich* dengan variasi waktu *curing* yang berbeda.

Gambar 3 menunjukkan nilai tertinggi dari kekuatan *bending* maksimal komposit *Sandwich* serat karbon dengan *core* PVC foam terhadap waktu *curing* terdapat pada variasi waktu *curing* 120 menit, nilai kekuatan *bending* maksimal yang didapat adalah 45,55 MPa. Pada variasi temperatur tanpa *curing* didapatkan nilai kekuatan *bending* maksimal sebesar 25,76 MPa. Pada variasi waktu *curing* 30 menit dan 60 menit, didapatkan nilai kekuatan *bending* maksimal sebesar 28,98 MPa dan 31,32 MPa. Pada variasi waktu *Curing* 90 menit didapatkan nilai kekuatan *bending* maksimal sebesar 44,03 MPa. Nilai kekuatan *bending* maksimal dari komposit *Sandwich* meningkat diikuti dengan bertambahnya waktu *curing*. Hal ini dipengaruhi oleh proses *curing* komposit *sandwich* hingga ikatan *cross*

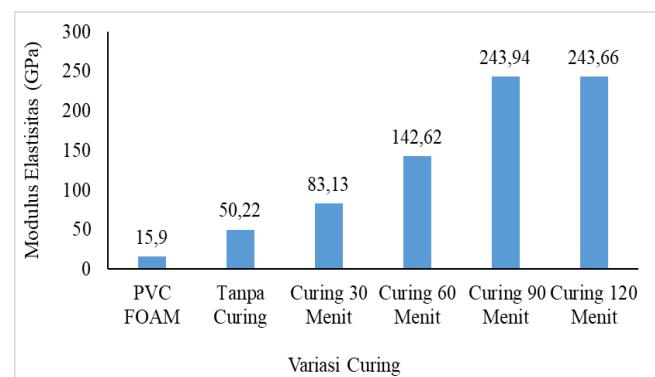
linking antara serat dan resin menjadi lebih rapat[11]. Selain itu, bagian tengah dari *core* mengalami perubahan tekstur menjadi lebih keras akibat menyerapnya resin hingga ke bagian tengah *core*[14] [15].



Gambar 3. Grafik uji bending

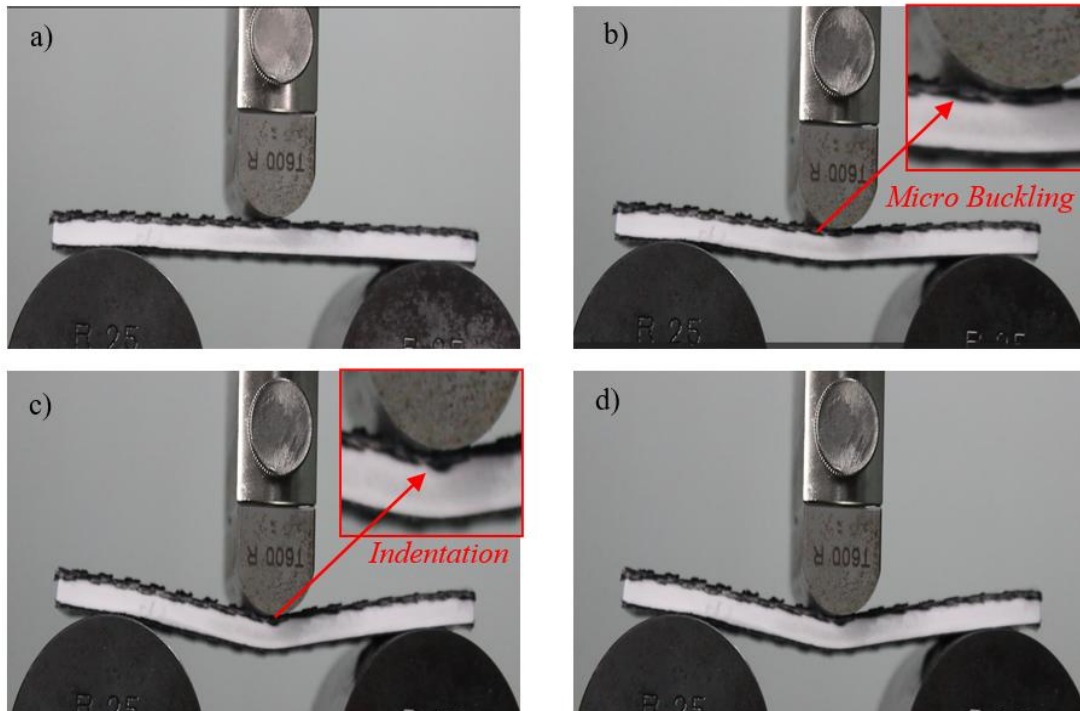
3.2. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan ukuran kekakuan suatu bahan atau material. Semakin besar nilai modulus elastisitas pada material, maka akan semakin kecil regangan elastisitas yang dihasilkan dari tegangan yang diberikan. Modulus elastisitas diperlukan untuk mengetahui nilai kelenturan dari komposit *sandwich*. Nilai modulus elastisitas ditentukan berdasarkan gaya ikat antar atom. Hal ini disebabkan gaya tersebut diubah tanpa terjadi perubahan mendasar dari sifat bahannya, maka modulus elastisitas merupakan suatu sifat yang tidak mudah untuk diubah. Sifat modulus elastisitas hanya dapat diubah oleh adanya penambahan paduan, perlakuan panas atau pengerjaan dingin[16].

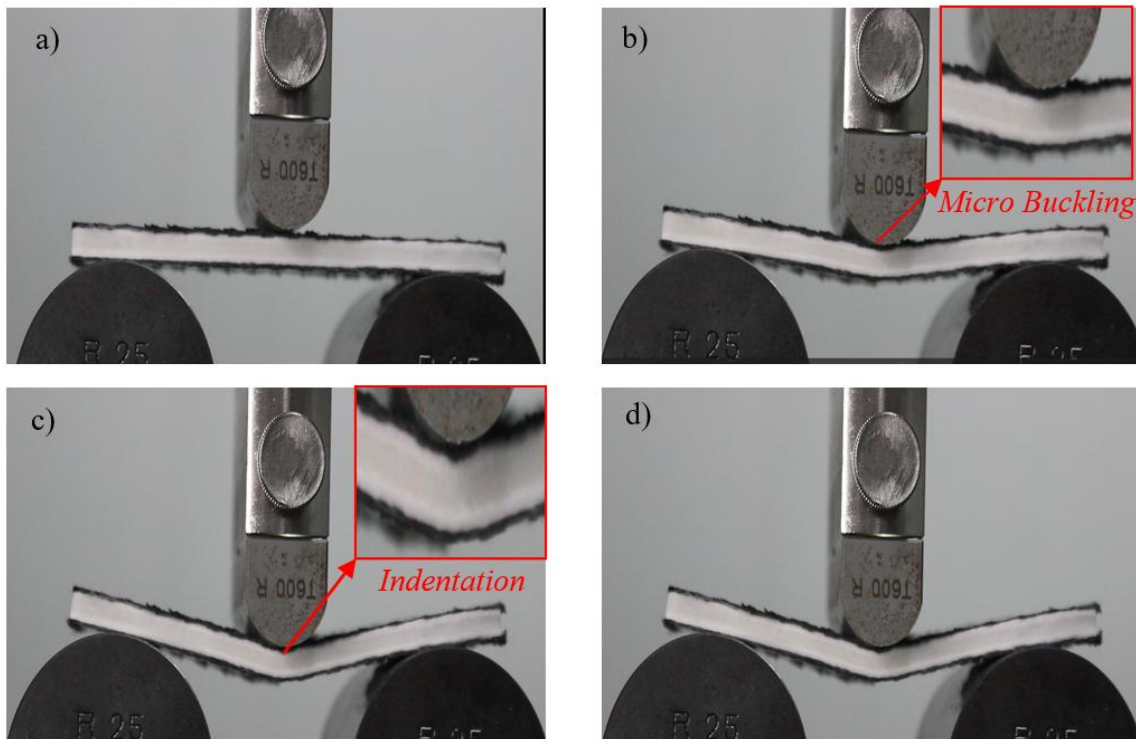


Gambar 4. Grafik modulus elastisitas

Gambar 4 menunjukkan pengaruh variasi waktu *curing* terhadap nilai modulus elastisitas dari komposit *sandwich* serat karbon dengan *core* PVC foam.



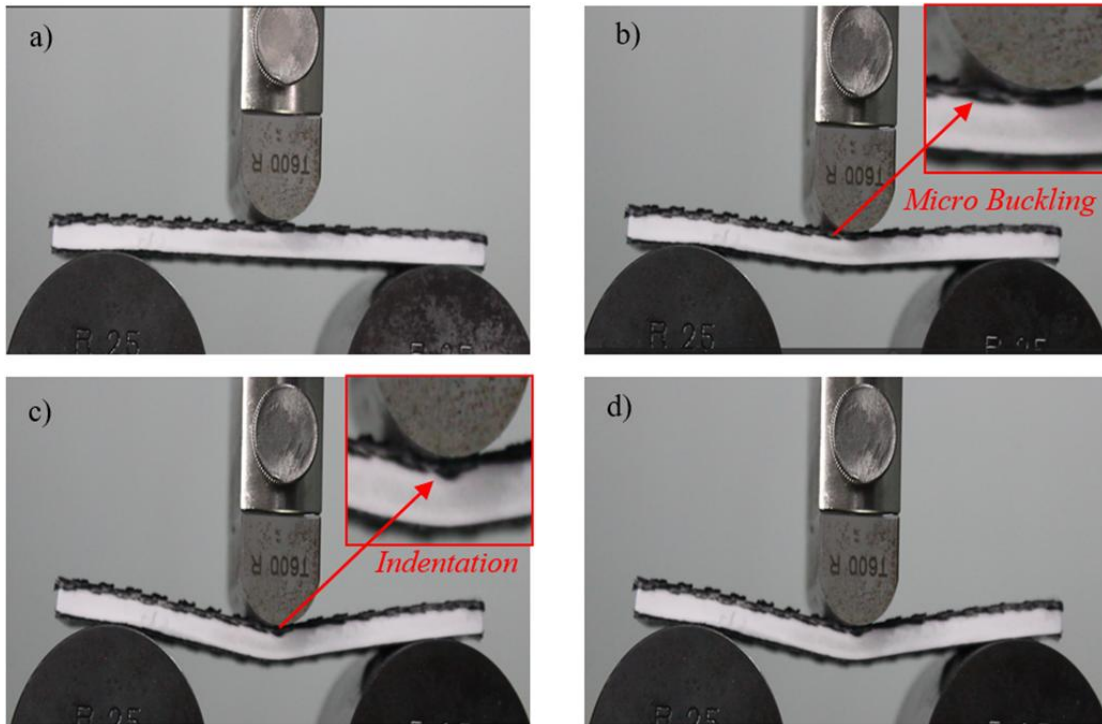
Gambar 5. Komposit sandwich tanpa curing setelah uji bending



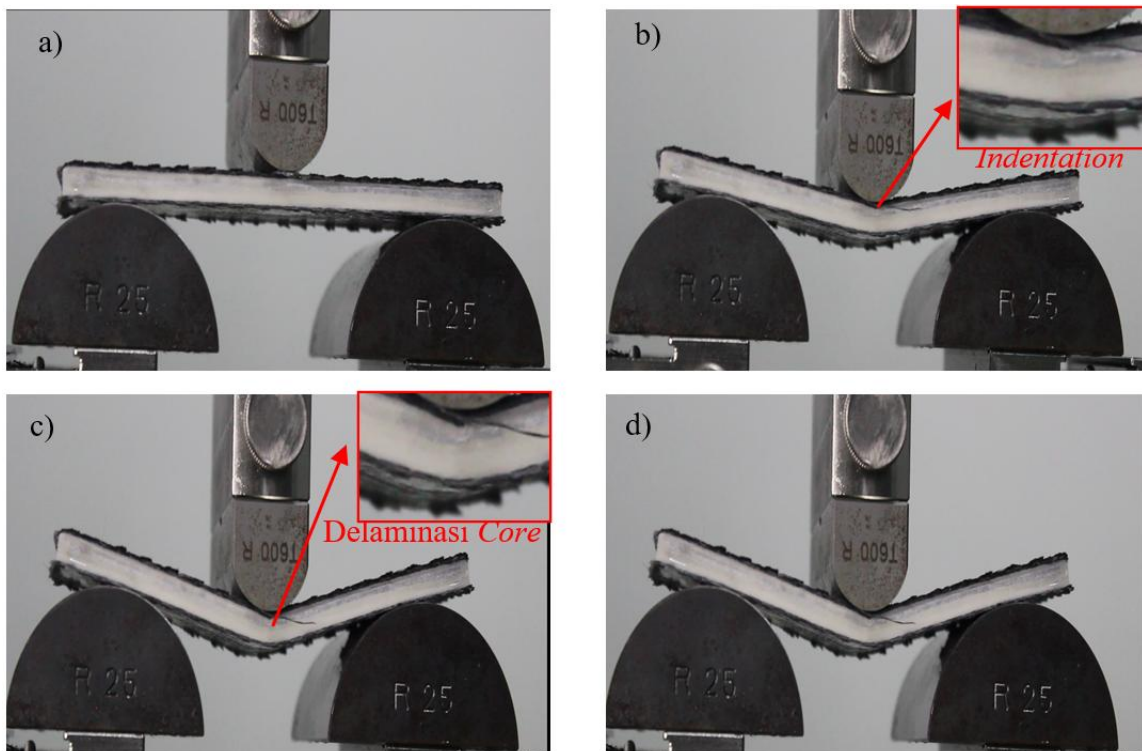
Gambar 6. Komposit sandwich curing 60 menit setelah uji bending

Variasi waktu *curing* 90 menit merupakan variasi waktu *curing* dengan nilai modulus elastisitas tertinggi yakni sebesar 243,94 GPa, diikuti dengan variasi waktu *curing* 30 menit, 60 menit dan 120 menit dengan nilai masing-masing modulus elastisitas yang didapat sebesar

83,13 GPa, 142,62 GPa dan 243,66 GPa. Nilai modulus elastisitas terendah didapatkan oleh variasi tanpa *curing* yakni sebesar 50,22 GPa. Peningkatan nilai modulus elastisitas terjadi pada waktu *curing* 30 menit, 60 menit dan 90 menit hal ini dikarenakan adanya pengaruh proses



Gambar 7. Komposit sandwich curing 90 menit setelah uji bending



Gambar 8. Komposit sandwich curing 120 menit setelah uji bending

curing dengan bantuan oven listrik. Penambahan waktu *curing* mempengaruhi semakin rapatnya ikatan *cross linking* antara serat dan resin pada komposit Sandwich[17][17]. Namun peningkatan waktu *curing* 120 menit terjadi penurunan nilai modulus elastisitas

dikarenakan terjadinya peningkatan kecepatan *curing* sehingga dapat memberikan *cross-linking* pada komposit sandwich, tetapi kekakuan komposit sandwich menurun[8].

3.3. Mekanisme Kegagalan

Pengujian bending merupakan salah satu metode penting untuk mengevaluasi perilaku mekanik komposit *sandwich*, terutama dalam menilai kekuatan lentur, kekakuan, serta mekanisme kegagalannya. Komposit *sandwich*, yang tersusun atas lapisan kulit (*face sheet*) dan inti (*core*), memiliki perilaku lentur yang kompleks karena interaksi antara material penyusun dan distribusi tegangan sepanjang ketebalannya. Pemahaman terhadap mekanisme kegagalan yang terjadi selama pengujian bending sangat krusial untuk memastikan keandalan struktur komposit *sandwich* dalam aplikasi teknik. Berikut disajikan hasil analisis kegagalan pada uji *bending* komposit *sandwich* yang telah dilakukan. Gambar 5 dan gambar 6 menunjukkan mekanisme kegagalan pada uji *bending* komposit *sandwich*.

Gambar 5 memperlihatkan tahapan proses pengujian bending pada komposit *sandwich* dengan variasi tanpa proses *curing*. Gambar 5a, terlihat bahwa komposit *sandwich* mulai menerima beban uji lentur. Deformasi dan awal terjadinya kegagalan material mulai tampak secara bertahap, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5b. Jenis kegagalan yang muncul pada tahap ini adalah *micro buckling*, yaitu kegagalan lokal pada skin komposit akibat tekanan, yang ditandai dengan terlepasnya lapisan *skin* (serat karbon) dari *core* berupa PVC *foam*. Fenomena ini terjadi karena serat karbon memiliki ketebalan yang relatif lebih tipis dibandingkan dengan *core* PVC *foam*[11][18][19].

Selanjutnya, Gambar 5c menunjukkan bahwa kegagalan *micro buckling* berkembang semakin besar, disertai dengan munculnya jenis kegagalan baru pada *core*, yaitu *indentation*. Kegagalan *indentation* ini terjadi akibat adanya tekanan lokal yang menyebabkan deformasi permanen pada *core*, dan sangat dipengaruhi oleh kekuatan serta ketebalan *core*. Jenis kegagalan ini umumnya menghasilkan defleksi yang lebih besar dibandingkan kegagalan lainnya pada struktur komposit *sandwich* [8][11][18].

Gambar 6 menunjukkan tahapan proses pengujian bending pada komposit *sandwich* dengan variasi *curing* selama 60 menit. Gambar 6a, terlihat bahwa komposit *sandwich* mulai menerima pembebanan uji lentur. Deformasi awal dan indikasi kegagalan material mulai tampak secara bertahap, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6b. Jenis kegagalan yang terjadi pada tahap ini adalah *micro buckling*, yang ditandai dengan terlepasnya lapisan *skin* (serat karbon) dari *core* berupa PVC *foam*. Kegagalan ini disebabkan oleh perbedaan ketebalan antara skin yang relatif lebih tipis dibandingkan *core*, sehingga tidak mampu menahan tegangan tekan yang terjadi [7][16][20]. Selanjutnya, Gambar 6c memperlihatkan perkembangan kegagalan *micro buckling* yang semakin meluas, disertai dengan munculnya kegagalan tambahan pada bagian *core*, yaitu *indentation*. Kegagalan *indentation* terjadi akibat tekanan lokal yang melebihi kekuatan tekan *core*, yang dipengaruhi oleh faktor ketebalan dan kekuatan mekanik *core* itu sendiri. Kegagalan jenis ini umumnya menghasilkan defleksi yang lebih besar dibandingkan jenis kegagalan lainnya pada komposit *sandwich* [11][18].

Gambar 7 menunjukkan gambar proses pengujian bending komposit *sandwich* variasi *curing* 90 menit. Pada gambar 6a, menunjukkan komposit *sandwich* mulai dikenai pembebanan uji bending. Deformasi dan kegagalan pada komposit *sandwich* mulai terjadi secara perlahan yang ditunjukkan pada gambar 7b, fenomena kegagalan *indentation* dipengaruhi oleh dua faktor yaitu kekuatan dan ketebalan *core*. Jenis kegagalan ini mengakibatkan defleksi yang lebih besar dibandingkan jenis kegagalan lain yang terjadi pada komposit *sandwich* [11][18][21].

Gambar 7c menunjukkan kegagalan *indentation* mulai membesar dan muncul kegagalan baru pada *core* komposit *sandwich* yaitu delaminasi *core*. Kegagalan ini terjadi akibat adanya gaya geser yang terjadi pada *core* yang didistribusi menuju lapisan perekat sehingga mengakibatkan kerusakan lapisan. Kerusakan *core* terjadi secara bertahap dimulai dari bagian atas menuju bagian bawah komposit *sandwich* [11][18]. Kemudian pada gambar 7d menunjukkan komposit *sandwich* telah selesai dilakukan uji bending.

Gambar 8 menunjukkan tahapan proses pengujian bending pada komposit *sandwich* dengan variasi *curing* selama 120 menit. Pada Gambar 8a, terlihat bahwa komposit *sandwich* mulai menerima pembebanan uji lentur. Deformasi awal mulai terjadi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8b, dengan munculnya fenomena kegagalan berupa *indentation*. Kegagalan ini dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu kekuatan dan ketebalan *core*. *Indentation* menyebabkan terjadinya deformasi lokal pada *core* akibat tekanan tinggi, yang menghasilkan defleksi lebih besar dibandingkan jenis kegagalan lainnya pada struktur komposit *sandwich* [11][18].

Gambar 8c, terlihat bahwa kegagalan *indentation* berkembang semakin parah, dan muncul jenis kegagalan baru yaitu delaminasi pada *core*. Delaminasi ini terjadi akibat gaya geser yang terbentuk di dalam *core* dan diteruskan ke lapisan perekat antar material. Gaya tersebut menyebabkan pemisahan antar lapisan dalam *core* secara bertahap, yang dimulai dari bagian atas dan berkembang ke arah bawah struktur komposit *sandwich* [8][20]. Gambar 8d menunjukkan kondisi akhir dari komposit *sandwich* setelah seluruh proses pengujian bending selesai dilakukan.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan proses pembuatan, pengambilan data, dan analisis pada penelitian tugas akhir mengenai komposit *sandwich*, diperoleh beberapa kesimpulan. Kekuatan *bending* tertinggi ditemukan pada komposit *sandwich* dengan variasi waktu *curing* selama 120 menit, yaitu sebesar 45,55 MPa, sedangkan kekuatan *bending* terendah tercatat pada komposit tanpa perlakuan *curing* dengan nilai 25,76 MPa. Nilai modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada komposit dengan waktu *curing* 90 menit sebesar 163,49 GPa, sementara nilai terendah terdapat pada komposit tanpa *curing* sebesar 50,22 GPa. Dari hasil pengujian dengan variasi waktu *curing* 30, 60, dan 90 menit, dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu *curing*, maka semakin tinggi nilai kekuatan *bending* dan modulus elastisitas komposit *sandwich*. Namun, pada waktu *curing* 120 menit, meskipun terjadi peningkatan

kekuatan *bending*, nilai modulus elastisitas justru mengalami penurunan. Hal ini akibat peningkatan *cross-linking* yang menyebabkan penurunan kekakuan komposit. Selain itu, kegagalan yang terjadi setelah pengujian *three point bending* meliputi kegagalan pada inti (*core*) seperti *core crush*, *indentation*, dan delaminasi, serta kegagalan pada lapisan luar (*skin*) seperti *micro buckling*.

Daftar Pustaka

- [1] M. Farhan Sidik, A. Muhyi, F. P. Nurullah, E. Pujiyulianto, F. N. Syanur, and F. Paundra, "ANALYSIS OF THE EFFECT OF NaOH PERCENTAGE ON THE TENSILE STRENGTH OF SISAL FIBER (AGAVE SISALANA) AND POLYURETHANE COMPOSITES USING THE COMPRESSION MOLDING METHOD," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 24, no. 1, pp. 19–27, 2024.
- [2] M. Syaekani, F. Paundra, F. Qalbina, I. D. Airohman, and P. Yunesti, "Desain dan Analisis Mesin Press Komposit Kapasitas 20 Ton," pp. 29–34, 2021.
- [3] Y. P. Chuves, M. Pitanga, I. Grether, M. O. Cioffi, and F. Monticeli, "The Influence of Several Carbon Fiber Architecture on the Drapability Effect," *Textiles*, vol. 2, no. 3, pp. 486–498, 2022, doi: 10.3390/textiles2030027.
- [4] J. M. Mesin, F. P. Nurullah, F. Paundra, A. Maulana, and A. Muhyi, "THE EFFECT OF WEBBING ANGLE ORIENTATION ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BOEHMERIA NIVEA FIBER," vol. 24, no. 1, pp. 25–34.
- [5] S. Zubaidah, M. Daud, J. Lim, M. Amir, and S. Kim, "Results in Engineering Enhancing impact energy absorption in composite *sandwich* structures through synergistic smart material integration," *Results Eng.*, vol. 21, no. October 2023, p. 101902, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101902.
- [6] M. Tüfekci, V. Oztekin, I. Pir, and M. Alio, "Composites Part C: Open Access Low strain rate mechanical performance of balsa wood and carbon fibre-epoxy-balsa *sandwich* structures," vol. 12, no. November, 2023, doi: 10.1016/j.jcomc.2023.100416.
- [7] S. Structures, "On Impact Damage and Repair of Composite Honeycomb *Sandwich* Structures," 2023.
- [8] Y. Garbatov, S. Scattareggia Marchese, G. Epasto, and V. Crupi, "Flexural response of additive-manufactured honeycomb *sandwiches* for marine structural applications," *Ocean Eng.*, vol. 302, no. February, p. 117732, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117732.
- [9] M. H. Wijaya, F. Paundra, M. Syaekani, and F. Perdana, "Analisis Pengaruh Variasi Temperature *Curing* Terhadap Kekuatan Tarik dan Bending Komposit Hybrid Serat Fiber Glass Dengan Tipe Woven dan Mat," vol. 9, no. 2, pp. 39–46, 2024, doi: 10.33387/dinamik.v9i2.8174.
- [10] E. D. R. Sari, S. M. B. Respati, and A. Nugroho, "Analisis Kekuatan Tarik Dan Bending Komposit Serat Karbon-Resin Dengan Variasi Waktu *Curing* Dan Suhu Penahanan 80°C," *J. Ilm. Momentum*, vol. 16, no. 2, 2020, doi: 10.36499/mim.v16i2.3771.
- [11] R. Saputra, A. Muhyi, E. Pujiyulianto, M. Fatikul Arif, and F. Paundra, "The Effect of Variations in *Curing* Temperature of Carbon Fiber/PVC Foam Board *Sandwich* Composites on Bending Test Failure Analysis," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 24, no. 1, p. 29, 2024.
- [12] W. B. Utomo, "Pengaruh Variasi jenis *core*, temperatur *curing* dan post-*curing* karakteristik bending komposit *sandwich* serat karbon dengan metode vacuum infusion," *J. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 45–54, 2021.
- [13] C. Li, S. Viswanathan-Chettiar, F. Sun, Z. Shi, and B. Blackman, "Effect of CFRP surface topography on the adhesion and strength of composite-composite and composite-metal joints," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 164, no. July 2022, 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2022.107275.
- [14] H. Wang, S. Xie, K. Jing, S. Zheng, Z. Liu, and H. Zhou, "Closed-cell polyurethane in-situ foaming honeycomb for enhanced energy absorption and water intrusion resistance," *Alexandria Eng. J.*, vol. 114, no. December 2024, pp. 572–587, 2025, doi: 10.1016/j.aej.2024.12.011.
- [15] E. Haq *et al.*, "Improved mechanical properties of environmentally friendly jute fibre reinforced metal laminate *sandwich* composite through enhanced interface," *Heliyon*, vol. 10, no. 2, p. e24345, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24345.
- [16] P. Ravishankar, M. Arya, H. Dhakal, F. Gouda, M. Skrifvars, and P. Khalili, "Assessing the mechanical performance of natural fiber thermoplastic composite *sandwiches* for advanced applications," *Results Mater.*, vol. 23, no. February, 2024, doi: 10.1016/j.rinma.2024.100600.
- [17] P. Liu *et al.*, "Bending performance and failure mechanisms of composite *sandwich* structures with 3D printed hybrid triply periodic minimal surface *cores*," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 325, no. August, 2024, doi: 10.1177/10996362241272792.
- [18] A. Rodian, "THE EFFECT OF VARIATIONS IN PVC FOAM *CORE* THICKNESS ON THE FAILURE ANALYSIS OF BENDING TEST IN *SANDWICH* COMPOSITE," vol. 26, no. 1, pp. 16–25.
- [19] W. Zhang, Q. Qin, K. Li, J. Li, and Q. Wang, "International Journal of Solids and Structures Effect of stepwise gradient on dynamic failure of composite *sandwich* beams with metal foam *core* subject to low-velocity impact," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 228, p. 111125, 2021, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111125.
- [20] A. Cagla and M. Evren, "ScienceDirect ScienceDirect Investigation into Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Novel *Sandwich* Composite Material with Carbon Fibre / Epoxy Facesheets and PVC Foam *Core*," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 42, no. 2019, pp. 284–291, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2022.12.035.
- [21] F. Paundra, A. Naufal, A. Muhyi, F. P. Nurullah, and P. Elmiawan, "Effect of Webbing Angle on Tensile and Bending Strengths in Human Hair Fiber Reinforced Composites," vol. 24, no. 1, pp. 30–35, 2022.