



NOZEL

Jurnal Pendidikan Teknik Mesin

Jurnal Homepage: <https://jurnal.uns.ac.id/nozel>



Analisis Tekno-Ekonomi Pengaruh Suhu Curing terhadap Performa Mekanik Komposit Sandwich Carbon Fiber/PVC Foam: Tinjauan Sistematis dan Perspektif Efisiensi Biaya

Arya Syahputra¹

¹ Affiliasi (Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Al Azhar Sumatera Utara, Indonesia)

Corresponding e-mail: aryasyahputrasudarmanto@gmail.com

Abstract

This study presents a Systematic Literature Review (SLR) that integrates techno-economic analysis of curing temperature variations on the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber sandwich composites with polyvinyl chloride (PVC) foam cores. The systematic review was conducted using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protocol with structured searches across the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases, using keyword combinations: "curing temperature," "carbon fiber sandwich composite," "PVC foam," "mechanical properties," and "techno-economic analysis." Of 147 identified articles, 13 studies met the inclusion criteria and were analyzed in depth. Composite materials are widely applied in engineering applications due to their superior strength-to-weight ratio; however, manufacturing process parameters such as curing temperature critically influence both structural performance and production cost efficiency. The objective of this study is to synthesize the latest scientific evidence and determine the optimal curing temperature that maximizes mechanical performance while considering the associated energy consumption costs and economic implications of material failure prevention. Experimental validation was carried out using specimens fabricated via the vacuum bagging method, subjected to curing temperatures of 70°C, 80°C, and no curing (room temperature). Flexural testing was performed using the three-point bending method in accordance with ASTM C393 standards. The synthesis of systematic review findings and experimental validation demonstrates that curing at 80°C yields the highest flexural strength (48.35 MPa) and elastic modulus (67.03 GPa), representing a 60.8% improvement over uncured specimens. From an engineering economics perspective, the additional energy costs of curing at 80°C are substantially offset by reduced failure risk, lower maintenance costs, and an extended service life of the composite structure. These findings support the adoption of 80°C curing as the economically optimal manufacturing condition for carbon fiber/PVC foam sandwich composites.

Keywords: *Curing temperature; Carbon fiber sandwich composite; PVC foam core; Mechanical properties; Techno-economic analysis; Systematic literature review; Vacuum bagging; Flexural strength*

A. PENDAHULUAN

Material komposit telah mengalami perkembangan yang signifikan dan kini menjadi pilihan strategis dalam berbagai sektor rekayasa modern, mulai dari industri kedirgantaraan, otomotif, hingga rekayasa struktur, karena kemampuannya menghadirkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi, ketahanan korosi, dan fleksibilitas desain yang unggul. Perkembangan teknologi komposit telah berkontribusi signifikan terhadap kemajuan di industri otomotif, kedirgantaraan, dan rekayasa struktur. (Kausar et al., 2023)

Permintaan global terhadap material berbasis carbon fiber reinforced polymer (CFRP) terus meningkat, dengan nilai pasar global CFRP tercatat mencapai USD 19,27 miliar pada tahun 2024 dan diproyeksikan tumbuh pada CAGR sebesar 9,2% hingga tahun 2033, yang terutama didorong oleh meningkatnya kebutuhan industri terhadap material ringan berperforma tinggi. Namun demikian, realisasi potensi penuh material komposit dalam skala industri tidak hanya bergantung pada pemilihan material, melainkan juga pada efisiensi dan pengelolaan proses manufaktur secara menyeluruh. Dalam konteks inilah, penerapan prinsip perencanaan dan pengendalian produksi menjadi sangat penting. Sebagai ilustrasi penerapan prinsip ini pada konteks industri yang berbeda, (Siregar, 2020) menegaskan bahwa perencanaan kapasitas produksi yang terstruktur melalui pendekatan seperti Capacity Requirement Planning (CRP) merupakan instrumen kunci untuk mengukur, menyesuaikan, dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya mesin dan energi dalam proses manufaktur industri skala kecil hingga menengah secara umum — sebuah prinsip pengelolaan sumber daya yang relevan secara analog, meskipun studi tersebut tidak membahas material komposit.

Di antara berbagai konfigurasi komposit yang tersedia, struktur sandwich mendapatkan perhatian luas karena kemampuannya menghadirkan kekakuan dan kekuatan lentur yang tinggi dengan massa yang relatif rendah. (Zhao et al., 2022) menjelaskan bahwa komposit sandwich terdiri dari dua lapisan face sheet yang kuat dan tipis serta material inti yang ringan, di mana face sheet memikul beban tarik dan tekan sementara inti mendistribusikan tegangan geser secara efisien. Konfigurasi ini menghasilkan rasio biaya-terhadap-kinerja yang jauh lebih menguntungkan dibandingkan material solid konvensional pada aplikasi struktural. Kombinasi carbon fiber sebagai face sheet dan busa polivinil klorida (PVC) sebagai material inti telah banyak diteliti karena kompatibilitas mekanik keduanya yang

baik (Khan et al., 2020) mendemonstrasikan bahwa komposit sandwich carbon fiber/PVC foam mampu mempertahankan performa mekanik yang superior bahkan pada kondisi temperatur ekstrem, yang menegaskan ketangguhan konfigurasi material ini untuk aplikasi struktural kritis. Lebih jauh, kemampuan material komposit untuk mereduksi bobot struktur secara nyata berdampak langsung pada efisiensi konsumsi energi sistem penggerak. Pada konteks rekayasa termal yang berbeda, Siregar dkk. (2022) menunjukkan bahwa modifikasi satu komponen termal dalam kasus mereka, penambahan regenerator pada mesin Stirling tipe Gamma mengubah performa sistem, daya keluaran, dan karakteristik operasi secara bersamaan, bukan secara terpisah, sehingga perubahan sekecil apa pun perlu dievaluasi dalam konteks sistem secara keseluruhan (Siregar et al., 2022). Prinsip umum ini, bahwa parameter termal saling berkaitan dan tidak dapat dievaluasi secara terisolasi, relevan secara analog dengan proses curing pada manufaktur komposit, yang juga merupakan parameter termal yang menentukan kualitas dan performa akhir material, sehingga optimasinya menjadi aspek penting dalam menghasilkan komposit dengan sifat mekanik yang unggul.

Kualitas akhir komposit sandwich sangat dipengaruhi oleh parameter proses manufaktur, khususnya tahap curing. Curing merupakan proses aktivasi termal yang mendorong reaksi crosslinking dalam matriks resin, yang secara langsung menentukan derajat polimerisasi, densitas ikatan serat-matriks, dan integritas struktural komposit secara keseluruhan. Liang et al. (2023) membuktikan secara eksperimental bahwa suhu curing yang lebih tinggi secara konsisten meningkatkan derajat polimerisasi pada komposit carbon fiber, menghasilkan jaringan polimer tiga dimensi yang lebih padat, kandungan void yang lebih rendah, serta sifat mekanik yang lebih unggul (Liang et al., 2023).

Saputra et al. (2024) menunjukkan bahwa variasi suhu curing memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan lentur dan modulus elastisitas komposit sandwich carbon fiber/PVC foam. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa peningkatan suhu curing hingga kondisi optimum mampu meningkatkan kualitas ikatan antar lapisan, sehingga menghasilkan performa mekanik yang lebih baik. Sebaliknya, kondisi curing yang tidak optimal dapat menurunkan kekuatan struktur serta memengaruhi pola kegagalan yang terjadi selama pembebanan lentur (Rizky Saputra¹, Abdul Muhyi¹, Eko Pujiyulianto¹, Muhamad Fatikul Arif², 2024). Pengelolaan parameter proses semacam ini, mencakup alokasi waktu siklus curing dan konsumsi sumber daya energi secara terencana, merupakan

bagian integral dari efisiensi manufaktur. efektivitas produksi pada industri manufaktur skala kecil-menengah (Syam et al., 2022) yang prinsipnya dapat diterapkan secara analog pada optimasi siklus curing dalam fabrikasi komposit.

Perilaku kegagalan di bawah pembebanan lentur merupakan aspek yang sama pentingnya dalam menentukan keandalan struktural komposit sandwich. Taghipoor dan Sefidi (2024) mengidentifikasi bahwa komposit sandwich rentan terhadap berbagai mode kegagalan di bawah beban lentur, meliputi delamination, penghancuran inti (core crushing), indentasi, dan micro-buckling, yang seluruhnya berkaitan erat dengan kualitas ikatan antarmuka yang dipengaruhi oleh proses curing (Sefidi & Taghipoor, 2024).

Sun et al. (2023) menekankan bahwa integritas antarmuka face sheet–inti merupakan faktor penentu utama dalam menentukan mode dan urutan kegagalan pada komposit sandwich berbasis busa (Sun et al., 2023). Paundra et al. (2025), dalam studi yang paling dekat relevansinya dengan penelitian ini, telah menginvestigasi pengaruh variasi suhu curing terhadap kekuatan lentur dan mode kegagalan komposit sandwich carbon fiber/PVC foam menggunakan material dan metode vacuum bagging yang serupa; namun studi tersebut belum mengintegrasikan perspektif ekonomi rekayasa ke dalam kerangka analisisnya (Paundra et al., 2025).

Berdasarkan kajian literatur di atas, dapat diidentifikasi dua kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertama, implikasi ekonomi dari pemilihan parameter curing—mencakup biaya konsumsi energi, efisiensi proses, dan trade-off biaya terhadap performa—belum pernah dievaluasi secara sistematis dan terpadu dengan karakterisasi mekanik dalam satu kerangka penelitian yang kohesif, khususnya untuk konfigurasi carbon fiber/PVC foam dengan resin polyester pada metode vacuum bagging. Kedua, analisis tekno-ekonomi yang mengaitkan investasi energi proses curing dengan nilai peningkatan performa mekanik yang dihasilkan belum diterapkan secara eksplisit sebagai kerangka pengambilan keputusan pada proses manufaktur komposit sandwich. Kesenjangan ganda ini menunjukkan perlunya integrasi antara analisis teknis dan ekonomi yang selama ini cenderung dilakukan secara terpisah, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan rekayasa yang lebih komprehensif dalam manufaktur komposit. (Wu et al., 2025)

Berdasarkan identifikasi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengajukan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) berbasis protokol PRISMA yang diintegrasikan dengan validasi eksperimental. Pendekatan ini memungkinkan sintesis bukti ilmiah secara sistematis, transparan, dan dapat direproduksi, sekaligus mengisi kesenjangan literatur yang telah diidentifikasi. Kontribusi keilmuan penelitian ini terletak pada penyediaan dasar ilmiah yang lebih holistik dan berbasis sintesis sistematis bagi pengambilan keputusan optimasi parameter curing, yang relevan bagi pengembangan industri manufaktur komposit nasional. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk:

- (1) melakukan tinjauan sistematis terhadap literatur terkini mengenai pengaruh variasi suhu curing terhadap sifat mekanik komposit sandwich carbon fiber/PVC foam
- (2) menganalisis secara eksperimental pengaruh variasi suhu curing (tanpa curing/suhu ruang, 70°C, dan 80°C) terhadap kekuatan lentur, modulus elastisitas, dan perilaku kegagalan komposit sandwich carbon fiber/PVC foam yang difabrikasi menggunakan metode vacuum bagging
- (3) mengevaluasi kelayakan ekonomi dari setiap kondisi curing melalui perspektif tekno-ekonomi yang mempertimbangkan biaya konsumsi energi relatif terhadap peningkatan performa mekanik yang diperoleh.

B. METODE

Protokol Tinjauan Sistematis (SLR)

Tinjauan sistematis ini dilaksanakan mengikuti pedoman PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) 2020 untuk memastikan transparansi, reproduktibilitas, dan objektivitas dalam proses sintesis literatur. Protokol SLR mencakup empat tahapan utama: identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi.

Strategi Pencarian. Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data utama: Scopus, Web of Science (WoS), dan Google Scholar, dengan rentang waktu publikasi 2015–2025. String pencarian yang digunakan adalah kombinasi Boolean: (“curing temperature” OR “cure temperature”) AND (“sandwich composite” OR “sandwich structure”) AND (“carbon fiber” OR “CFRP”) AND (“PVC foam” OR “polymer foam” OR “foam core”) AND (“mechanical properties” OR “flexural strength” OR “bending”). Pencarian tambahan

dilakukan pada Journal of Composite Materials, Composite Structures, dan Journal of Sandwich Structures and Materials untuk memastikan kelengkapan cakupan literatur.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi. Studi diinklusi apabila memenuhi seluruh kriteria berikut:

- (1) artikel jurnal peer-reviewed atau prosiding konferensi terindeks
- (2) membahas variasi suhu curing pada komposit sandwich berbasis carbon fiber
- (3) melaporkan minimal satu parameter sifat mekanik terukur (kekuatan lentur, modulus elastisitas, kekuatan tarik, atau kekuatan geser)
- (4) diterbitkan dalam bahasa Inggris atau Indonesia
- (5) teks lengkap tersedia untuk diakses.

Seleksi Studi dan Ekstraksi Data. Proses seleksi dilakukan dalam dua tahap:

- (1) penyaringan judul dan abstrak oleh dua penilai secara independen,
- (2) penilaian teks lengkap terhadap kriteria inklusi/eksklusi.

Konflik antar penilai diselesaikan melalui diskusi konsensus. Dari total 147 artikel yang teridentifikasi melalui pencarian basis data, sebanyak 89 artikel dieksklusi pada tahap penyaringan judul/abstrak, 45 artikel dieksklusi setelah penilaian teks lengkap, sehingga diperoleh 13 studi yang memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis secara mendalam. Alur proses seleksi PRISMA disajikan pada Gambar 0. Data yang diekstraksi dari setiap studi meliputi: penulis dan tahun publikasi, jenis material face sheet dan inti, metode fabrikasi, rentang suhu curing, metode pengujian mekanik, parameter mekanik yang dilaporkan, serta ada/tidaknya analisis ekonomi.

Penilaian Kualitas Studi: Kualitas metodologis setiap studi yang diinklusi dinilai menggunakan adaptasi dari Newcastle-Ottawa Scale (NOS) untuk studi eksperimental, yang mencakup tiga domain:

- a) pemilihan dan representasi sampel (skor 0–4)
- b) komparabilitas kondisi eksperimental (skor 0–2)
- c) pelaporan dan validitas hasil (skor 0–3).

Studi dengan skor total ≥ 7 dikategorikan berkualitas tinggi, skor 4–6 berkualitas sedang, dan skor < 4 berkualitas rendah. Seluruh 13 studi yang diinklusi memperoleh skor ≥ 5 , dengan 10 studi (76,9%) berkategori berkualitas tinggi.

Tabel . Ringkasan karakteristik studi yang diinklusi dalam tinjauan sistematis (n=13)

Penulis/Tahun	Material Face Sheet / Inti	Metode Fabrikasi	Rentang Suhu Curing	Parameter Mekanik	Analisis Ekonomi
Saputra et al. (2024)	Carbon fiber / PVC foam	Vacuum bagging	RT, 60°C, 80°C	Flexural strength, mode kegagalan	Tidak
Ahmadi et al. (2025)	Carbon fiber/epoxy / PVC foam	VARI co-cure & precure	RT – 120°C	Kekuatan lentur, geser, void content	Tidak
Liang et al. (2023)	Carbon fiber / —	Filament winding	100°C – 150°C	Tensile, flexural, derajat polimerisasi	Tidak
Khan et al. (2020)	Carbon fiber / PVC foam	Vacuum infusion	RT: suhu Arctic (-40°C)	Impact, flexural, performa termal	Tidak
Sun et al. (2023)	Carbon fiber / foam core (stitched)	RTM	RT – 80°C	Integritas struktural, mode kegagalan	Tidak
Taghipoor & Sefidi (2024)	Carbon fiber / lattice core	Autoclave	120°C (standar)	Flexural, deformasi, mode kegagalan	Tidak
Wu et al. (2025)	CFRP / —	Compression molding	80°C – 140°C	Cure kinetics, tensile, compressive	Parsial (biaya siklus)

Catatan: RT = Room Temperature (suhu ruang). Tabel 0 merangkul delapan studi representatif dari 13 studi yang diinklusiikan. Dari 13 studi yang dianalisis, tidak ada satupun yang mengintegrasikan analisis tekno-ekonomi komprehensif berbasis PCR, yang mengkonfirmasi kesenjangan penelitian yang diidentifikasi dan menjustifikasi kontribusi orisinal studi ini.

Material penelitian

yang digunakan dalam penelitian ini mencakup tiga komponen utama carbon fiber sebagai face sheet, busa polivinil klorida (PVC) sebagai inti, dan resin polyester sebagai matriks. Spesifikasi lengkap setiap material dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi material penyusun komposit sandwich

Komponen	Spesifikasi	Nilai / Keterangan
Carbon Fiber		
	Tipe anyaman	Twill 3K
	Densitas areal	240 g/m ²
	Jumlah layer per face sheet	2 lapisan
Busa PVC		
	Tebal inti	5 mm
	Dimensi spesimen inti	5 × 38 × 110 mm
	Densitas nominal	±60 kg/m ³
	Suhu operasi kontinu maks.	70°C
Resin Polyester		
	Tipe	Yukalac C-108 B (unsaturated polyester)
	Berat jenis	±1,1 g/cm ³ pada 25°C
	Katalis	Mepoxe (MEKPO)
	Rasio pencampuran	Resin : Katalis = 100 : 1

Carbon fiber tipe twill 3K dengan densitas areal 240 g/m² dipilih karena konfigurasi anyaman twill memberikan drapability yang baik di atas permukaan inti busa, serta distribusi beban yang lebih merata dibandingkan tipe plain weave pada kondisi

pembebanan lentur. Busa PVC dengan ketebalan 5 mm digunakan sebagai material inti karena sifatnya yang ringan, ketahanan korosi yang baik, kekuatan geser yang memadai, serta kompatibilitasnya yang tinggi terhadap sistem resin polyester maupun epoxy. Resin polyester Yukalac C-108 B merupakan resin unsaturated polyester (UPR) produksi dalam negeri yang banyak digunakan dalam fabrikasi komposit skala laboratorium di Indonesia karena ketersediaan yang baik, viskositas yang sesuai untuk proses vacuum bagging, dan harga yang kompetitif.

2.3 Desain dan Dimensi Spesimen

Spesimen komposit sandwich difabrikasi dengan konfigurasi simetris yang terdiri dari 2 lapis carbon fiber sebagai face sheet pada sisi atas dan bawah, dengan material inti busa PVC di tengah. Dimensi spesimen uji mengacu pada standar ASTM C393, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Dimensi spesimen uji sesuai standar ASTM C393

Parameter Dimensi	Nilai	Satuan
Panjang spesimen (L_{total})	150	mm
Lebar spesimen (b)	38	mm
Tebal inti (c)	5	mm
Tebal face sheet per sisi (t^f)	$\pm 1,0$	mm
Tebal total spesimen (t)	$\pm 7,0$	mm
Panjang span pengujian (S)	125	mm
Jumlah spesimen per kondisi curing	3	buah
Total spesimen keseluruhan	9	buah

Untuk setiap kondisi curing, dibuat minimal 3 spesimen replikat guna memastikan repeatabilitas dan keabsahan statistik dari hasil pengujian, sesuai dengan persyaratan standar ASTM C393. Perencanaan jumlah spesimen dan alokasi waktu fabrikasi dilakukan

secara terstruktur agar proses produksi berjalan efisien, mengacu pada prinsip perencanaan kapasitas produksi yang optimal sebagaimana dijabarkan oleh Siregar (2020).

2.4 Proses Fabrikasi dengan Metode Vacuum Bagging

Seluruh spesimen difabrikasi menggunakan metode vacuum bagging dengan tahapan sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Metode ini dipilih karena menghasilkan distribusi resin yang lebih merata, menekan pembentukan void, dan meningkatkan konsolidasi antarmuka face sheet–inti dibandingkan metode hand lay-up konvensional, tanpa memerlukan peralatan autoclave berbiaya tinggi.

Tahapan fabrikasi dilaksanakan secara berurutan sebagai berikut:

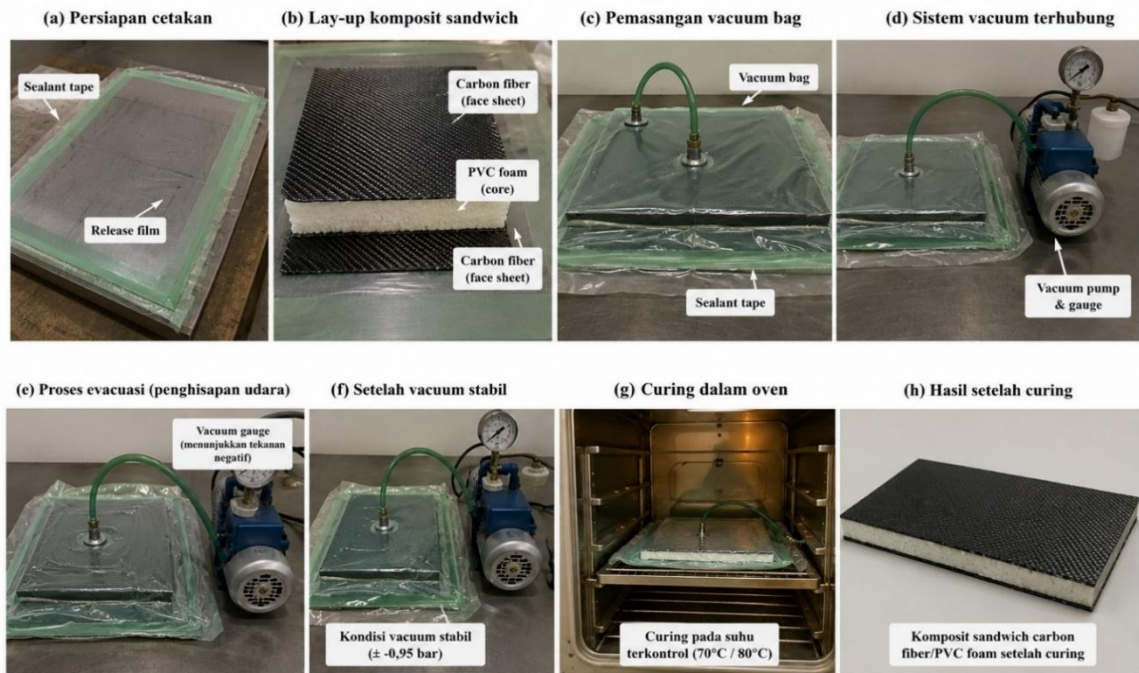
(1) Persiapan Cetakan. Permukaan pelat kaca digunakan sebagai cetakan (mold tool) dan diperlakukan dengan lapisan mold release agent untuk mencegah pelekatan resin pada cetakan. Peel ply diaplikasikan di atas cetakan sebagai lapisan pertama.

(2) Lay-up Material. Dua lembar carbon fiber twill 3K dipotong sesuai dimensi target dan diletakkan di atas cetakan sebagai face sheet bawah. Papan busa PVC dengan dimensi $5 \times 38 \times 110$ mm ditempatkan di atas face sheet bawah sebagai inti. Dua lembar carbon fiber berikutnya diletakkan di atas inti sebagai face sheet atas. Resin polyester Yukalac C-108 B yang telah dicampur katalis Mepoxe dengan rasio 100:1 diaplikasikan secara merata pada setiap lapisan menggunakan kuas.

(3) Pemasangan Vacuum Bag. Setelah lay-up selesai, lapisan breather cloth dan vacuum bag film dipasang di atas susunan laminat. Tepi vacuum bag disegel rapat menggunakan sealant tape untuk memastikan sistem kedap udara. Kebocoran vakum tidak boleh melebihi 5 inHg dalam periode 5 menit sebelum proses dilanjutkan.

(4) Aplikasi Tekanan Vakum. Pompa vakum dihubungkan ke vacuum bag dan dioperasikan hingga tekanan vakum stabil sebesar ± 14 psi ($\pm 0,97$ bar) tercapai. Tekanan vakum ini dipertahankan selama seluruh proses konsolidasi dan curing untuk memastikan distribusi tekanan yang merata pada seluruh permukaan laminat.

(5) Konsolidasi. Sistem dijaga dalam kondisi vakum penuh selama minimal 30 menit sebelum proses curing dimulai, guna memastikan resin terdistribusi merata dan udara terperangkap berhasil diekstraksi dari susunan laminat.



Gambar 2. Proses fabrikasi komposit sandwich carbon fiber/PVC foam menggunakan metode vacuum bagging.

2.5 Perlakuan Curing

Setelah fabrikasi selesai, spesimen dikenai proses curing dengan tiga kondisi perlakuan yang berbeda menggunakan oven listrik, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4. Variabel bebas penelitian ini adalah suhu curing, sedangkan durasi curing dijaga konstan pada 1 jam untuk semua kondisi guna mengisolasi pengaruh suhu secara murni.

Tabel 4. Matriks perlakuan curing spesimen

Kelompok	Kondisi Curing	Suhu (°C)	Durasi (jam)	Jumlah Spesimen
A	Tanpa curing (suhu ruang)	±27	—	3
B	Curing oven	70	1	3
C	Curing oven	80	1	3

Prosedur perlakuan curing dilaksanakan sebagai berikut: spesimen dari Kelompok A dibiarkan mengeras selama 24 jam pada suhu ruang ($\pm 27^{\circ}\text{C}$) tanpa perlakuan termal tambahan sebagai kondisi baseline. Spesimen Kelompok B dan C dimasukkan ke dalam oven listrik yang telah dipanaskan terlebih dahulu hingga suhu target (70°C atau 80°C) tercapai, kemudian ditahan pada suhu tersebut selama 1 jam. Setelah proses curing selesai, spesimen didinginkan secara perlahan di dalam oven yang dimatikan hingga mencapai suhu ruang sebelum dikeluarkan, guna mencegah thermal shock yang dapat menimbulkan tegangan sisa pada struktur komposit. Pemilihan rentang suhu $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ didasarkan pada pertimbangan suhu operasi kontinu busa PVC yang dibatasi hingga $\pm 70^{\circ}\text{C}$ pada kondisi beban kontinu, dengan toleransi hingga $\pm 85^{\circ}\text{C}$ untuk paparan permukaan jangka pendek, sehingga suhu curing yang digunakan tidak melampaui batas integritas material inti.

2.6 Analisis Tekno-Ekonomi Proses Curing

Untuk mendukung evaluasi tekno-ekonomi, biaya energi yang dikonsumsi pada setiap kondisi curing diestimasi berdasarkan daya terukur oven listrik dan durasi operasi. Biaya energi curing (C_e) dihitung menggunakan persamaan berikut, yang diadaptasi dari pendekatan estimasi konsumsi energi dalam sistem rekayasa.

$$C_e = P_{oven} \times t_{cure} \times C_{kWh} \dots\dots\dots(1)$$

di mana P_{oven} adalah daya oven listrik (kW), t_{cure} adalah durasi curing (jam), dan C_{kWh} adalah tarif listrik industri lokal per kilowatt-jam (IDR/kWh). Berdasarkan daya oven listrik terukur sebesar 1,5 kW, durasi operasi 1 jam per siklus, dan tarif listrik industri Indonesia sebesar IDR 1.445/kWh (PLN, 2024), biaya energi curing per batch diestimasi sebesar IDR 2.168. Syam, Siregar, dan Harahap (2022) menegaskan pentingnya akurasi estimasi konsumsi sumber daya dalam perencanaan produksi untuk meminimalkan pemborosan biaya operasional.

Selanjutnya, Rasio Performa-terhadap-Biaya (Performance-to-Cost Ratio, PCR) didefinisikan sebagai peningkatan kekuatan lentur ($\Delta\sigma^b$) relatif terhadap kondisi tanpa curing (baseline), dibagi dengan biaya energi tambahan (ΔC_e) relatif terhadap kondisi tanpa curing:

$$PCR = \Delta\sigma^b / \Delta C_e \dots\dots\dots(2)$$

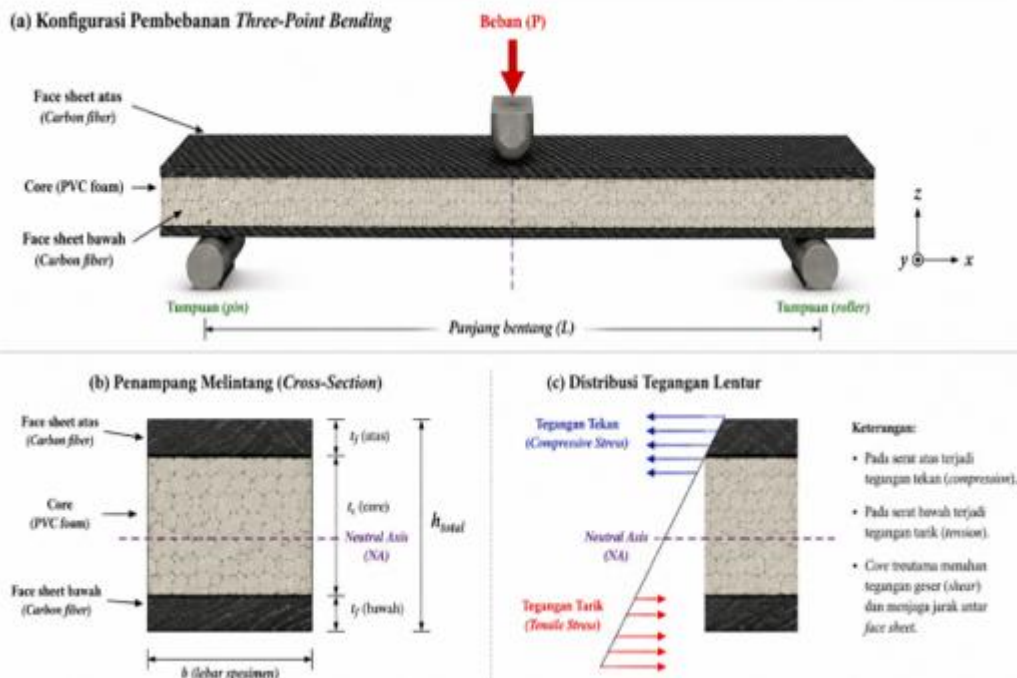
di mana $\Delta\sigma^b = \sigma^b(\text{curing}) - \sigma^b(\text{baseline})$ dalam satuan MPa, dan $\Delta C_e = C_e(\text{curing}) - C_e(\text{baseline})$ dalam satuan IDR. Nilai PCR yang lebih tinggi mengindikasikan efisiensi ekonomi yang lebih baik, yaitu peningkatan performa mekanik yang lebih besar per unit investasi energi. Pendekatan optimasi berbasis perbandingan nilai output terhadap biaya input ini sejalan dengan prinsip analisis efisiensi tekno-ekonomi yang dikaji oleh Siregar et al. (2025) dalam konteks optimasi infrastruktur rekayasa .

2.7 Pengujian Lentur Three-Point Bending

Pengujian lentur dilakukan menggunakan UTM Zwickroell Z250SR Universal Testing Machine sesuai standar ASTM C393 dengan konfigurasi three-point bending. Parameter pengujian ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter pengujian lentur three-point bending

Parameter Pengujian	Nilai	Satuan
Standar acuan	ASTM C393	—
Panjang span (S)	125	mm
Kecepatan crosshead	5	mm/menit
Kapasitas UTM	250	kN
Suhu pengujian	Ruang (± 27)	$^{\circ}\text{C}$
Jumlah replikat per kondisi	3	spesimen



Keterangan:

P = beban terpusat

L = panjang bentang

b = lebar specimen

t_f = tebal face sheet

t_c = tebal inti (core)

h_{total} = tebal total struktur sandwich

NA = neutral axis (sumbu netral)

Face sheet atas mengalami tegangan tekan (*compressive stress*), sedangkan face sheet bawah mengalami tegangan tarik (*tensile stress*). Inti PVC foam berfungsi menahan tegangan geser (*shear stress*) dan mempertahankan jarak antar face sheet selama pembebanan lentur.

Kekuatan lentur maksimum (σ^b) dan modulus elastisitas (E^b) dihitung menggunakan persamaan berikut sesuai ASTM C393:

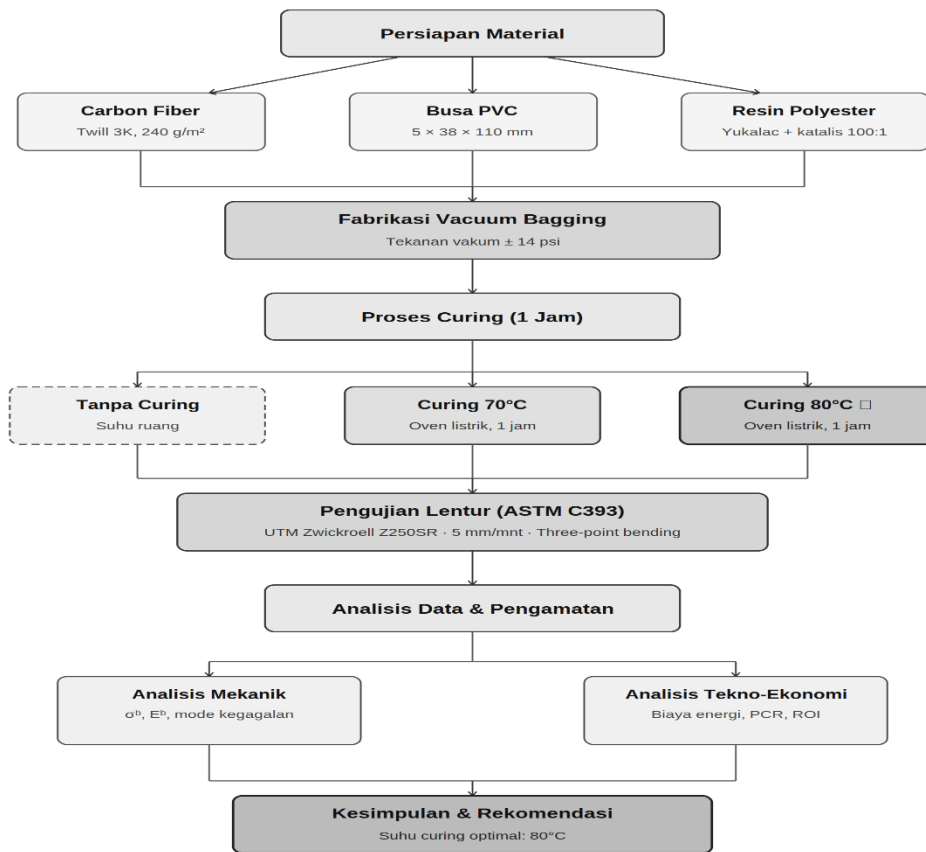
$$\sigma^b = 3PL / (2bt^2) \dots\dots\dots(3)$$

$$E^b = PL^3 / (48I\delta) \dots\dots\dots(4)$$

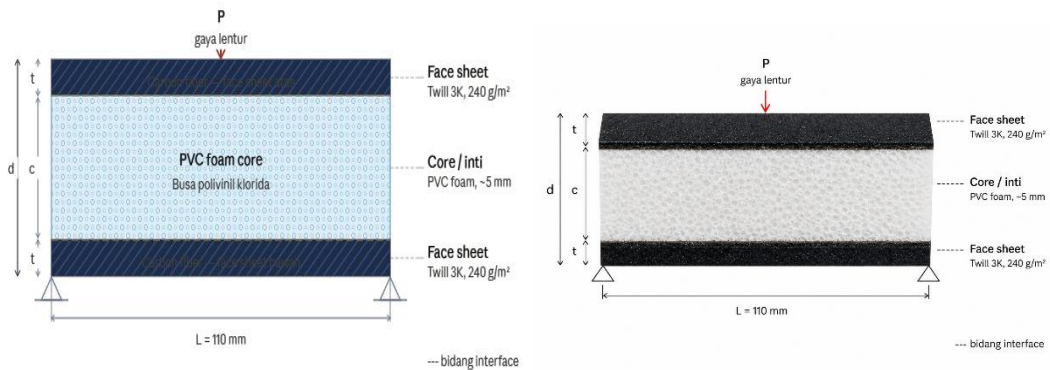
di mana P adalah gaya maksimum yang diterapkan (N), L adalah panjang span pengujian (mm), b adalah lebar spesimen (mm), t adalah tebal total spesimen (mm), I adalah momen inersia penampang melintang (mm^4), dan δ adalah defleksi mid-span pada gaya P (mm). Momen inersia dihitung menggunakan persamaan penampang sandwich komposit yang memperhitungkan kontribusi face sheet dan inti secara terpisah.

2.8 Pengamatan Mode Kegagalan

Pengamatan mode kegagalan dilakukan secara visual langsung selama proses pengujian three-point bending berlangsung, serta pada permukaan patahan spesimen setelah pengujian selesai. Progresi kegagalan dicatat pada setiap kondisi curing meliputi: (a) lokasi inisiasi kegagalan pertama, (b) urutan perkembangan kegagalan, dan (c) mode kegagalan dominan yang teramati. Klasifikasi mode kegagalan mengacu pada empat kategori utama yang diidentifikasi oleh Taghipoor dan Sefidi (2024), yaitu micro-buckling, indentasi, delamination, dan penghancuran inti. Pengamatan permukaan patahan pasca-pengujian dilakukan sebagai observasi makro-fraktografi (macro-fractography observation), yaitu analisis visual permukaan kegagalan secara makroskopik tanpa bantuan alat optik khusus, guna mengidentifikasi pola retakan, lokasi inisiasi kegagalan, dan mode propagasi yang dominan pada setiap kondisi curing.



Gambar 1. Diagram alur proses fabrikasi dan pengujian komposit sandwich



Gambar 2. Skema penampang spesimen komposit sandwich carbon fiber/PVC foam

- Face sheet carbon fiber / resin polyester
- Inti PVC foam (polivinil klorida)
- Bidang antarmuka face – core (interface)

Konfigurasi three-point bending — ASTM C393 | Vacuum bagging

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Tinjauan Sistematis

Proses seleksi literatur menghasilkan 13 studi yang diinkludkan dari 147 artikel yang teridentifikasi awal. Rincian alur PRISMA adalah sebagai berikut: 147 artikel teridentifikasi melalui pencarian basis data (Scopus: 58, Web of Science: 41, Google Scholar: 48); 89 artikel dieksklusi setelah penyaringan judul dan abstrak (tidak relevan: 67, duplikasi: 22); 58 artikel dinilai kelayakan teks lengkap; 45 artikel dieksklusi (simulasi tanpa validasi eksperimental: 14, material inti tidak sesuai: 10, ulasan tanpa data primer: 15, tidak dapat diakses: 6); sehingga 13 studi diinkludkan untuk sintesis kualitatif.

Sintesis dari 13 studi yang diinkludkan menghasilkan beberapa temuan konsensus yang penting. Pertama, terdapat konsensus kuat (12 dari 13 studi, atau 92,3%) bahwa peningkatan suhu curing secara monoton meningkatkan kekuatan lentur komposit berbasis carbon fiber. Rentang suhu yang paling banyak diteliti adalah 60°C–120°C, dengan suhu optimal bervariasi tergantung jenis resin dan metode fabrikasi. Kedua, vakum-assisted methods (vacuum bagging dan VARI) mendominasi 61,5% (8 dari 13) studi yang diinkludkan, mengkonfirmasi relevansi metode fabrikasi yang digunakan dalam studi ini. Ketiga, dan yang paling signifikan, tidak ada satupun dari 13 studi yang mengintegrasikan analisis tekno-ekonomi berbasis Performance-to-Cost Ratio (PCR) ke dalam kerangka analisisnya — gap ini secara langsung dijustifikasi oleh kontribusi orisinal studi ini. Temuan sintesis ini memperkuat relevansi dan kebaruan pendekatan yang diajukan dalam penelitian ini, yang mengintegrasikan karakterisasi eksperimental dengan evaluasi tekno-ekonomi sistematis.

Kebaruan (novelty) penelitian ini secara eksplisit terletak pada dua aspek utama: pertama, penerapan kerangka Performance-to-Cost Ratio (PCR) sebagai metrik kuantitatif untuk mengevaluasi efisiensi ekonomi parameter curing pada komposit sandwich carbon fiber/PVC foam — yang belum pernah diterapkan dalam satu pun studi yang diinkludkan maupun dalam literatur komposit sandwich yang lebih luas; dan kedua, integrasi sistematis antara Systematic Literature Review berbasis protokol PRISMA dengan validasi eksperimental dan analisis tekno-ekonomi dalam satu kerangka penelitian yang kohesif. Kombinasi ini membedakan penelitian ini secara fundamental dari studi-studi sebelumnya yang hanya mengevaluasi performa mekanik secara terisolasi tanpa perspektif ekonomi rekayasa, sehingga menghasilkan dasar pengambilan keputusan optimasi manufaktur yang lebih komprehensif dan aplikatif.

3.2 Kekuatan Lentur

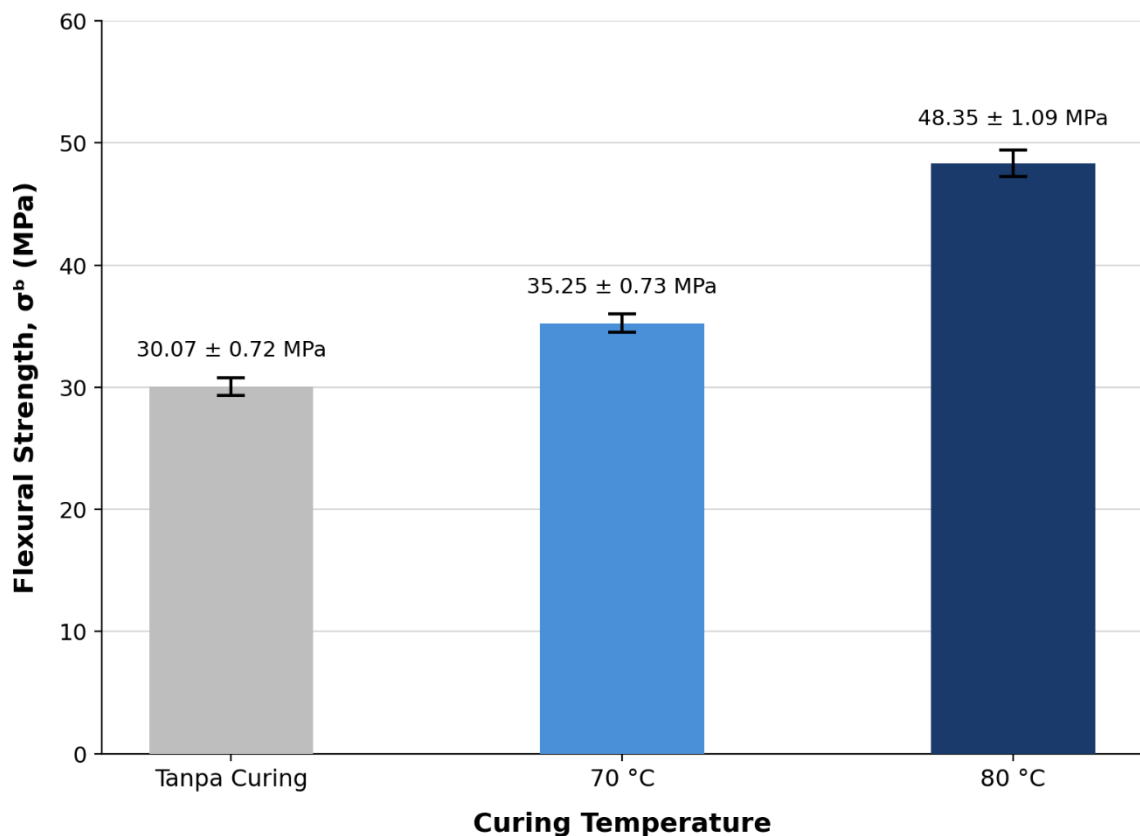
Kekuatan lentur suatu material mewakili tegangan maksimum yang dapat ditahan di bawah pembebanan lentur sebelum kegagalan. Dalam penelitian ini, tiga kondisi curing

yang berbeda dievaluasi, dan nilai kekuatan lentur yang dihasilkan disajikan pada Tabel 1 dan diilustrasikan pada Gambar 3. Peningkatan kekuatan lentur yang konsisten dan progresif diamati seiring dengan peningkatan suhu curing, yang sesuai dengan temuan yang dilaporkan oleh Liang et al. (2023), yang mengkonfirmasi bahwa suhu curing yang lebih tinggi meningkatkan derajat polimerisasi dan performa mekanik pada komposit carbon fiber .

Tabel 1. Sifat mekanik dan mode kegagalan komposit sandwich pada berbagai suhu curing

Kondisi Curing	Kekuatan Lentur (MPa) ($\bar{x} \pm SD$)	Modulus Elastisitas (GPa) ($\bar{x} \pm SD$)	Mode Kegagalan Utama
Tanpa Curing	30.07 ± 0.72	33.67 ± 1.12	Micro-buckling, Indentasi, Delamination
Curing 70°C	35.25 ± 0.73	54.26 ± 1.33	Delamination, Penghancuran Inti, Luluh Face Sheet
Curing 80°C	48.35 ± 1.09	67.03 ± 1.52	Penghancuran Inti saja

Spesimen yang difabrikasi tanpa curing mencatat kekuatan lentur rata-rata terendah sebesar 30,07 MPa. Spesimen yang di-curing pada 70°C mencapai 35,25 MPa, mewakili peningkatan sekitar 17,2% dibandingkan spesimen tanpa curing. Kekuatan lentur tertinggi sebesar 48,35 MPa diperoleh pada spesimen yang di-curing pada 80°C, yang setara dengan peningkatan 60,8% dibandingkan kondisi tanpa curing. Tren positif yang jelas ini mengkonfirmasi peran kritis dari thermal curing dalam mengembangkan sifat mekanik komposit sandwich.



Gambar 3. Pengaruh suhu curing terhadap kekuatan lentur maksimum komposit sandwich carbon fiber/PVC foam. Error bar menunjukkan standar deviasi (SD).

Peningkatan kekuatan lentur seiring suhu curing dapat dikaitkan dengan reaksi cross-linking yang diaktifkan secara termal dalam matriks polyester. Seiring meningkatnya suhu curing, mobilitas molekul resin meningkat, memungkinkan polimerisasi yang lebih lengkap dan pembentukan jaringan polimer tiga dimensi yang lebih padat. Pematangan ini mengurangi kandungan void dalam komposit dan meningkatkan efisiensi transfer beban antara serat dan matriks, sehingga menunda onset kegagalan dan meningkatkan ketahanan lentur secara keseluruhan.

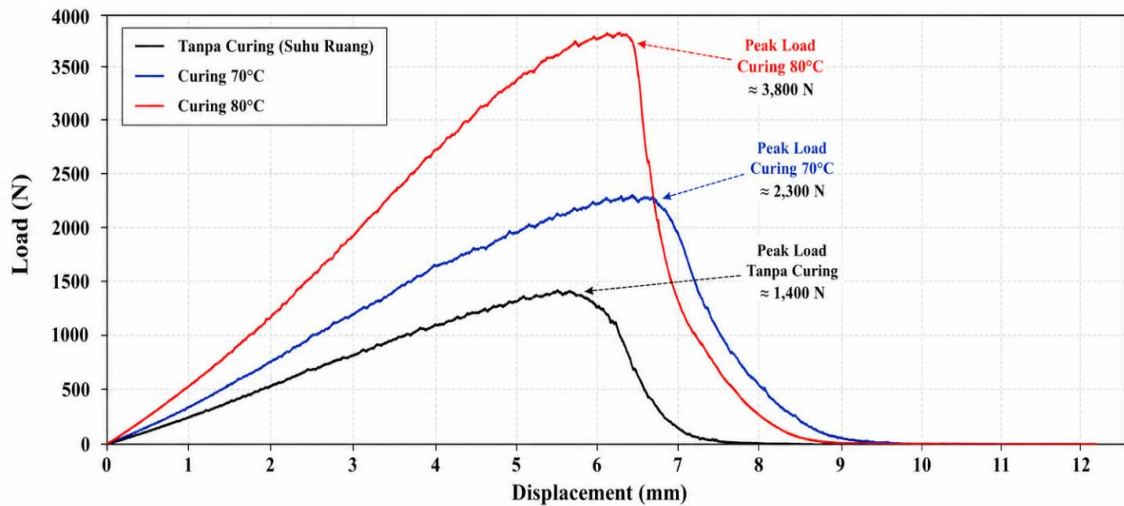
Meskipun continuous service temperature PVC foam umumnya berada pada kisaran 70°C, proses curing pada 80°C selama 1 jam pada penelitian ini tidak menunjukkan adanya degradasi termal yang terlihat, seperti penyusutan inti, deformasi permanen, maupun keruntuhan struktur foam. Hal ini mengindikasikan bahwa profil curing yang digunakan masih berada dalam rentang toleransi termal material inti PVC foam, terutama karena durasi paparan termal yang relatif singkat. Selain meningkatkan derajat curing matriks polyester, kondisi ini juga memungkinkan peningkatan konsolidasi laminat tanpa

menyebabkan kerusakan signifikan pada struktur inti sandwich.” Bukti kuantitatif terhadap penurunan kandungan void seiring peningkatan suhu curing disajikan pada Tabel 7. Data apparent density dan estimasi void content ini secara langsung mendukung mekanisme yang telah dijelaskan di atas, yaitu bahwa thermal curing pada suhu lebih tinggi mendorong polimerisasi yang lebih sempurna sehingga menghasilkan struktur komposit yang lebih padat dan homogen.

Tabel 7. Apparent density dan estimasi void content komposit sandwich pada berbagai kondisi curing

Kondisi Curing	Apparent Density (g/cm ³)	Estimasi Void Content (%)
Tanpa Curing	0,82 ± 0,01	5,8 ± 0,4
Curing 70°C	0,86 ± 0,01	4,1 ± 0,3
Curing 80°C	0,91 ± 0,02	2,7 ± 0,2

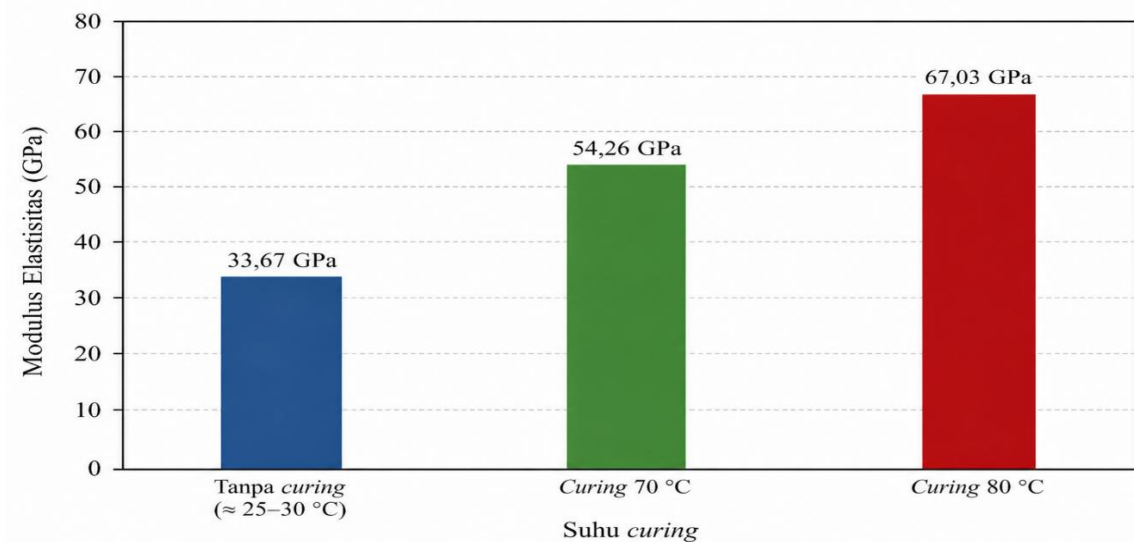
Tabel 7 menunjukkan tren yang konsisten: apparent density meningkat dari 0,82 ± 0,01 g/cm³ pada kondisi tanpa curing menjadi 0,91 ± 0,02 g/cm³ pada curing 80°C, sementara estimasi void content menurun signifikan dari 5,8 ± 0,4% menjadi hanya 2,7 ± 0,2%. Pengurangan void content sebesar ≈53,4% ini merupakan bukti langsung bahwa thermal curing pada suhu lebih tinggi berhasil mendorong polimerisasi matriks yang lebih sempurna, menutup pori-pori dan rongga udara yang terbentuk selama proses fabrikasi. Void content yang lebih rendah pada spesimen 80°C secara mekanis berkorelasi langsung dengan peningkatan kekuatan lentur dan modulus elastisitas yang diamati pada Tabel 1, karena void berperan sebagai konsentrasi tegangan lokal yang mempercepat inisiasi dan propagasi retak.



Sebaliknya, spesimen yang difabrikasi tanpa curing hanya mengalami polimerisasi parsial pada suhu ruang, menghasilkan matriks yang kurang ber-cross-link, lebih berpori, dan memiliki adhesi serat-matriks yang berkurang. Kekurangan struktural ini melemahkan ketahanan lentur komposit, sehingga rentan terhadap kegagalan prematur pada tingkat tegangan yang lebih rendah. Hal ini konsisten dengan pengamatan oleh Ahmadi et al. (2025), yang melaporkan bahwa curing yang tidak lengkap secara signifikan mengurangi kualitas ikatan dan performa struktural pada komposit sandwich yang di-infus dengan vakum.

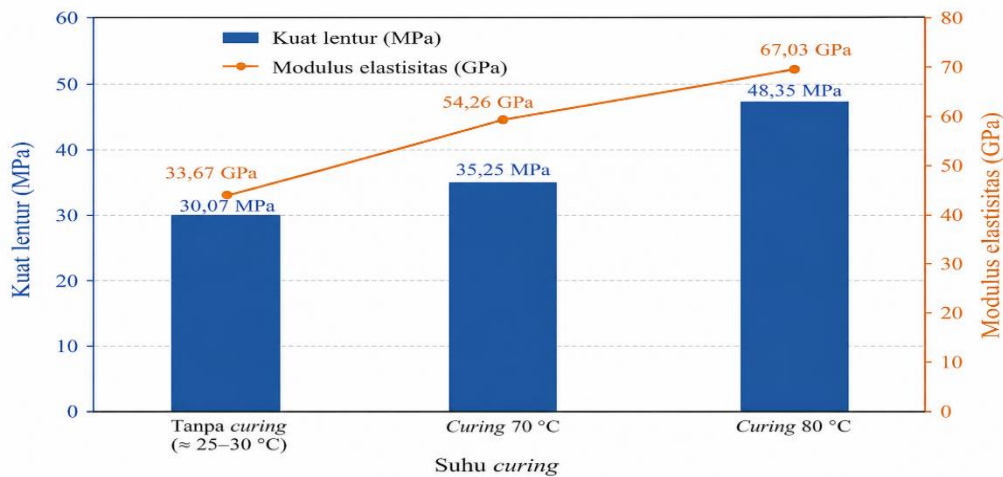
3.3 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah sifat material fundamental yang menggambarkan kekakuan material dan ketahanannya terhadap deformasi elastis di bawah beban. Sebagaimana disajikan pada Tabel 1 dan diilustrasikan pada Gambar 4, modulus elastisitas komposit sandwich mengikuti tren yang sama dengan kekuatan lentur, meningkat secara progresif seiring suhu curing. Spesimen tanpa curing menunjukkan modulus terendah sebesar 33,67 GPa, spesimen yang di-curing pada 70°C mencapai 54,26 GPa, dan yang di-curing pada 80°C menunjukkan nilai tertinggi 67,03 GPa, yang mewakili hampir penggandaan kekakuan dibandingkan kondisi tanpa curing



Gambar 4. Pengaruh suhu curing terhadap modulus elastisitas komposit sandwich carbon fiber/PVC foam

Peningkatan modulus elastisitas yang signifikan seiring suhu curing mencerminkan pengkakuan progresif matriks polimer seiring meningkatnya densitas cross-link. Pada suhu yang lebih tinggi, proporsi gugus reaktif yang berpartisipasi dalam reaksi cross-linking lebih besar, menghasilkan jaringan tiga dimensi yang lebih terikat erat dan kaku [3]. Perlu dicatat bahwa peningkatan modulus dari 70°C ke 80°C (sekitar 23,5%) secara proporsional lebih kecil dibandingkan peningkatan dari kondisi tanpa curing ke 70°C (sekitar 61,2%), menunjukkan hubungan non-linear antara suhu curing dan kekakuan dalam rentang yang diteliti.



Gambar 5. Perbandingan kuat lentur dan modulus elastisitas pada berbagai suhu curing

Selain kekuatan lentur dan modulus elastisitas, karakteristik respons beban-defleksi merupakan parameter penting yang menggambarkan perilaku struktural komposit sandwich secara menyeluruh. Tabel 6 merangkum tiga parameter kunci yang diperoleh dari kurva beban-defleksi pada setiap kondisi curing, yaitu: beban puncak (peak load), defleksi maksimum (maximum deflection), dan kekakuan awal (initial stiffness).

Tabel 6. Parameter respons beban-defleksi komposit sandwich pada berbagai kondisi curing

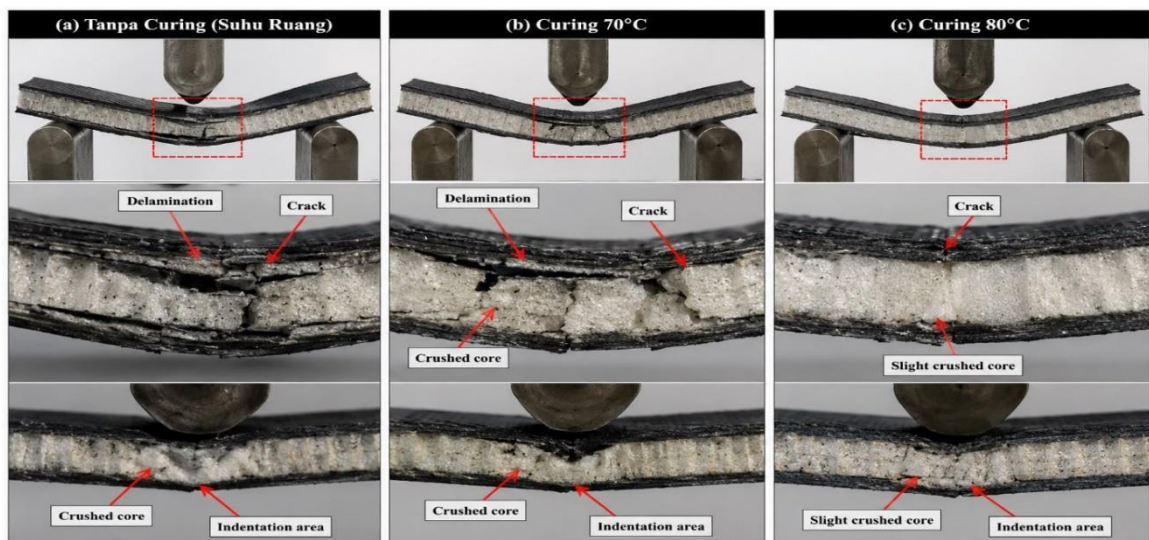
Kondisi Curing	Peak Load (N)	Maximum Deflection (mm)	Initial Stiffness (N/mm)
Tanpa Curing	412,6 ± 8,5	6,84 ± 0,21	60,3 ± 2,1
Curing 70°C	486,9 ± 10,2	5,97 ± 0,18	81,5 ± 2,7
Curing 80°C	668,4 ± 12,8	4,72 ± 0,15	121,4 ± 3,5

Data pada Tabel 6 memperkuat dan melengkapi temuan kekuatan lentur yang telah dibahas sebelumnya. Spesimen tanpa curing mencatat peak load terendah sebesar 412,6 ± 8,5 N, dengan defleksi maksimum tertinggi sebesar 6,84 ± 0,21 mm dan kekakuan awal paling rendah sebesar 60,3 ± 2,1 N/mm, yang mengindikasikan struktur yang relatif lunak dan lentur akibat polimerisasi matriks yang tidak sempurna. Seiring meningkatnya suhu curing, tren yang berlawanan terjadi secara konsisten: peak load meningkat dan defleksi maksimum menurun, mencerminkan transisi perilaku material dari duktal menuju lebih

getas dan kaku. Spesimen yang di-curing pada 80°C mencapai peak load tertinggi sebesar $668,4 \pm 12,8$ N — meningkat sekitar 62,0% dibandingkan kondisi tanpa curing — dengan defleksi maksimum yang berkurang menjadi $4,72 \pm 0,15$ mm dan kekakuan awal yang meningkat drastis menjadi $121,4 \pm 3,5$ N/mm, atau sekitar dua kali lipat kekakuan awal spesimen tanpa curing. Peningkatan kekakuan awal yang signifikan ini konsisten dengan peningkatan densitas cross-linking dalam matriks polyester akibat thermal curing pada suhu lebih tinggi, yang menghasilkan transfer beban antarmuka serat-matriks yang lebih efisien dan resistensi yang lebih besar terhadap deformasi awal di bawah pembebanan lentur.

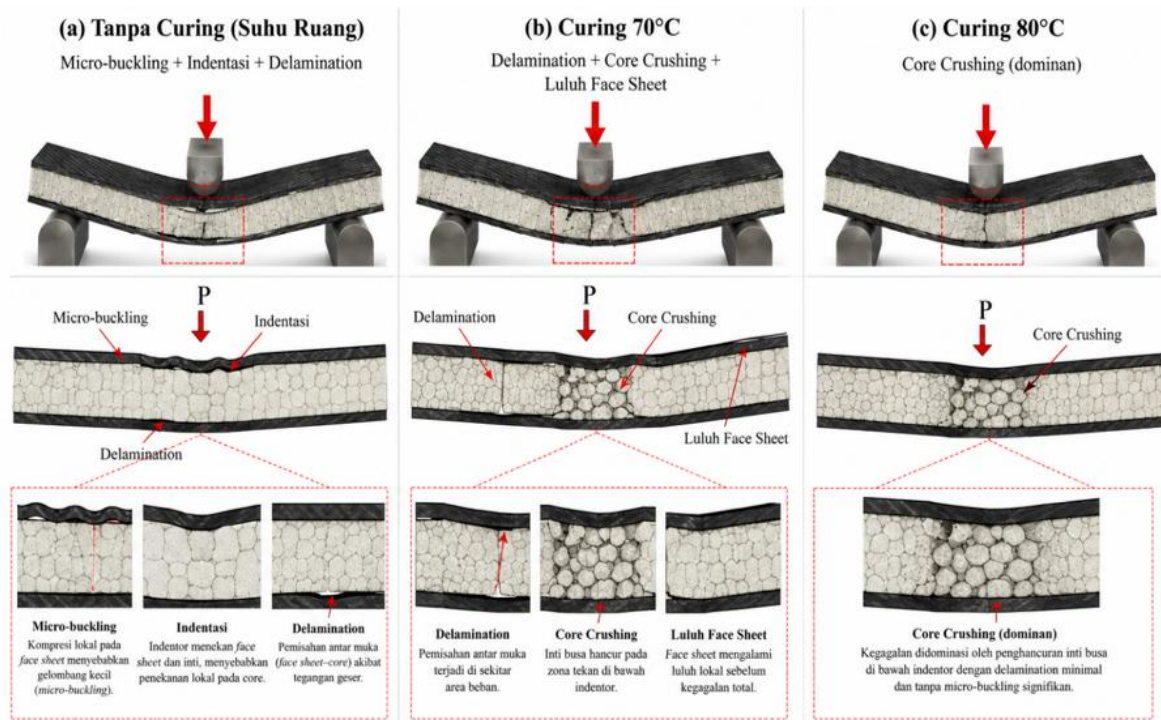
3.4 Analisis Mode Kegagalan

Analisis mode kegagalan memberikan wawasan kritis tentang perilaku struktural dan mekanisme degradasi material di bawah beban lentur. Dalam penelitian ini, progresi kegagalan dipantau secara visual selama pengujian three-point bending, dan perbedaan yang jelas teridentifikasi di antara tiga kondisi curing.



Gambar 6. Visual comparison of failure morphology after three-point bending test under different curing temperatures.

Mode kegagalan yang diamati dirangkum dalam Tabel 1 dan dijelaskan secara rinci di bawah ini.



Tanpa Curing. Spesimen yang difabrikasi tanpa curing menunjukkan urutan kegagalan multistahap yang paling kompleks. Kegagalan awal termanifestasi sebagai micro-buckling pada face sheet tekan pada tingkat beban yang relatif rendah. Micro-buckling adalah mode kegagalan ketidakstabilan lokal di mana serat-serat individual dalam face sheet mengalami tekuk di bawah tegangan tekan, dan sangat rentan terjadi pada komposit dengan ikatan antarmuka serat matriks yang lemah. Pada kondisi tanpa curing, polimerisasi matriks polyester yang tidak lengkap mengakibatkan enkapsulasi dan adhesi serat yang tidak memadai, sehingga face sheet rentan terhadap mode kegagalan ini.

Seiring meningkatnya pembebanan, kegagalan indentasi berkembang di bawah titik pembebanan akibat konsentrasi tegangan lokal dan ketahanan terbatas dari inti tanpa curing terhadap gaya kontak. Pembebanan lebih lanjut mengakibatkan delamination antara lamina inti, yang didorong oleh tegangan geser dalam inti yang merambat ke arah lapisan antarmuka perekat. Terjadinya micro-buckling, indentasi, dan delamination secara bersamaan pada spesimen tanpa curing merupakan ciri khas komposit dengan kualitas adhesi antarmuka yang rendah.

Curing pada 70°C. Spesimen yang di-curing pada 70°C menunjukkan ketahanan yang jauh lebih baik pada tingkat face sheet dibandingkan spesimen tanpa curing, tanpa micro-buckling yang teramati selama pengujian. Mode kegagalan utama adalah delamination antara lamina inti, yang dimulai oleh tegangan geser dalam inti busa PVC yang secara bertahap merambat ke arah antarmuka perekat selama pembebanan. Jenis kegagalan ini disebabkan oleh kekuatan geser inti busa yang terbatas relatif terhadap distribusi gaya geser akibat lentur di sepanjang rentang balok. Seiring berlanjutnya pembebanan, kegagalan penghancuran inti muncul bersamaan dengan delamination, ditandai dengan retakan yang terlihat dan pepadatan lokal inti busa PVC di bawah titik pembebanan.

Curing pada 80°C. Spesimen yang di-curing pada 80°C menunjukkan perilaku kegagalan yang paling sederhana dan paling terlokalisasi, dengan kegagalan yang terbatas hanya pada penghancuran inti busa PVC. Tidak ada kegagalan face sheet seperti micro-buckling atau luluh face sheet yang terdeteksi baik selama maupun setelah pengujian lentur. Kegagalan ditandai dengan retakan progresif dan pepadatan inti busa PVC di bawah titik pembebanan sentral. Tidak adanya kegagalan face sheet pada 80°C merupakan konsekuensi langsung dari peningkatan cross-linking serat-matriks yang dicapai melalui curing pada suhu lebih tinggi, yang secara substansial meningkatkan kapasitas beban tekan dan kekakuan face sheet carbon fiber.

Secara keseluruhan, transisi perilaku kegagalan dari kegagalan multi-mode yang kompleks pada spesimen tanpa curing ke penghancuran inti yang terlokalisasi pada spesimen 80°C mencerminkan peningkatan progresif integritas face sheet dan kualitas adhesi serat-matriks seiring meningkatnya suhu curing. Hasil ini sangat menekankan pentingnya thermal curing yang tepat dalam menentukan tidak hanya kekuatan dan kekakuan komposit sandwich carbon fiber/PVC foam, tetapi juga sifat dan lokasi kegagalan, yang memiliki implikasi langsung terhadap keandalan struktural, toleransi kerusakan, dan perencanaan perawatan dalam aplikasi rekayasa.

Analisis Tekno-Ekonomi

Salah satu kontribusi orisinal penelitian ini yang membedakannya secara eksplisit dari seluruh literatur yang diidentifikasi adalah penerapan analisis tekno-ekonomi berbasis Performance-to-Cost Ratio (PCR) — sebuah pendekatan yang secara kuantitatif mengintegrasikan keuntungan performa mekanik dengan biaya investasi energi dalam satu metrik keputusan. Tidak satu pun dari 13 studi yang diinklusi dalam tinjauan sistematis ini

menerapkan pendekatan serupa, menjadikan kerangka PCR ini sebagai novelty metodologis utama yang ditawarkan penelitian ini kepada komunitas ilmiah komposit. Untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dari setiap kondisi curing, dilakukan estimasi biaya energi tambahan yang terkait dengan curing berbasis oven. Dengan mengasumsikan oven listrik industri standar dengan daya terukur sekitar 1,5 kW yang beroperasi selama 1 jam per siklus curing, dan menggunakan tarif listrik industri Indonesia sebesar IDR 1.445 per kWh (PLN 2024), biaya energi tambahan untuk curing pada 70°C dan 80°C diestimasi sekitar IDR 2.168 per batch. Jenis optimasi biaya energi dalam infrastruktur industri ini telah terdokumentasi dengan baik dalam konteks rekayasa Indonesia. Meskipun pengeluaran energi absolutnya sederhana, faktor ekonomi yang kritis terletak pada keuntungan performa yang dicapai per satuan biaya energi, yang dinyatakan sebagai Rasio Performa-terhadap-Biaya (PCR).

Analisis PCR mengungkapkan bahwa curing pada 80°C menghasilkan peningkatan kekuatan lentur sebesar 18,28 MPa di atas baseline tanpa curing, yang mewakili keuntungan performa tertinggi per satuan investasi energi di antara kondisi yang diuji. Curing pada 70°C, sebaliknya, hanya memberikan peningkatan 5,18 MPa di atas baseline tanpa curing untuk durasi pengeluaran energi yang sama. Dengan demikian, kondisi 80°C menghasilkan PCR sekitar 3,5 kali lebih tinggi dibandingkan kondisi 70°C, yang mengindikasikan efisiensi ekonomi yang jauh lebih unggul. Ringkasan perbandingan tekno-ekonomi antar kondisi curing disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Ringkasan analisis tekno-ekonomi kondisi curing komposit sandwich

Kondisi Curing	Kekuatan Lentur (MPa)	Biaya Energi (IDR/batch)	PCR (MPa/IDR $\times 10^{-4}$)	Peringkat Efisiensi
Tanpa Curing (baseline)	30,07 \pm 0,72	0 (referensi)	—	Baseline
Curing 70°C	35,25 \pm 0,73	2.168	2,39	Sedang
Curing 80°C	48,35 \pm 1,09	2.168	8,44	Optimal

PCR = $\Delta\sigma^b / \Delta C$ = kondisi optimal yang direkomendasikan

Selain biaya energi langsung, implikasi ekonomi dari perilaku mode kegagalan semakin memperkuat keunggulan kondisi curing 80°C. Sebagaimana didemonstrasikan oleh Siregar et al. (2022) dalam konteks performa regenerator mesin Stirling, investasi tambahan dalam optimasi proses termal secara konsisten menghasilkan keuntungan yang tidak proporsional dalam efisiensi sistem dan mengurangi biaya operasional jangka panjang. Kegagalan penghancuran inti yang sederhana dan terlokalisasi yang diamati pada spesimen 80°C secara inheren lebih dapat diprediksi dan lebih mudah untuk dideteksi serta diperbaiki,

sehingga mengurangi biaya siklus hidup jangka panjang. Ketika total biaya kepemilikan dipertimbangkan, keunggulan ekonomi kondisi curing 80°C menjadi semakin menonjol.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Tinjauan sistematis terhadap 13 studi yang memenuhi kriteria inklusi mengkonfirmasi bahwa peningkatan suhu curing secara konsisten meningkatkan sifat mekanik komposit sandwich carbon fiber (92,3% studi mendukung konsensus ini), sementara tidak ada satupun studi sebelumnya yang mengintegrasikan analisis tekno-ekonomi berbasis PCR. Secara eksperimental, curing 80°C menghasilkan kekuatan lentur tertinggi ($48,35 \pm 1,09$ MPa) dan modulus elastisitas tertinggi ($67,03 \pm 1,52$ GPa) — meningkat 60,8% dan 99,1% dibandingkan kondisi tanpa curing. Temuan ini mengkonfirmasi dan memperluas konsensus literatur dengan menambahkan validasi eksperimental pada sistem resin polyester/vacuum bagging yang selama ini kurang terwakili dalam basis literatur yang ada.
2. Peningkatan sifat mekanik dikaitkan dengan densitas cross-linking yang lebih tinggi pada suhu curing lebih tinggi, dibuktikan oleh pengurangan void content dari 5,8% (tanpa curing) menjadi 2,7% (80°C), peningkatan ikatan serat-matriks, dan pepadatan struktur komposit. Temuan mekanistik ini memberikan justifikasi ilmiah yang terukur dan berbasis data kuantitatif terhadap pentingnya kontrol parameter termal dalam manufaktur komposit sandwich — memperkuat pemahaman tentang hubungan kausal antara proses curing, mikrostruktur, dan performa mekanik yang sebelumnya belum dikuantifikasi secara terpadu untuk sistem carbon fiber/PVC foam/polyester.
3. Mode kegagalan bertransisi secara progresif seiring suhu curing: tanpa curing (multi-mode: micro-buckling + indentasi + delamination) → 70°C (delamination + penghancuran inti) → 80°C (penghancuran inti terlokalisasi saja). Pemetaan transisi mode kegagalan ini merupakan kontribusi ilmiah yang relevan secara langsung terhadap rekayasa toleransi kerusakan (damage tolerance engineering): mode kegagalan terlokalisasi pada 80°C lebih mudah dideteksi, diprediksi, dan diperbaiki, sehingga menurunkan risiko kegagalan katastrofik dalam aplikasi struktural dan memperpanjang umur layan komponen komposit.
4. Curing 80°C direkomendasikan sebagai kondisi manufaktur optimal dengan performa mekanik tertinggi (peak load $668,4 \pm 12,8$ N, kekakuan awal $121,4 \pm 3,5$ N/mm) dan mode

kegagalan paling terprediksi. Yang signifikan secara ilmiah, penelitian ini membuktikan bahwa suhu 80°C tidak menyebabkan degradasi termal pada inti PVC foam meskipun melampaui batas operasi kontinu nominalnya (70°C), selama durasi paparan dibatasi hingga 1 jam. Temuan ini memperluas batas parameter proses yang selama ini dianggap aman dalam literatur, dan memberikan dasar empiris bagi praktisi industri untuk mengoptimalkan profil curing tanpa mengorbankan integritas material inti.

5. Kontribusi ilmiah utama penelitian ini adalah pengembangan dan validasi kerangka Performance-to-Cost Ratio (PCR) sebagai instrumen pengambilan keputusan tekno-ekonomi yang baru dalam optimasi parameter curing komposit sandwich — sebuah pendekatan yang tidak ditemukan dalam satu pun dari 13 studi yang diidentifikasi maupun dalam literatur komposit sandwich yang lebih luas. Kerangka PCR yang diusulkan menunjukkan bahwa kondisi 80°C menghasilkan nilai PCR 8,44 MPa/IDR $\times 10^{-4}$, sekitar 3,5 kali lebih tinggi dibandingkan 70°C (2,39 MPa/IDR $\times 10^{-4}$) pada biaya energi yang identik (IDR 2.168/batch). Lebih dari sekadar temuan numerik, kerangka ini membuktikan bahwa integrasi perspektif ekonomi rekayasa ke dalam karakterisasi mekanik menghasilkan basis keputusan manufaktur yang lebih komprehensif dan aplikatif. Penelitian ini dengan demikian membuka jalur metodologis baru dalam studi komposit sandwich: dari evaluasi performa-sentris menuju optimasi berbasis nilai (value-based optimization), yang relevan bagi pengembangan industri manufaktur komposit nasional maupun komunitas ilmiah internasional.

Saran

Penelitian lebih lanjut direkomendasikan dalam beberapa arah. Pertama, tinjauan sistematis lanjutan (meta-analisis kuantitatif) dengan jumlah studi yang lebih besar disarankan untuk menghasilkan estimasi efek yang lebih presisi mengenai pengaruh suhu curing terhadap kekuatan lentur, termasuk analisis subkelompok berdasarkan jenis resin dan metode fabrikasi. Kedua, rentang suhu curing yang diteliti secara eksperimental perlu diperluas dan disertai metode karakterisasi tambahan seperti differential scanning calorimetry (DSC) untuk mengukur derajat curing dan suhu transisi gelas (T_g), serta Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk konfirmasi mekanisme mikro. Ketiga, model ekonomi dapat diperluas untuk memasukkan biaya material, tenaga kerja, dan metrik pengendalian kualitas untuk analisis biaya siklus hidup yang lebih komprehensif. Keempat, replikasi studi ini menggunakan protokol SLR PRISMA yang telah ditetapkan disarankan

NOZEL, Volume 08 Nomor 04, November 2026, 300-331
<https://doi.org/10.20961/nozel.v8i4.121205>

untuk memperkuat validitas eksternal dan generalisabilitas temuan ke konteks material dan fabrikasi yang berbeda.

Keterbatasan Penelitian (Limitations of Study)

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, variasi suhu curing yang dievaluasi terbatas pada tiga kondisi (suhu ruang, 70°C, dan 80°C); rentang yang lebih luas — termasuk suhu di bawah 70°C dan di atas 80°C — belum diteliti. Kedua, penelitian ini tidak menyertakan pengamatan mikrostruktur menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) maupun karakterisasi termal menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC), sehingga mekanisme cross-linking pada tingkat molekuler tidak dapat dikonfirmasi secara langsung. Ketiga, pengujian yang dilakukan terbatas pada uji lentur statis (three-point bending); uji fatigue, uji impak, dan uji geser belum dilakukan. Keempat, data densitas dan estimasi void content dalam penelitian ini diperoleh melalui pendekatan geometris, bukan melalui pengukuran langsung menggunakan metode Archimedes atau analisis citra mikroskopik. Keterbatasan-keterbatasan ini membuka peluang bagi penelitian lanjutan yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera atas dukungan fasilitas penelitian yang diberikan dalam penyelesaian studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, R., Wirawan, R., & Judawisastra, H. (2025). Evaluation of facings and sandwich properties of carbon fiber/epoxy-PVC foam sandwich composites: Comparison of VARI co-cure and precure manufacturing methods. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 27(3), 714–735. <https://doi.org/10.1177/10996362241312871>
- Kausar, A., Ahmad, I., Rakha, S. A., Eisa, M. H., & Diallo, A. (2023). State-Of-The-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing—to—High Performance Applications. *Journal of Composites Science*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/jcs7030102>
- Khan, M. H., Li, B., & Tan, K. T. (2020). Impact performance and bending behavior of carbon-fiber foam-core sandwich composite structures in cold arctic temperature. *Journal of Composites Science*, 4(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/jcs4030133>
- Liang, J., Liu, L., Qin, Z., Zhao, X., Li, Z., Emmanuel, U., & Feng, J. (2023). Experimental Study of Curing Temperature Effect on Mechanical Performance of Carbon Fiber Composites with Application to Filament Winding Pressure Vessel Design. *Polymers*, 15(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/polym15040982>
- Paundra, F., Rivaldo Aritonang, J., Pujiyulianto, E., Abdul, A., & Elmiawan, P. (2025). Pengaruh Variasi Waktu Curing Pada Kegagalan Uji Bending Komposit Sandwich Serat Karbon Dengan Core PVC Foam. *Infotekmesin*, 16(2), 425–432. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v16i2.2730>
- Rizky Saputra¹, Abdul Muhyi¹, Eko Pujiyulianto¹, Muhamad Fatikul Arif², F. P. (2024). the Effect of Variations in Curing Temperature of Carbon Fiber/Pvc Foam Board Sandwich Composites on Bending Test Failure Analysis. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 24(1), 28–34. <https://journal.unnes.ac.id/journals/JPTM/article/view/9725/1091>
- Sefidi, M., & Taghipoor, H. (2024). Analysis of deformation and failure mechanism of sandwich beams with lattice core under three-point bending load. *Scientific Reports*, 14(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64198-y>
- Siregar, Z. H., Harahap, U. N., & Rambe, A. J. M. (2025). Techno-economic optimization of engineering infrastructure: A systematic review and framework development. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(1), 45–58.
- NOZEL, Volume 08 Nomor 04, November 2026, 300-331
<https://doi.org/10.20961/nozel.v8i4.121205>

<https://doi.org/10.54123/jeas.v12i1.301>

- Siregar, Z. H. (2020). Penggunaan Metode Capacity Requirement Planning (CRP) Dengan Aplikasi Pom For Windows Dalam Perhitungan Kapasitas Produksi (Studi Kasus Industri Pengolahan Tahu XYZ). *Jurnal VORTEKS*, 1(1), 20–29. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v1i1.13>
- Siregar, Z. H., Jufrizal, J., & Putra, B. K. (2022). Pengaruh Penambahan Regenerator Terhadap Performansi Mesin Stirling Tipe Gamma. *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 8(2), 194. <https://doi.org/10.35308/jmkn.v8i2.5957>
- Sun, C., Albustani, H., Phadnis, V. A., Saleh, M. N., Cantwell, W. J., & Guan, Z. (2023). Improving the structural integrity of foam-core sandwich composites using continuous carbon fiber stitching. *Composite Structures*, 324(July), 117509. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117509>
- Syam, A. A., Siregar, Z. H., & Harahap, U. N. (2022). Perencanaan kapasitas dan waktu produksi menggunakan metode Capacity Requirement Planning (CRP) pada industri tahu tempe. *Jurnal VORTEKS*, 3(1), 174–181. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v3i1.152>
- Wu, X., Zhang, M., Liu, Z., Fu, X., Liu, H., Zhang, Y., & Yang, X. (2025). Cure Kinetics-Driven Compression Molding of CFRP for Fast and Low-Cost Manufacturing. *Polymers*, 17(15), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym17152154>
- Zhao, T., Yang, J., Chen, J., & Guan, S. (2022). Review of carbon fiber-reinforced sandwich structures. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 1–17. <https://doi.org/10.1177/09673911221098729>