

**PENGARUH SUHU *POST CURING* TERHADAP KEKUATAN
BENDING KOMPOSIT *SANDWICH* MENGGUNAKAN *CORE*
STRUKTUR *GYROID***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Alif Adiniansyah

No. Mahasiswa : 18525135

NIRM : 2018051476

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2023

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**PENGARUH SUHU *POST CURING* TERHADAP KEKUATAN
BENDING KOMPOSIT *SANDWICH* MENGGUNAKAN *CORE*
STRUKTUR *GYROID***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Alif Adiniansyah

No. Mahasiswa : 18525135

NIRM : 2018051476

Yogyakarta, 13 November 2023

Pembimbing I,



Ir. Faisal Arif Nurgesang, S.T., M.Sc. IPP

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**PENGARUH SUHU *POST CURING* TERHADAP KEKUATAN
BENDING KOMPOSIT *SANDWICH* MENGGUNAKAN *CORE*
STRUKTUR *GYROID***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Alif Adiniansyah
No. Mahasiswa : 18525135
NIRM : 2018051476

Tim Penguji

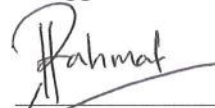
Ir. Faisal Arif Nurgesang, S.T.,
M.Sc. IPP

Rahmat Riza, S.T., M.Sc.ME.

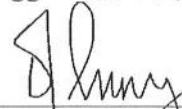
Finny Pratama Putera, S.T., M.Eng.



Tanggal : 5/12/2023



Tanggal : 5/12/2023



Tanggal : 28/11/2023

Mengetahui

Kepala Jurusan Teknik Mesin



Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhammad Alif Adiniansyah

NIM : 18525135

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknologi Industri

Judul Skripsi : PENGARUH SUHU *POST CURING* TERHADAP
KEKUATAN *BENDING* KOMPOSIT *SANDWICH*
MENGUNAKAN *CORE* STRUKTUR *GYROID*

Dengan ini menyatakan bahwa hasil penulisan skripsi ini merupakan hasil karya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata dikemudian hari skripsi ini merupakan hasil plagiasi atau penjiplakan terhadap karya orang lain, maka saya bersedia mempertanggungjawabkannya sekaligus bersedia menerima sanksi berdasarkan aturan serta tata tertib yang berlaku di Universitas Islam Indonesia.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan tidak dipaksakan.

Yogyakarta, 13 November 2023



Muhammad Alif Adiniansyah

HALAMAN PERSEMBAHAN



Tugas Akhir ini saya persembahkan kepada :
Keluarga terutama Asep Salam J selaku Ayah dan Bunda (almh) Hendriyani
serta Adik Kandung saya Atika Putri J dan Muhammad Azka J yang telah
memberikan nasehat, semangat, motivasi dan doa yang tulus kepada saya
sampai penulisan tugas akhir ini selesai.

HALAMAN MOTTO

**“Orang positif saling mendoakan, orang negatif saling menjatuhkan.
Orang sukses mengerti pentingnya proses, orang gagal lebih banyak
protes.”**

“There is no success without effort with loved ones” Fifi Alidya Lussy

**“Akan selalu ada jalan menuju sebuah kesuksesan bagi siapapun,
selama orang tersebut mau berusaha dan bekerja keras untuk
memaksimalkan kemampuan yang ia miliki.” Bambang Pamungkas**

KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kita rahmat dan hidayat-Nya sehingga penulis masih diberikan kesempatan untuk menulis dan menyelesaikan penulisan Tugas Akhir ini.

Shalawat serta salam tak lupa selalu tercurahkan kepada nabi besar kita Rasulullah Muhammad SAW, yang telah membawa Islam dari zaman Jahiliyah menuju zaman Islam yang damai seperti saat ini. Penyusunan dan penelitian tugas akhir yang berjudul “Pengaruh Suhu *Post Curing* Terhadap Kekuatan *Bending* Komposit *Sandwich* Menggunakan *Core* Struktur” tentu dapat terselesaikan karena adanya bantuan dari banyak pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

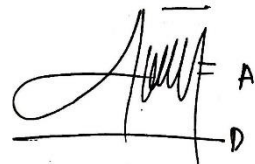
1. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Paryana Puspaputra, Dr., Ir., M. Eng selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberi dukungan akademis maupun motivasi kepada penulis demi kelancaran masa perkuliahan penulis.
3. Dosen pembimbing tugas akhir Bapak Ir. Faisal Arif Nurgesang, S.T., M.Sc. IPP yang banyak memberikan saran serta masukan demi kelancaran penyusunan tugas akhir ini.
4. Keluarga terutama Asep Salam J selaku Ayah dan Bunda (almh) Hendriyani serta Atika Putri J dan Muhammad Azka J selaku adik kandung yang selalu memberikan support, semangat, doa, dan memberikan motivasi untuk membangkitkan semangat penulis yang tak pernah berhenti kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini baik secara moral maupun material.
5. Fifi Alidya Lussy yang senantiasa memberikan semangat, motivasi, kritik, saran, masukan, dan doa, serta sebagai tempat keluh kesah dan selalu menemani jatuh bangunnya penulis dari awal sampai selesainya skripsi ini.
6. Terry, Thoriq, Fajar, Aldi, Windy, Rafi, Rafif, Akbar, Bokim, (Alm) Andrew yang tidak bosan memberikan canda dan tawa, serta semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Serta yang selalu bersedia

mendengarkan keluh kesah dan membantu penulis selama menyelesaikan skripsi ini.

7. Rekan-rekan S1 Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia Angkatan 2018/2019.
8. Muhammad Alif Satrio selaku teman satu tim Tugas Akhir
9. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung serta memberikan fasilitas kepada penulis yang tidak bisa disebut namanya satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat membantu penulis untuk bisa menyempurnakan di penelitian selanjutnya. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan informasi dan topik pembahasan dalam skripsi ini.

Yogyakarta, 13 November 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Muhammad Alif Adiniansyah', with a horizontal line underneath. To the right of the signature, there are two small capital letters, 'A' and 'D', stacked vertically.

Muhammad Alif Adiniansyah

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu *post curing* komposit *sandwich* terhadap kekuatan *bending* dengan variasi suhu pemanasan 60⁰ C, 70⁰ C dan, 80⁰ C selama 10 menit. Pembuatan *core* menggunakan 3d *Print* Teknik *Fused Deposition Modelling* (FDM) dan bahan filamen PLA+ (*Poly-actic Acid*+) dengan *Infill* 20% dan *fill pattern gyroid*. Penelitian ini menganalisis pengujian *bending* untuk mengetahui nilai kekuatan *bending*, kegagalan spesimen, dan uji SEM pada masing–masing spesimen uji. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa nilai tegangan *bending* tertinggi terdapat pada spesimen dengan suhu *post curing* 80°C, yakni sebesar 67.3 Mpa dengan kegagalan spesimen *core crush*. Hasil uji SEM menunjukkan bahwa *void* sudah tidak terdapat lagi pada suhu *post curing* 80°C, sehingga dapat disimpulkan bahwa *post curing* mampu meningkatkan kekuatan *bending* komposit *sandwich*.

Kata Kunci : Komposit *Sandwich*, *Post Curing*, Kekuatan *Bending*.

ABSTRACT

This research aims to determine the effect of sandwich composite post curing temperature on bending strength with varying heating temperatures of 60⁰ C, 70⁰ C and, 80⁰ C for 10 minutes. The core was made using 3d Print Fused Deposition Modeling (FDM) technique and PLA+ (Poly-actic Acid+) filament material with 20% infill and gyroid fill pattern. This research analyzes bending tests to determine bending strength values, specimen failure, and SEM tests on each test specimen. Based on the test results that have been carried out, it shows that the highest bending stress value is found in the specimen with a post curing temperature of 80°C, namely 67.3 Mpa with failure of the core crush specimen. SEM test results show that the fewest voids are not found at a post curing temperature of 80°C, so it can be concluded that the post curing temperature is able to increase the bending strength of the sandwich composite.

Keywords : *Sandwich Composite, Post Curing, Bending Strength.*

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iii
Lembar Pernyataan Keaslian	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar	vii
Abstrak	ix
Abstract	x
Daftar Isi	xi
Daftar Tabel	xiii
Daftar Gambar	xiv
Daftar Notasi	xvi
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	8
2.2.1 3D Print FDM	8
2.2.2 Komposit	9
2.2.3 Komposit <i>Sandwich</i>	9
2.2.4 <i>Gyroid</i>	10
2.2.5 <i>Vacuum Infusion</i>	11
2.2.6 <i>Cross-linking</i>	13
2.2.7 <i>Post Curing</i>	14

2.2.8 Pengujian <i>Bending</i>	15
2.2.9 Modus Kegagalan Komposit <i>Sandwich</i>	17
2.2.10 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	18
Bab 3 Metode Penelitian	19
3.1 Alur Penelitian	19
3.2 Desain Eksperimen	20
3.3 Alat dan Bahan	21
3.4 Dimensi Spesimen Pengujian <i>Bending</i>	25
3.5 Pembuatan <i>Core</i> dengan Mesin <i>3D Printing</i>	25
3.6 Susunan Komposit <i>Sandwich</i>	26
3.7 Proses Komposit <i>Sandwich</i>	27
3.8 Proses <i>Post Curing</i> Spesimen.....	30
3.9 Proses Pengujian <i>Bending</i>	30
3.10 Proses <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	31
Bab 4 Hasil dan Pembahasan	33
4.1 Analisis Pengaruh Variasi Suhu Terhadap Tegangan <i>Bending</i> , Kegagalan Spesimen, dan Morfologi (Hasil Uji SEM)	33
Bab 5 Penutup.....	38
5.1 Kesimpulan.....	38
5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya.....	39
Daftar Pustaka	40

DAFTAR TABEL

Tabel 3- 1 Parameter Tetap dan Variasi Spesimen.....	20
Tabel 3- 2 Parameter Tetap 3D <i>Printing</i>	21
Tabel 3- 3 Alat dan Bahan.....	21
Tabel 3- 4 Parameter Tetap Pembuatan <i>Core</i>	25
Tabel 3- 5 Perbandingan Epoksi dan <i>Hardener</i>	29
Tabel 3- 6 Suhu dan Waktu <i>Post Curing</i>	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2- 1 <i>3D Printing</i>	8
Gambar 2- 2 Komposit	9
Gambar 2- 3 Komposit <i>Sandwich</i>	10
Gambar 2- 4 <i>Gyroid</i>	11
Gambar 2- 5 <i>Vacuum Infusion</i>	12
Gambar 2- 6 <i>Cross-linking</i>	13
Gambar 2- 7 <i>Microwave</i>	14
Gambar 2- 8 <i>Three Point Bending</i>	15
Gambar 2- 9 Modus Kegagalan Komposit <i>Sandwich</i>	17
Gambar 2- 10 Mesin <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	18
Gambar 3- 1 Diagram Alur Penelitian.....	20
Gambar 3- 2 Dimensi Spesimen Pengujian <i>Bending</i>	25
Gambar 3- 3 Pembuatan <i>Core</i> dengan Mesin <i>3D Printing</i>	26
Gambar 3- 4 Susunan Komposit <i>Sandwich</i>	26
Gambar 3- 5 Pelapisan Lem <i>3M Adhesive</i>	27
Gambar 3- 6 Proses Komposit <i>Sandwich</i>	27
Gambar 3- 7 Pemasangan Selang Spiral.....	28
Gambar 3- 8 Penyusunan Bahan ke <i>Vacuum</i>	28
Gambar 3- 9 Proses Pencampuran Epoksi dan <i>Hardener</i>	29
Gambar 3- 10 Proses <i>Vacuum Infusion</i>	29
Gambar 3- 11 Proses <i>post Curing</i> Spesimen	30
Gambar 3- 12 Proses Pengujian <i>Bending</i>	30
Gambar 3- 13 Sampel Spesimen	31
Gambar 3- 14 <i>Coating</i> Mesin	31
Gambar 3- 15 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	32
Gambar 4- 1 Grafik Pengaruh Suhu Terhadap Tegangan <i>Bending</i>	33
Gambar 4- 2 Analisa Kegagalan Spesimen dengan Variasi Suhu <i>Post-Curing</i> pada (a) Suhu Ruang, (b) 60°C, (c) 70°C, dan (d) 80°C.....	34

Gambar 4- 3 Analisa Hasil Uji SEM (a) Suhu Ruang dengan Perbesaran 200x, (b) Suhu Ruang dengan Perbesaran 1000x, (c) Suhu 80°C dengan Perbesaran 200x, dan (d) Suhu 80°C dengan Perbesaran 200x 36

DAFTAR NOTASI

σ = Tegangan *Bending* (N/mm²)

ε = Regangan Maksimum (N/mm²)

P = Beban yang diberikan (N)

L = Jarak antara titik tumpuan (mm)

B = Lebar spesimen (mm)

H = Tebal spesimen (mm)

D = Defleksi Maksimum (mm)

d = Tebal Spesimen (mm)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum, komposit dapat didefinisikan sebagai penggabungan material yang terdiri dari dua bahan atau lebih yang memiliki sifat fisika atau kimia dan karakteristik yang berbeda antara masing-masing bahan. Penggabungan antara bahan komposit yang terdiri dari bahan penguat atau pengisi (*reinforcement*) dan bahan pengikat (*matrix*) bertujuan untuk menghasilkan bahan yang lebih efisien, seperti lebih kuat, lebih ringan, dan lainnya. Pada dasarnya, penggunaan material komposit adalah untuk meningkatkan sifat bahan dasarnya, sehingga membentuk material baru dengan karakteristik yang dibutuhkan. (Zweben, 2015).

Komposit *Sandwich* dapat diartikan sebagai metode material komposit berlapis yang dibentuk dengan mengikat dua permukaan (*skin*) tipis ke inti (*core*). Strukturnya terdiri dari dua *skin* yang ditekan. Dan bagian *core* berfungsi untuk memberikan kekakuan pada struktur. Keunggulan antar bahan komposit dapat digabungkan dalam komposit *sandwich* melalui pemilihan material *skin* dan *core* yang tepat. Oleh karena itu, bagian bahan komponen komposit *sandwich* harus disesuaikan dengan kebutuhan penggunaannya (Kollmann, Kuenzi, & Stamm, 1975).

Dalam mencetak *core*, penelitian ini menggunakan teknik 3D *Printing Fused Deposition Modelling* (FDM) yang menggunakan material *Poly-lactid Acid + (PLA+)*. Teknik 3D *Printing FDM* digunakan untuk menciptakan suatu objek dari data model 3D yang dicetak melalui lapisan demi lapisan, teknologi ini ditujukan untuk menciptakan objek dengan menambahkan material dan memiliki akurasi geometris yang tinggi. Keunggulan dari teknik 3D *Printing* terdapat pada cara kerjanya yang mampu membentuk *core* dengan struktur yang akurat. 3D *Printing* memungkinkan pembuatan komposit yang diinginkan memiliki hasil yang sangat baik, serta mendapatkan akurasi ukuran dan geometri yang tepat, sehingga 3D *Printing* memiliki proses yang lebih fleksibel dan tingkat produksi yang lebih tinggi (Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017).

Penggunaan metode komposit *sandwich* yang terdiri dari bagian inti dan bagian permukaan yang tepat akan menghasilkan material yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan penggunaannya. Selanjutnya, *Gyroid* merupakan geometri 3D yang terdiri dari garis bergelombang 2D yang berpotongan dan menciptakan struktur yang kuat dan kokoh. *Infill gyroid* mengacu pada objek cetakan 3D yang mengintegrasikan pola *gyroid* sebagai geometri internalnya. Pada 3D *Printing* FDM, biasanya menghasilkan pola pengisian untuk mengurangi kepadatan bagian cetakan 3D. Bagian akhir pada struktur *gyroid* terlihat kokoh, namun di dalamnya memungkinkan terdapat ruang berongga yang membantu menghemat biaya filamen dan waktu pencetakan, sehingga mampu memberikan kekuatan dan ketahanan yang lebih besar dibandingkan bagian yang berongga murni. Struktur *core gyroid* memiliki keunggulan karena memiliki sifat elastis, kekuatan dan rasio kepadatan yang baik, konsumsi bahan lebih sedikit, dan kecepatan pencetakan lebih cepat (Boissonneault, 2022).

Untuk membuat produk komposit, terdapat sebuah proses yaitu proses *curing*. *Curing* merupakan proses pengkondisian suhu yang dilakukan pada bahan penguat dan pengikat dari material komposit yang bertujuan agar kedua bahan yang disatukan memiliki daya ikat yang tinggi. Peningkatan pada suhu yang terjadi dalam proses *curing* akan menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan *curing* yang bersamaan dengan peningkatan kekuatan, sehingga terjadi *cross-linking* terhadap material komposit. Terjadinya *cross-linking* pada komposit akan menghasilkan pepadatan bahan pengikat dalam proses *curing*, sehingga berfungsi sebagai pengisi *void* yang terdapat di dalam komposit dan akan meningkatkan kualitas komposit (Suryono, Faizal, & Hestiawan, 2020).

Berdasarkan latar belakang di atas, pada penelitian ini penulis ingin mengkaji lebih jauh terkait “Pengaruh Suhu *Curing* terhadap Kekuatan *Bending* Komposit *Sandwich* Menggunakan *Core* Struktur *Gyroid*”. Penelitian ini menggunakan *core* dengan struktur *gyroid* yang dibentuk menggunakan 3D *Printing* FDM dengan filamen PLA+. Tujuan pengujian *bending* yang dilakukan adalah untuk mengetahui nilai kekuatan *bending* pada *core* komposit *sandwich*. Oleh karena itu, penelitian yang dilakukan oleh penulis berkaitan tentang pengaruh

suhu terhadap *core* 3D *Printing* FDM dengan metode komposit *sandwich* untuk mengetahui pengaruhnya setelah dilakukan pengujian *bending*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh suhu *post curing* terhadap kekuatan *bending* pada komposit *sandwich* yang dibuat menggunakan *core gyroid* 3D *printing* dan *skin* dari *carbon fiber* serta modus kegagalannya?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Spesimen yang digunakan mengacu pada standar ASTM C393
2. Lama waktu *post curing* 10 menit
3. Suhu *post curing* yang digunakan adalah 27°C, 60°C, 70°C dan, 80°C
4. Struktur *core* yang digunakan adalah *gyroid*
5. Pengujian *bending* yang digunakan adalah metode *three-point bending*
6. Material yang digunakan adalah PLA+
7. Karbon yang digunakan adalah tipe twill
8. Struktur mikro dilihat menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM)
9. Proses komposit *sandwich* dilakukan di Laboratorium Manufaktur Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi *post curing* pada suhu 27°C, 60°C, 70°C dan, 80°C terhadap kekuatan *bending* komposit *sandwich* yang dibuat menggunakan *core gyroid* 3D *printing* dan *skin* dari *carbon fiber* serta modus kegagalannya.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat dari penelitian yang dilakukan ini yaitu :

1. Menjadi referensi penelitian tentang komposit *sandwich* menggunakan *core 3D Printing* struktur *Gyroid*.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian atau perancangan, manfaat penelitian atau perancangan, dan sistematika penelitian.

BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bab ini berisikan tinjauan pustaka mengenai dasar teori yang melandasi pembuatan skripsi.

BAB III Metode Penelitian

Pada bab ini berisikan diagram alir penelitian, alat dan bahan, prosedur penelitian, dan pengujian spesimen.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini berisikan analisa data, hasil pengujian *bending*, analisa modulus kegagalan, penampilan grafik.

BAB V Penutup

Pada bab ini berisikan tentang kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Pada penelitian yang dilakukan oleh Johan Pahlevi Rahmani yang berjudul “Studi Pengaruh Jenis Perekat dan Variasi Suhu *Curing* terhadap Kekuatan *Bending* Komposit *Sandwich* Menggunakan *Core 3D Printing*” menghasilkan analisa bahwa *curing* yang dilakukan selama 60 menit terbukti mempengaruhi tegangan *bending* pada komposit *sandwich core honeycomb* dengan material ABS melalui *3D Printing* dan peningkatan suhu *curing* yang terjadi mampu memberikan variasi tegangan *bending*. Hal tersebut dibuktikan melalui hasil suhu *curing* 27°C dengan tegangan *bending* 9,57 Mpa, suhu *curing* 40°C dengan tegangan *bending* 11,38 MPa dan suhu *curing* 60°C dengan tegangan *bending* 10,57 Mpa (Rahmani, 2022). Berdasarkan penelitian tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa *curing* yang dilakukan dapat mempengaruhi tegangan *bending*, namun *curing* mampu mengurangi nilai kekakuan pada komposit *sandwich core 3D printing*.

Pengaruh tersebut sesuai dengan proses peningkatan pada suhu yang terjadi dalam proses *curing* menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan *curing* yang bersamaan dengan peningkatan kekuatan ikatan antar bahan pembentuk, sehingga terjadi *cross-linking* terhadap material komposit. Terjadinya *cross-linking* pada komposit akan menghasilkan pemadatan bahan pengikat dalam proses *curing*, sehingga berfungsi sebagai pengisi celah-celah yang terdapat di dalam komposit dan akan meningkatkan kualitas komposit (Suryono, Faizal, & Hestiawan, 2020). Oleh karena itu, penelitian yang ingin dilakukan penulis menggunakan: variasi suhu *curing* 60°C, 70°C dan, 80°C; durasi *curing* selama 10 menit; dan material *core* PLA+ sebagai pembeda, serta untuk mendapatkan hasil melalui variasi penelitian yang berbeda, namun tetap menggunakan *3D printing* sebagai sarana pembuatan *core*.

Meskipun demikian, penggunaan struktur *honeycomb* memiliki kelemahan. Berdasarkan jurnal yang berasal dari *Journal of Science and Applicative Technology* dengan judul “Analisis Sifat Mekanik dari Struktur Seluler yang

Difabrikasi dengan Printer 3D” menjelaskan bahwa struktur *gyroid* didominasi oleh lekukan dengan radius tanpa bersilangan di lapisan yang sama, sedangkan struktur *honeycomb* didominasi oleh silangan yang berbentuk jembatan. Silangan yang terdapat pada struktur *honeycomb* akan menciptakan sekat yang dapat mengurangi daya rekat antar lapisan. Hal tersebut cukup berpengaruh terhadap mekanisme penguncian dalam menyeimbangkan beban, sehingga akan terjadi penurunan kekuatan tekan dan penyerapan energi dari struktur (Muhyi, Ferdianto, Rajagukguk, Sipahutar, & Arif, 2023). Oleh karena itu, penelitian yang ditujukan untuk mengetahui pengaruh suhu *curing* menggunakan 3D Print FDM terhadap kekuatan *bending* untuk pembuatan komposit *sandwich* menggunakan struktur *gyroid*, sebab struktur *gyroid* lebih efisien daripada struktur *honeycomb*, sehingga desain struktur ringan berbiaya rendah mampu memiliki karakteristik kekuatan dan penyerapan energi mekanik yang baik.

Di sisi lain, penggunaan *printer* 3D sebagai sarana membentuk *core* struktur *gyroid* dikarenakan prosesnya yang sangat cepat dan desain rumit yang dapat difabrikasi dengan mudah. Pada jurnal yang berjudul “Identifikasi Jenis *Infill Pattern* pada Proses 3D *Printing* yang Menghasilkan Hasil Cetak dengan Kekuatan Tekan dan Panjang Filamen yang Optimal” menjelaskan bahwa kekuatan tekan dari pencetakan 3D *Printing* dengan material PLA dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter proses, yakni; ketebalan lapisan, kerapatan pengisian, kecepatan cetak, temperatur meja, temperatur *nozzle*, sudut raster, proses perlakuan panas, dan *infill pattern*. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa *infill pattern* atau struktur *gyroid* membutuhkan material yang paling sedikit dibandingkan dengan *honeycomb*. Panjang filamen *honeycomb* yang dibutuhkan sebesar 1229 mm, sedangkan *gyroid* hanya membutuhkan filamen sebesar 985 mm. Meskipun struktur *honeycomb* menghasilkan spesimen dengan kekuatan tekan paling besar, namun filamen tersebut membutuhkan filamen yang paling panjang dan kurang efisien (Wijayanto, Handoko, Noel, Anggawirawan, & Suteja, 2022). Oleh karena itu, penelitian yang dilakukan oleh penulis untuk mempertimbangkan perbandingan antara kekuatan dan efisiensi, maka penelitian ini menggunakan struktur *gyroid* dengan waktu *curing* selama 10 menit pada suhu 60°C, 70°C dan,

80°C, menggunakan filamen PLA+ yang ditujukan untuk membentuk *core* komposit *sandwich* melalui 3D *Printing* FDM untuk menguji kekuatan *bending*.

Selanjutnya, penggunaan komposit *sandwich* pada penelitian ini dikarenakan pengembangan komposit tersebut merupakan hal yang sangat potensial. Berdasarkan jurnal “Pengaruh Variasi Jenis *Core*, Temperatur *Curing* dan *Post-Curing* terhadap Karakteristik *Bending* Komposit *Sandwich* Serat Karbon dengan Metode *Vacuum Infusion*” yang ditulis oleh Wahyu Budi Utomo dan Novi Sukma Drastiawati dengan variasi *core* kayu balsa, *honeycomb polypropylene*, dan PVC *Foam Board* menghasilkan analisis bahwa: 1) terjadi keretakan pada *skin* dan *core* karena adanya gelembung udara atau *void* yang mempengaruhi nilai kekuatan tekan, sehingga semakin banyak gelembung udara dalam spesimen akan menurunkan kekuatan *bending*nya, 2) temperatur yang lebih tinggi menyebabkan lebih banyak *void*, 3) *Matrix Cracking* mengurangi nilai *bending* yang disebabkan oleh ketidakmampuan *matrix* menerima beban uji *bending* (Utomo & Drastiawati, 2021). Peneliti tersebut menyarankan untuk menggunakan temperatur *curing* di bawah batas suhu resin epoxy yaitu antara 60°C, 70°C dan, 80°C, sehingga terdapat relevansi penelitian yang dilakukan oleh penulis untuk mengambil suhu *curing* 60°C, 70°C dan, 80°C. Oleh karena itu, penulis mengambil variasi penelitian yang berbeda terkait struktur *core*, bahan *core*, dan suhu *curing* sebagai penelitian yang lebih lanjut.

Berdasarkan beberapa kajian pustaka di atas yang telah ditulis oleh peneliti lainnya, maka dapat dijadikan sebagai referensi penulis dalam penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian yang dilakukan oleh penulis dengan judul “Pengaruh Suhu *Curing* pada Struktur *Gyroid* Menggunakan 3D *Print* FDM terhadap Kekuatan *Bending* untuk Pembuatan Komposit *Sandwich*” memiliki variasi penelitian yang berbeda, sehingga dapat berkontribusi sebagai penelitian selanjutnya.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 3D Print FDM

3D *Printing* FDM digunakan untuk menciptakan suatu objek dari data model 3D yang dicetak melalui lapisan demi lapisan, teknologi ini ditujukan untuk menciptakan objek dengan menambahkan material dan memiliki akurasi geometris yang tinggi. Keunggulan dari teknik 3D *Printing* terdapat pada kinerjanya yang mampu membentuk *core* dengan struktur yang baik. 3D *Printing* memungkinkan pembuatan komposit yang diinginkan memiliki kinerja mekanik yang tinggi dan fungsionalitas yang sangat baik, serta mendapatkan akurasi ukuran dan geometri komposit yang tepat, sehingga 3D *Printing* memiliki proses yang lebih fleksibel dan tingkat produksi yang lebih tinggi (Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017).

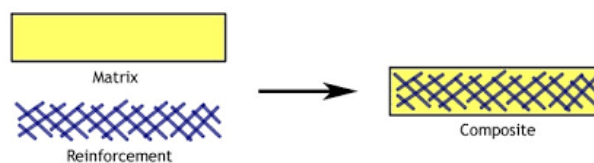
Dalam pencetakan 3D *Fused Deposition Modeling* (FDM) terdapat beberapa bahan filamen yang biasa digunakan sebagai bahan pengisi bentuk, seperti *polyethylene terephthalate glycol* (PETG), *nylon*, *thermoplastic polyurethane* (TPU), *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), *polylactic acid* (PLA/PLA+), dan lain-lain. PLA mempunyai karakteristik daya rekat lapisan yang baik, lebih ramah cetak, dan memiliki harga yang terjangkau (Alhazmi, 2020).



Gambar 2- 1 3D *Printing*

2.2.2 Komposit

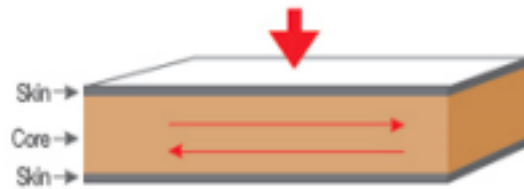
Komposit dapat didefinisikan sebagai penggabungan material yang terdiri dari dua bahan atau lebih yang memiliki sifat fisika atau kimia dan karakteristik yang berbeda antara masing-masing bahan. Penggabungan antara bahan komposit yang terdiri dari bahan penguat atau pengisi (*reinforcement*) dan bahan pengikat (*matrix*) bertujuan untuk menghasilkan bahan khusus yang lebih efisien, seperti lebih kuat, lebih ringan, dan lainnya. Pada dasarnya, penggunaan material komposit adalah untuk meningkatkan sifat bahan dasarnya, sehingga membentuk material baru dengan karakteristik yang dibutuhkan (Zweben, 2015).



Gambar 2- 2 Komposit

2.2.3 Komposit *Sandwich*

Komposit *sandwich* dibuat dengan tujuan untuk efisiensi berat yang optimal, namun mempunyai kekakuan dan kekuatan yang tinggi. Sehingga untuk mendapatkan karakteristik tersebut, pada bagian tengah diantara kedua *skin* dipasang *core*. Komposit *sandwich* merupakan jenis komposit yang sangat cocok untuk menahan beban lentur, impact, meredam getaran dan suara. Komposit *sandwich* dibuat untuk mendapatkan struktur yang ringan tetapi mempunyai kekakuan dan kekuatan yang tinggi. Biasanya pemilihan bahan untuk komposit *sandwich*, syaratnya adalah ringan, tahan panas dan korosi, serta harga juga dipertimbangkan. Dengan menggunakan material inti yang sangat ringan, maka akan dihasilkan komposit yang mempunyai sifat kuat, ringan, dan kaku (Widiyono, 2021).



Gambar 2- 3 Komposit *Sandwich*

1. *Core*

Core adalah bagian inti dari komposit *sandwich*, bagian ini harus cukup kaku agar jarak antar permukaan terjaga. Dengan kekakuannya, *core* harus mampu menahan beban geser agar tidak terjadi pergeseran antar permukaan. Bahan untuk pembuatan *core* harus memiliki tingkat kekakuan yang tinggi, karena apabila *core* menggunakan bahan dengan tingkat kekakuan yang rendah, maka kekakuan pada *sandwich* akan hilang atau berkurang. Pada penelitian ini *core* yang digunakan 3D *Printing* berbentuk *gyroid* (Hartono, 2016).

2. *Skin*

Skin merupakan bagian terluar dari komposit *sandwich*, letak *skin* pada komposit *sandwich* terdapat pada bagian terluar untuk melapisi *core*. Fungsi dari *skin* untuk menahan *tensile* dan *compressive stress*. *Skin* biasanya terbuat dari serat ataupun partikel. Untuk meningkatkan sifat mekanis kekuatan *bending* struktur komposit *sandwich* dibutuhkan pemilihan jenis *skin* yang tepat (Hartono, 2016).

2.2.4 *Gyroid*

Gyroid adalah struktur alami yang ditemukan pada tahun 1970 oleh ilmuwan NASA Alan Schoen. Strukturnya ditandai dengan tidak terdapat garis lurus dan permukaannya merupakan *Triply Periodic Minimal Surface* (TPMS). TPMS adalah permukaan dengan kelengkungan rata-rata nol dan memiliki ciri minimalisasi area lokal yang berarti setiap *patch* yang cukup kecil diambil dari TPMS memiliki area terkecil diantara semua *patch* yang dibuat di bawah batas yang sama. *Gyroid* merupakan geometri 3D yang terdiri dari garis bergelombang 2D yang berpotongan dan menciptakan

struktur yang kuat dan kokoh. *Infill gyroid* mengacu pada objek cetakan 3D yang mengintegrasikan pola *gyroid* sebagai geometri internalnya. Pada 3D *Printing* FDM, biasanya menghasilkan pola pengisian untuk mengurangi kepadatan bagian cetakan 3D. Bagian akhir pada struktur *gyroid* terlihat kokoh, namun di dalamnya memungkinkan terdapat ruang berongga yang membantu menghemat biaya filamen dan waktu pencetakan, sehingga mampu memberikan kekuatan dan ketahanan yang lebih besar dibandingkan bagian yang berongga murni. Keunggulan struktur *core gyroid* yakni sifatnya yang hampir isotropik, kekuatan dan rasio kepadatan yang baik, konsumsi bahan lebih sedikit, dan kecepatan pencetakan lebih cepat (Boissonneault, 2022).



Gambar 2- 4 Gyroid

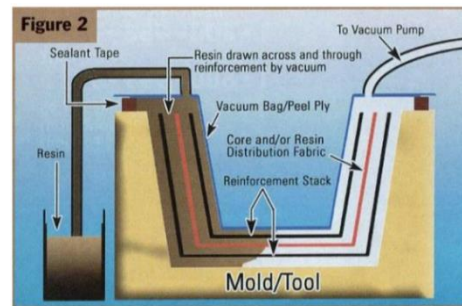
2.2.5 Vacuum Infusion

Vacuum infusion adalah metode memanfaatkan kevakuman udara untuk proses pembuatan komposit yang disebut juga dengan proses cetakan tertutup, karena cetakan tersebut akan ditutup dengan *vacuum bag* yang diberi lem perekat (*Sealing-tape*) untuk mencegah udara yang masuk ke dalam cetakan, setelah tervakum masuk proses pengaliran resin yang akan mengisi cetakan tersebut. Proses ini digunakan dengan tujuan mengurangi atau meminimalisir gelembung udara yang ada pada cetakan dan resin yang berlebihan pada cetakan (Salamun, 2017).

Penggunaan pompa vakum pada proses ini untuk menghisap udara yang ada pada cetakan yang telah diletakkan komposit untuk proses pembuatan. Setelah dilakukan vakum pada cetakan, udara diluar *vacuum bag* akan menekan ke arah dalam dan menyebabkan udara pada cetakan

akan diminimalisir. Proses *vacuum infusion* ini dibandingkan dengan metode *hand lay-up* dan *vacuum bagging*, proses ini memberi penguatan konsentrasi yang lebih tinggi dan adhesi yang lebih baik antara lapisan.

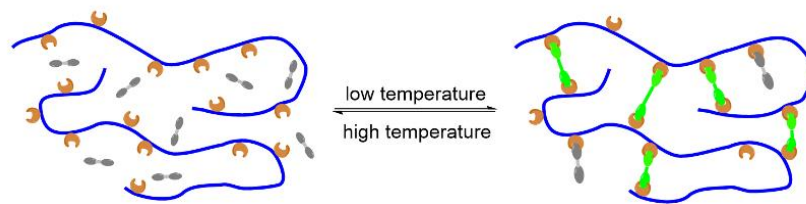
Tekanan vakum atau tekanan yang di dalam cetakan lebih rendah daripada tekanan di luar cetakan, tekanan vakum tersebut yang berperan untuk proses pembuatan komposit dengan metode *vacuum infusion* dan tekanan tersebut menentukan bentuk dari benda yang dihasilkan. Pada metode *vacuum infusion* ini terdapat kelebihan dari proses pembuatannya, karena pada proses pembuatannya tidak memerlukan tenaga manusia yang banyak. Pada metode ini manusia hanya menyiapkan beberapa bahan dan memantau kerja dari alat tersebut (Hidayat, 2020).



Gambar 2- 5 *Vacuum Infusion*

2.2.6 Cross-linking

Cross-linking merupakan terbentuknya ikatan-ikatan yang menghubungkan suatu rantai polimer dengan rantai polimer lain. Dalam hal ini, *cross-linking* terjadi akibat peningkatan kecepatan *curing* yang bersamaan dengan peningkatan kekuatan material komposit. *Cross-linking* yang terjadi pada komposit akan menghasilkan pepadatan bahan pengikat dalam proses *curing*, sehingga berfungsi sebagai pengisi celah-celah atau *void* yang terdapat di dalam komposit dan akan meningkatkan kualitas komposit (Suryono, Faizal, & Hestiawan, 2020).



Gambar 2- 6 *Cross-linking*

2.2.7 *Post Curing*

Curing merupakan proses pengkondisian suhu bahan penguat dan bahan pengikat dari material komposit agar bahan pengikat memiliki daya ikat yang tinggi pada bahan penguatnya. *Curing* dimulai pada saat pembentukan komposit pada suhu ruang yang menghasilkan komposit dengan kekuatan yang cukup rendah. Dalam prosesnya, proses *curing* yang baik terjadi apabila dilakukan pemanasan di atas suhu ruang atau suhu kamar dan dilakukan setelah bahan komposit menyatu atau padat.

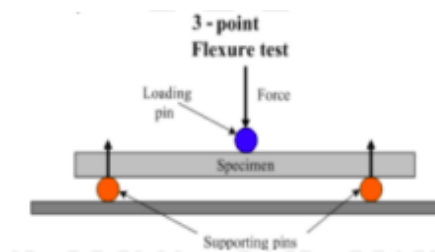
Post-curing dilakukan untuk bertujuan memperbaiki sifat-sifat pada komposit *sandwich*. Proses *post-curing* dilakukan dengan memanaskan spesimen yang akan diuji pada suhu tertentu, namun tidak melebihi temperatur maksimal yang dapat diterima oleh material komposit. Oleh karena itu, *post-curing* pada penelitian ini dilakukan selama 10 menit pada suhu 60⁰ C, 70⁰ C dan, 80⁰ C. Peningkatan pada suhu yang terjadi dalam proses *curing* menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan *curing* yang bersamaan dengan peningkatan kekuatan ikatan antar bahan pembentuk, sehingga terjadi *cross-linking* terhadap material komposit. Terjadinya *cross-linking* pada komposit akan menghasilkan pepadatan bahan pengikat dalam proses *curing*, sehingga berfungsi sebagai pengisi *void* yang terdapat di dalam komposit dan akan meningkatkan kualitas komposit (Suryono, Faizal, & Hestiawan, 2020).



Gambar 2- 7 *Microwave*

2.2.8 Pengujian *Bending*

Dalam aplikasinya komposit tak pernah lepas dari proses pembebanan mekanik terutama beban *bending*. Pada umumnya kelemahan komposit terhadap beban *bending* terletak pada bagian yang belum merata pemampatannya antara serat dan matrik pada bagian bawah pada spesimen. Pada lapisan ini mempunyai kekuatan tarik maksimum dan akan mengalami kegagalan paling awal karena tidak mampu menahan tegangan tarik pada bagian bawah komposit, sehingga akan terjadi retak lebih awal. Kegagalan komposit akibat beban *bending* di awal dari *skin* komposit sisi belakang dan dilanjutkan dengan kegagalan *core*, delaminasi antara *skin* dan *core*. Spesimen dan metode pengujian mengacu pada standar ASTM C393 (Widiyono, 2021).



Gambar 2- 8 *Three Point Bending*

Data pengujian *bending* yang sudah dilakukan sudah didapatkan hasil pengujiannya, maka langkah selanjutnya yaitu mencari nilai dari tegangan *bending*, modulus elastisitas, kekakuan *bending*, dan kekakuan *bending* spesifik. Adapun rumus yang adalah sebagai berikut :

A. Menghitung Tegangan *Bending*

$$\sigma = \frac{3.P.L}{2.b.h^2}$$

B. Menghitung Regangan *Bending*

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot D \cdot d}{L^2}$$

Keterangan :

σ = Tegangan *Bending* (N/mm²)

ε = Regangan Maksimum (N/mm²)

P = Beban yang diberikan (N)

L = Jarak antara titik tumpuan (mm)

B = Lebar spesimen (mm)

H = Tebal spesimen (mm)

D = Defleksi Maksimum (mm)

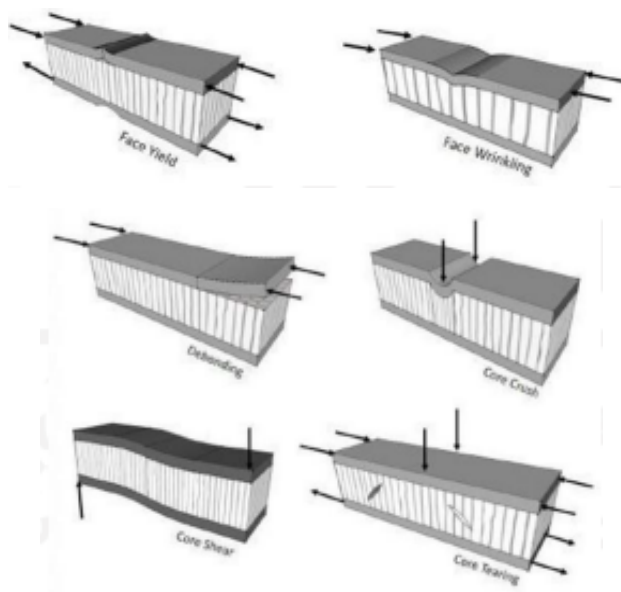
d = Tebal Spesimen (mm)

2.2.9 Modus Kegagalan Komposit *Sandwich*

Beberapa kegagalan yang dapat terjadi pada komposit *sandwich* yaitu:

Pada kegagalan skin komposit *sandwich* yang pertama yaitu *face yield* kegagalan ini terjadi ketika tegangan normal melebihi tegangan luluh material *skin*. Jika material *skin* atas memiliki sifat getas, maka kegagalan *face yield* kemungkinan besar terjadi pada *skin* bagian atas dikarenakan lebih kritis terhadap tegangan tekan. Kemudian kegagalan *face wrinkling* yaitu fenomena *buckling* yang terjadi pada *skin* atas akibat tegangan tekan dan kurangnya *support* dari *core* karena dimensi struktur *core* yang terlalu besar.

Pada kegagalan *core* terdapat empat jenis kegagalan, dimana pada kegagalan *debonding* kegagalan yang terjadi adalah lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen. Kegagalan *core shear* adalah bentuk kegagalan yang terjadi pada spesimen apabila berubah bentuk akibat pembebanan yang diberikan. Sedangkan untuk kegagalan *core tearing*, jenis kegagalan yang terjadi adalah pecahnya atau terlepasnya bagian *core* spesimen akibat gaya gesek pada bagian tengah spesimen. Terakhir adalah *core crush*, yakni kegagalan yang terjadi karena terdapat perubahan bentuk pada bagian tengah spesimen (Petras, 1998).



Gambar 2- 9 Modus Kegagalan Komposit *Sandwich*

2.2.10 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk mengamati permukaan objek solid secara langsung. SEM memiliki perbesaran 10 – 3.000.000 kali, kedalaman ruang 4 – 0.4 mm dan resolusi sebesar 1 – 10 nm. Kombinasi dari perbesaran yang tinggi, kedalaman ruang yang besar, resolusi yang baik, kemampuan untuk mengetahui komposisi dan informasi kristalografi membuat SEM banyak digunakan untuk keperluan penelitian dan industri. SEM memfokuskan sinar elektron (*electron beam*) di permukaan objek dan mengambil gambarnya dengan mendeteksi elektron yang muncul dari permukaan objek (Prasetyo, 2011).

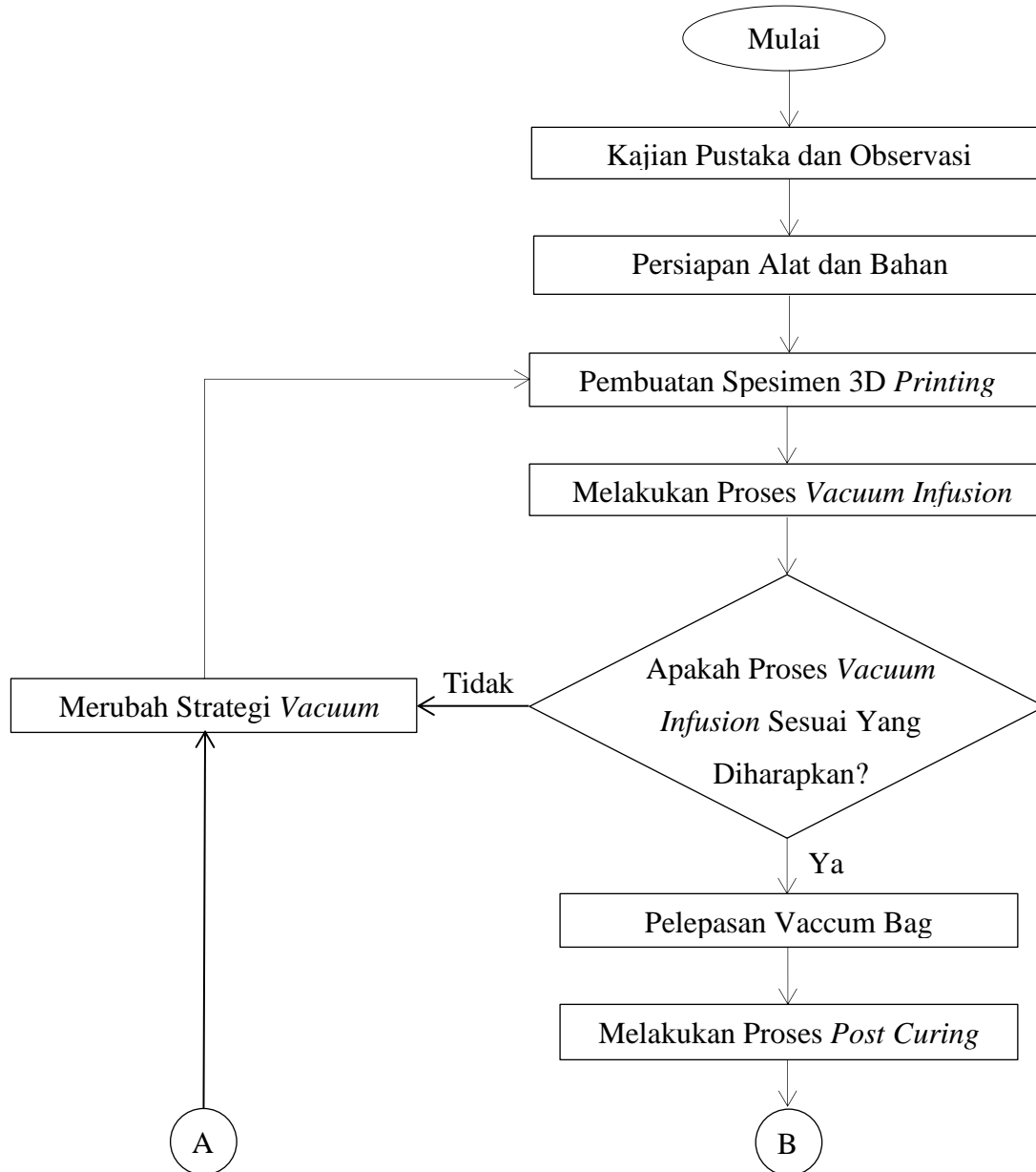


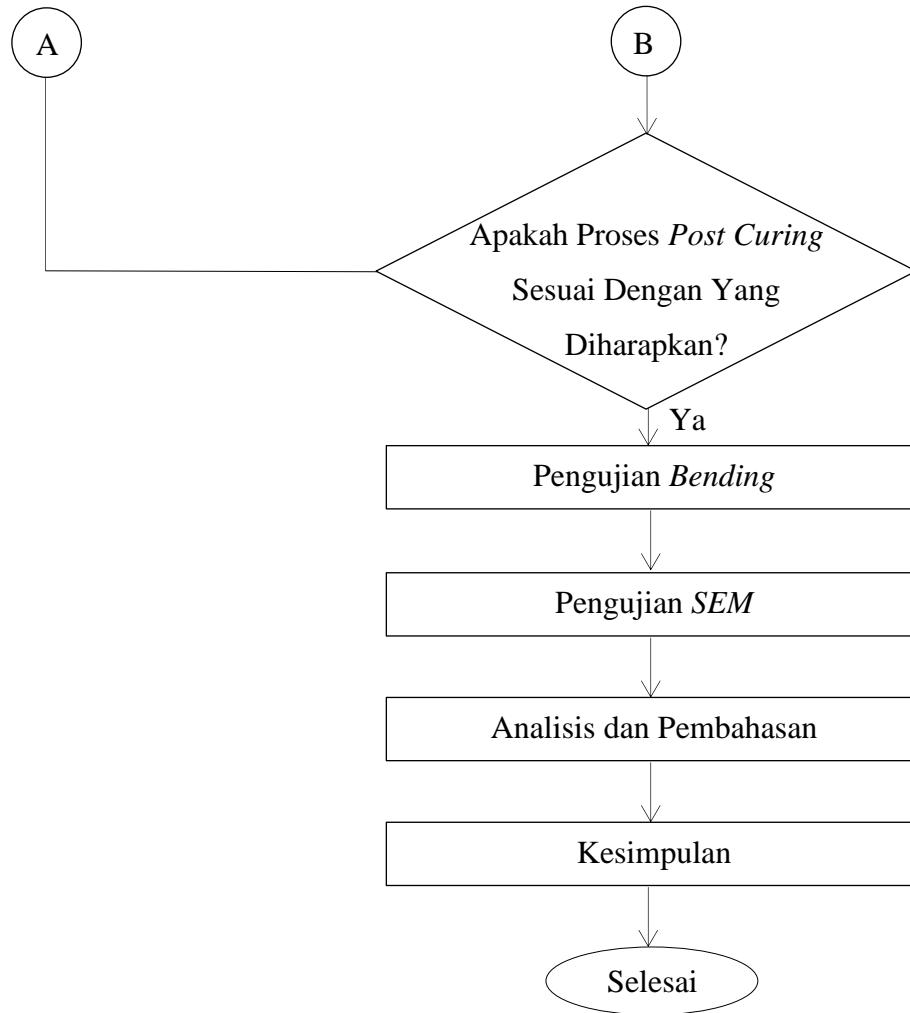
Gambar 2- 10 Mesin *Scanning Electron Microscope* (SEM)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian





Gambar 3- 1 Diagram Alur Penelitian

3.2 Desain Eksperimen

Tabel 3-1 menunjukkan parameter tetap dan variasi pada spesimen *post curing*

Tabel 3- 1 Parameter Tetap dan Variasi Spesimen

No	Parameter Tetap			Parameter Variasi
	Rasio Resin dan Hardener	Perekat	Tekanan Vacuum	Suhu <i>Post Curing</i>
1.	100 : 30	3M Spray	-1atm /-14psi	27°C (Suhu Ruang)
2.	100 : 30	3M Spray	-1atm /-14psi	60°C
3.	100 : 30	3M Spray	-1atm /-14psi	70°C
4.	100 : 30	3M Spray	-1atm /-14psi	80°C




Tabel 3-2 menunjukkan parameter tetap dalam pembuatan spesimen 3D *printing* FDM menggunakan bahan PLA+.





Tabel 3- 2 Parameter Tetap 3D *Printing*

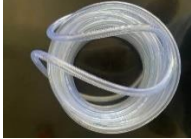



Kode	<i>Infill</i> (%)	<i>Layer Thickness</i> (mm)	Suhu <i>Bed</i> (°C)	Suhu <i>Nozzle</i> (°C)	<i>Speed</i> (%)
PLA	20	0,2	50	220	100

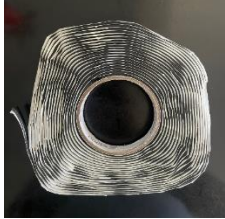


3.3 Alat dan Bahan

Tabel 3- 3 Alat dan Bahan

No	Alat dan Bahan	Gambar	Fungsi
1.	<i>Vacuum Pump</i>		Berfungsi sebagai penghisap udara pada saat proses <i>vacuum infusion</i>
2.	Tabung Reservoir		Berfungsi untuk menampung sisa resin
3.	Timbangan		Berfungsi untuk menakar campuran epoksi dan hardener. Dan juga diperlukan

			untuk menimbang berat spesimen.
4.	Katup Bensin		Berfungsi sebagai pembuka dan penutup untuk saluran udara dari cetakan.
5.	<i>Vacuum Bag</i>		Berfungsi sebagai tempat diletakkannya spesimen komposit yang akan dilakukan proses <i>vacuum infusion</i> .
6.	<i>Infusion Mesh</i>		Berfungsi sebagai media penyebaran campuran epoksi dan hardener agar dapat berjalan dengan lancar.
7.	<i>Peel Ply</i>		Berfungsi sebagai pembatas antara <i>Infusion Mesh</i> dengan serat karbon agar pada saat pelepasan spesimen dapat dilepas lebih mudah.

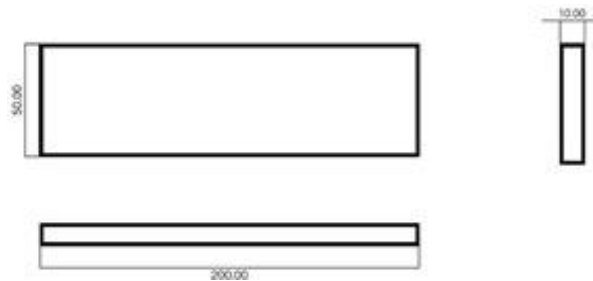
9.	Selang		<p>Berfungsi untuk mengalirkan resin dari wadah kedalam <i>plastic vacuum</i> dan saluran pada <i>vacuum pump</i> ke <i>reservoir trap</i>. Selang yang digunakan berdiameter 10mm dan 8mm.</p>
10.	Spiral		<p>Berfungsi untuk mengalirkan resin ke semua bagian dalam cetakan dan menyalurkan aliran tekanan dari <i>vacuum pump</i>.</p>
11.	Resin <i>Epoxy</i>		<p>Berfungsi sebagai perekat antara <i>core 3D printing</i> dan serat karbon.</p>
12.	<i>Hardener</i>		<p>Merupakan senyawa kimia yang dapat membantu mempercepat proses pengerasan pada epoksi.</p>

13.	<i>Sealant Tape</i>		<p>Berfungsi untuk merekatkan plastik <i>vacuum</i> di setiap sisi agar tidak terjadi kebocoran yang dapat menyebabkan udara dari luar masuk kedalam plastik <i>vacuum</i>.</p>
14.	<i>Lem 3M Adhesive</i>		<p>Berfungsi sebagai perekat antara <i>core 3D Printing</i> dan serat karbon sebelum dilakukan <i>vacuum infusion</i> agar serat karbon lebih menempel pada <i>core</i>.</p>
15.	Filamen PLA+		<p>Berfungsi sebagai bahan untuk pembuatan <i>core</i> komposit <i>sandwich</i> pada 3D <i>Printing</i>.</p>

16.	Serat Karbon		Pada penelitian ini menggunakan serat karbon kevlar <i>fiber fabric</i> 3k 2x2 200gsm <i>plain & twill</i> .
-----	--------------	--	--

3.4 Dimensi Spesimen Pengujian Bending

Spesimen komposit *sandwich* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan standar ASTM C393, dengan *infill* 20%, dan *fill pattern gyroid*. Desain spesimen yang akan dibuat pada penelitian ini, dengan panjang 200mm, lebar 50mm, dan tebal 10mm.



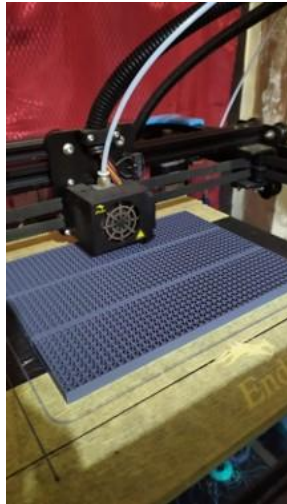
Gambar 3- 2 Dimensi Spesimen Pengujian *Bending*

3.5 Pembuatan *Core* dengan Mesin 3D *Printing*

Pada gambar ini menunjukkan proses pembuatan *core* yang bentuknya sesuai dengan standar uji ASTM C393 dengan menggunakan mesin 3D *printing*.

Tabel 3- 4 Parameter Tetap Pembuatan *Core*

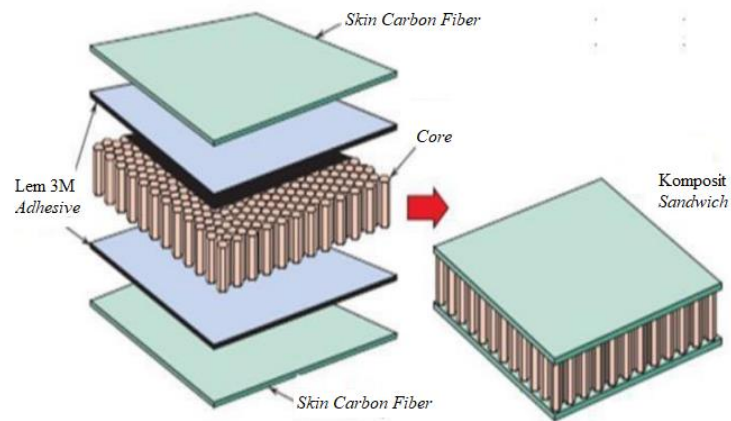
Parameter	Nilai
<i>Infill Density</i>	20%
<i>Infill Pattern</i>	<i>Gyroid</i>
<i>Layer Thickness</i>	0,2 mm
<i>Bed Temperature</i>	55 °C
<i>Suhu Nozzle</i>	220 °C
<i>Printing Speed</i>	50 mm/s



Gambar 3- 3 Pembuatan *Core* dengan Mesin 3D *Printing*

3.6 Susunan Komposit *Sandwich*

Gambar di bawah menunjukkan susunan lapisan komposit *sandwich* dengan ketebalan *core* 5mm dan 10mm dimana lapisan serat karbon sebanyak 1 lapis dan selanjutnya akan dilakukan proses *vacuum infusion*.



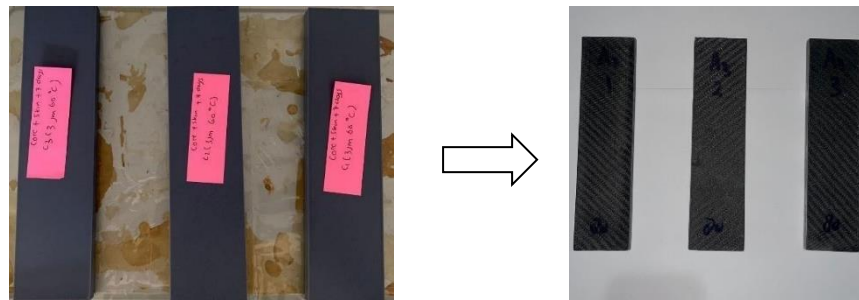
Gambar 3- 4 Susunan Komposit *Sandwich*

3.7 Proses Komposit *Sandwich*

Berikut proses pembuatan komposit *sandwich* :

1. Pelapisan Lem 3M *Adhesive*

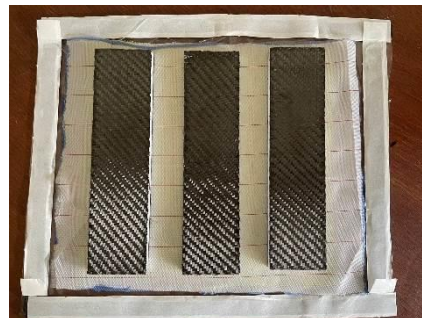
Proses ini dilakukan sebelum memasukkan semua bahan kedalam vacuum bag yang berfungsi untuk *core* dengan serat karbon menempel lebih kuat. Pada proses ini spesimen di beri Lem 3M, kemudian serat karbon yang sudah dipotong sesuai ukuran di tempel pada bagian atas dan bawah spesimen.



Gambar 3- 5 Pelapisan Lem 3M *Adhesive*

2. Menyusun serat karbon, *infusion mesh*, *sealant tape*, dan *peel ply*

Pada gambar dibawah menunjukkan susunan komposit *sandwich* dengan menggunakan satu lapisan serat karbon di bagian atas dan bawah.



Gambar 3- 6 Proses Komposit *Sandwich*

3. Pemasangan Selang Spiral

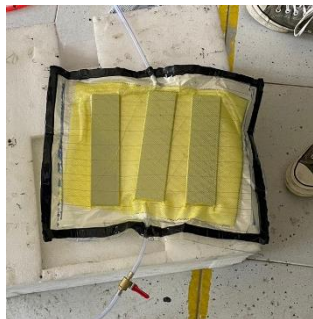
Pemasangan selang spiral berbentuk huruf U berfungsi untuk pada saat proses pemvakuman resin dapat menyebar ke semua media yang akan dilapisi dengan komposit *sandwich*.



Gambar 3- 7 Pemasangan Selang Spiral

4. Menyusun bahan kedalaman plastik *vacuum*

Pada proses ini Menyusun seluruh bahan yang digunakan untuk proses pemvakuman ke dalam *plastic vacuum* sesuai dengan urutan pada gambar dan untuk mengecek adanya kebocoran atau tidak di dalam vacuum bag.



Gambar 3- 8 Penyusunan Bahan ke *Vacuum*

5. Proses pencampuran Epoksi dan *Hardener*

Pada gambar bawah menunjukkan proses pencampuran epoksi dengan *hardener* dengan perbandingan 3:1.

Tabel 3- 5 Perbandingan Epoksi dan *Hardener*

Perbandingan	
Epoksi	100gr
<i>Hardener</i>	30gr



Gambar 3- 9 Proses Pencampuran Epoksi dan *Hardener*

6. Proses *Vacuum Infusion*

Pada gambar dapat dilihat bahwa proses *vacuum infusion* menggunakan satu *inlet* dan satu *outlet*.



Gambar 3- 10 Proses *Vacuum Infusion*

3.8 Proses *Post Curing* Spesimen

Pada proses ini spesimen yang telah melewati proses *Vacuum Infusion* diberi perlakuan *post curing* pada *microwave*.

Tabel 3- 6 Suhu dan Waktu *Post Curing*

Suhu	Waktu
27°C	10 menit
60°C	10 menit
70°C	10 menit
80°C	10 menit



Gambar 3- 11 Proses *post Curing* Spesimen

3.9 Proses Pengujian *Bending*

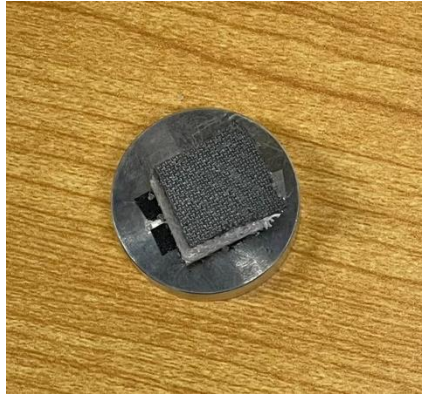
Pengujian yang dilakukan adalah pengujian *bending*, yang berfungsi untuk mencari nilai kekakuan dari spesimen. Pengujian *bending* ini mengacu pada standar pengujian *bending* ASTM C393.



Gambar 3- 12 Proses Pengujian *Bending*

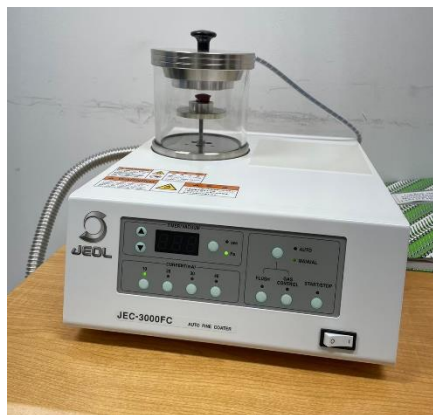
3.10 Proses *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengetahui struktur mikro atau morfologi sebuah bahan hingga skala mikro atau nano. SEM juga digunakan untuk mengukur komposisi permukaan suatu bahan. Bahan yang dapat dianalisa menggunakan SEM dapat berupa bahan yang bersifat konduktif dan non-konduktif, seperti serbuk atau serat.



Gambar 3- 13 Sampel Spesimen

Pada gambar 3-13 dapat dilihat bentuk spesimen yang dipotong untuk sampel pada SEM. Spesimen dipotong berbentuk kotak dengan ukuran 15 x 10mm



Gambar 3- 14 Coating Mesin

Kemudian sampel *dicoating* dengan serbuk platina selama satu menit menggunakan alat pada gambar 3-14 dan dilanjutkan melihat permukaan sampel menggunakan alat SEM dapat dilihat pada gambar 3-15.



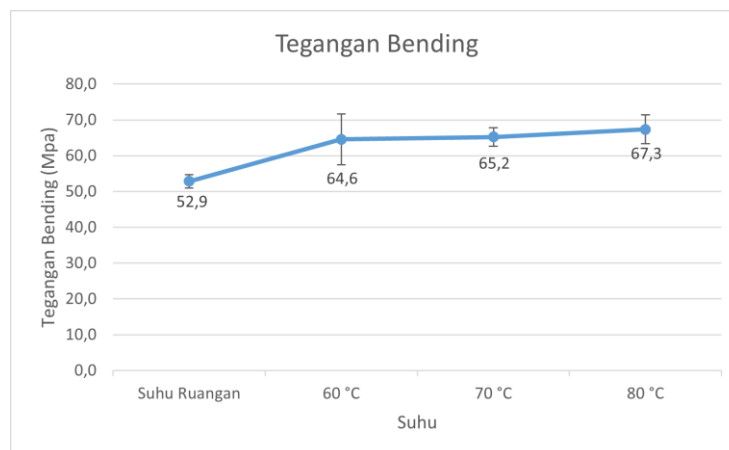
Gambar 3- 15 *Scanning Electron Microscope* (SEM)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Pengaruh Variasi Suhu Terhadap Tegangan Bending, Kegagalan Spesimen, dan Morfologi (Hasil Uji SEM)

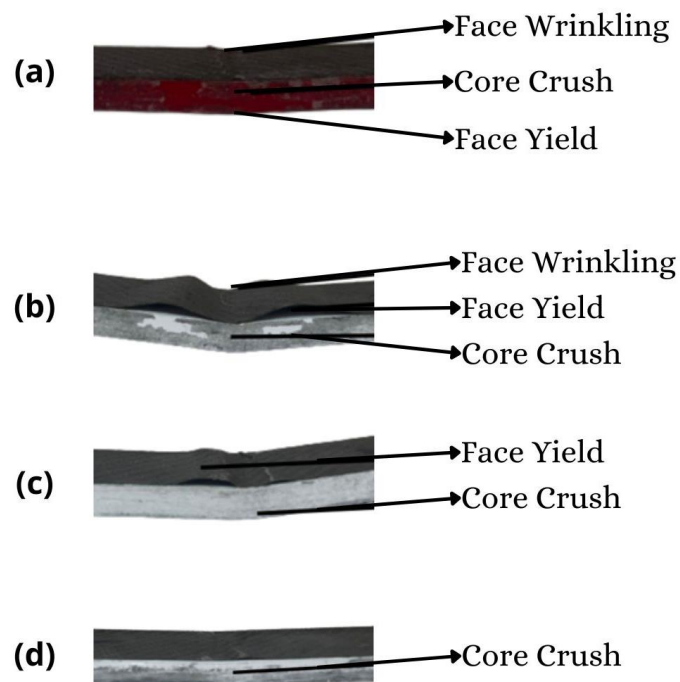
Pada gambar 4-1 dapat dilihat bahwa variasi suhu *post curing* dapat meningkatkan tegangan *bending*, semakin tinggi suhu *post curing* maka semakin tinggi nilai tegangan *bending* yang dihasilkan. Dapat dilihat bahwa nilai tegangan rata-rata pada spesimen suhu ruang hanya sebesar 52,9 Mpa, sedangkan pada suhu 60°C meningkat sebesar 11,7 Mpa menjadi 64,6 Mpa. Kemudian, nilai tegangan *bending* meningkat kembali pada suhu 70°C sebesar 0,6 Mpa menjadi 65,2 Mpa, dan terus meningkat sebesar 2,1 Mpa pada suhu 80°C dengan nilai tegangan paling tinggi yakni sebesar 67,3 Mpa. Oleh karena itu, peningkatan nilai tegangan *bending* dari suhu ruang ke suhu 80°C sebesar 14,4 Mpa atau sekitar 27% membuktikan bahwa variasi suhu *post curing* yang semakin tinggi akan meningkatkan nilai tegangan *bending*nya karena material menjadi lebih padat dan mengalami peningkatan kekuatan, kekakuan, dan kekerasan, serta menciptakan ikatan *cross-linking* yang lebih baik dibandingkan suhu yang lebih rendah.



Gambar 4- 1 Grafik Pengaruh Suhu Terhadap Tegangan *Bending*

Selanjutnya, pada gambar 4-2 yang menunjukkan berbagai kegagalan pada spesimen uji akibat perbedaan suhu *post curing* yang dilakukan *face yield*, *face*

wrinkling, dan *core crush*. *Face yield* adalah kegagalan yang terjadi ketika tegangan normal melebihi tegangan luluh material *skin*. Jika material *skin* atas memiliki sifat getas, maka kegagalan *face yield* kemungkinan besar terjadi pada *skin* bagian atas dikarenakan lebih kritis terhadap tegangan tekan. Kegagalan *face wrinkling* adalah terjadinya fenomena *buckling* yang terjadi pada *skin* atas akibat tegangan tekan dan kurangnya *support* dari *core* karena dimensi struktur *core* yang terlalu besar, dan kegagalan *core crush* yakni kegagalan yang terjadi karena terdapat perubahan bentuk pada bagian tengah spesimen (Petras, 1998).

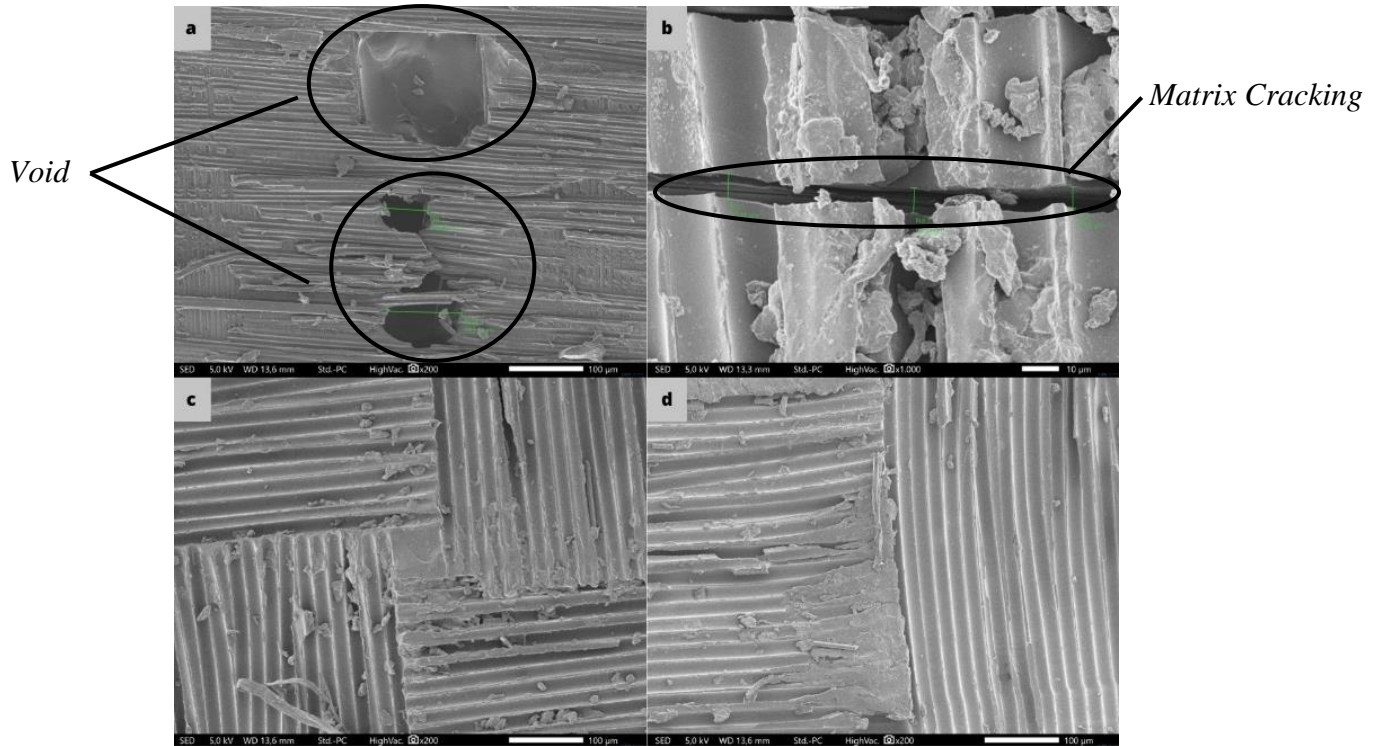


Gambar 4- 2 Analisa Kegagalan Spesimen dengan Variasi Suhu *Post-Curing* pada (a) Suhu Ruang, (b) 60°C, (c) 70°C, dan (d) 80°C

Pada gambar 4-2 kita dapat dilihat bahwa terjadi beberapa kegagalan pada spesimen setelah dilakukan pengujian *bending* dengan metode *three point bending*. Pada gambar 4-2(a) dan 4-2(b) mengalami kegagalan tipe *face wrinkling* yang mengikuti lekukan dari penekan. *Core crush* terjadi karena lemahnya *skin* dan kurangnya *support* dari *core* ketika spesimen menerima gaya aksial pada pengujian *bending*, sedangkan kegagalan *face yield* terjadi pada *skin* komposit *sandwich* bagian atas dikarenakan pada bagian tersebut lebih kritis menerima tegangan tekan

yang menyebabkan penurunan kekuatan *bending* pada spesimen. Pada gambar 4-2(c) masih terlihat bahwa terjadi kegagalan tipe *core crush* dan *face yield*, akan tetapi tidak terdapat kegagalan tipe *face wrinkling* karena *cross-linking* mulai terjadi meskipun belum maksimal, sehingga masih terjadi dua tipe kegagalan pada spesimen. Oleh karena itu, spesimen dengan kegagalan terkecil terdapat pada gambar 4-2(d) dengan suhu *post curing* tertinggi yakni 80 °C yang tidak mengalami kegagalan *face yield* dan *face wrinkling*, meskipun masih terdapat kegagalan tipe *core crush*. Kedua tipe kegagalan tersebut tidak terlihat pada spesimen dengan suhu 80°C karena *cross-linking* yang terjadi pada suhu lebih tinggi menciptakan ikatan yang lebih kuat dan maksimal, sehingga mempengaruhi kekuatan *bending* spesimen.

Lebih lanjut, setelah proses analisis nilai tegangan *bending* dan kegagalan spesimen dapat dilihat secara lebih jelas melalui hasil uji SEM. *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk mengamati permukaan objek solid secara langsung. Berbagai keunggulan SEM digunakan untuk keperluan penelitian dan industri. SEM memfokuskan sinar elektron (*electron beam*) di permukaan objek dan mengambil gambarnya dengan mendeteksi elektron yang muncul dari permukaan objek (Prasetyo, 2011), sehingga penggunaan SEM membantu menganalisa spesimen komposit yang di uji pada penelitian ini.



Gambar 4- 3 Analisa Hasil Uji SEM (a) Suhu Ruang dengan Perbesaran 200x, (b) Suhu Ruang dengan Perbesaran 1000x, (c) Suhu 80°C dengan Perbesaran 200x, dan (d) Suhu 80°C dengan Perbesaran 200x

Berdasarkan pengamatan hasil foto SEM terdapat komposit yang mengalami retak *core*, penyebab jenis kegagalan yaitu adanya *void* (gelembung udara), dimana *void* akan mempengaruhi terhadap nilai kekuatan *bending* yang menurun karena terjadi pemusatan tegangan pada bagian *void*. *Debonding* dan *void* disebabkan karena proses pengadukan matrik yang kurang sempurna, *void* tersebut terperangkap dalam ikatan matrik *skin* dan matrik *core*. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4-3(a) dengan *core* suhu ruang terdapat beberapa *void* dengan satu *void* yang besar. Sedangkan pada gambar 4-3(c) *core* suhu 80°C tidak ditemukannya *void*. Semakin banyak *void* dalam spesimen maka akan menurunkan kekuatan *bending* dari spesimen. Hal itu dapat dilihat pada data uji *bending* dengan nilai kekuatan *bending* suhu ruang lebih rendah dari suhu 80°C karena terdapat *void* yang lebih banyak.

Pada gambar hasil uji SEM dapat dilihat bahwa pada temperatur suhu ruang terdapat lebih banyak *void* apabila dibandingkan dengan temperatur *post curing* suhu 80°C. Adanya *void* sangat mempengaruhi kekuatan *bending*, karena *void*

dapat mengakibatkan beberapa macam tipe kegagalan pada komposit. Telah dilakukan penelitian yang menyatakan bahwa sifat mekanik seperti kekuatan tekan akan turun sejalan dengan bertambahnya kandungan *void*. Dari perbandingan di atas jelas bahwa komposit dengan temperatur *post curing* pada suhu 80°C akan mempunyai nilai *bending* lebih tinggi apabila dibandingkan dengan komposit yang dilakukan perlakuan pada temperatur suhu ruang.

Kemudian, *Matrix cracking* adalah penyebab lain dari berkurangnya nilai *bending*. *Matrix cracking* muncul karena matriks tidak kuat menerima beban uji *bending* yang berlebih. Temperatur suhu ruang paling banyak ditemukan *matrix cracking*. Kegagalan *matrix cracking* bisa diamati dengan alat uji SEM seperti pada gambar 4-3(b) yang dapat dilihat bahwa terdapat pusat retakan. Semakin banyak *matrix cracking* dalam spesimen akan menurunkan kekuatan *bending* dari spesimen. Hal itu dapat dilihat pada data uji *bending* dengan nilai kekuatan *bending* suhu ruang lebih rendah dari suhu 80°C karena terdapat *void* yang lebih banyak. Oleh karena itu, komposit dengan temperatur *post curing* suhu 80°C memiliki kekuatan *bending* yang lebih tinggi daripada komposit dengan temperatur suhu ruang karena tidak mengalami *void* dan *matrix cracking*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Nilai tegangan *bending* tertinggi diperoleh pada spesimen dengan suhu *post curing* 80°C yakni sebesar 67.3 MPa, sedangkan paling rendah pada spesimen dengan suhu ruang (SR) yaitu 52.9 MPa.
2. Berdasarkan pengamatan setelah melakukan uji *bending*, terdapat kegagalan *face yield* dan *face wrinkling* pada spesimen. Dimana kegagalan tersebut terjadi akibat pada bagian *skin* lebih banyak menerima tegangan tekan yang mengakibatkan penurunan kekuatan *bending*. Akan tetapi sudah mulai tidak terlihat jelas dua kegagalan tersebut pada spesimen dengan suhu *post curing* 80°C, dikarenakan *cross-link* yang terjadi pada suhu yang lebih tinggi dapat menghasilkan ikatan yang lebih kuat dan maksimal, sehingga dapat mempengaruhi nilai kekuatan *bending* spesimen.
3. Hasil pengamatan foto SEM juga menunjukkan pada spesimen suhu ruang terdapat banyak *void* sehingga dapat mengurangi nilai kekuatan pada spesimen. Sedangkan pada suhu 80°C sudah tidak terdapat lagi *void*. Selain *void*, *matrix cracking* juga menjadi salah satu penyebab dari menurunnya nilai kekuatan pada spesimen. Dapat kita simpulkan bahwa suhu *post curing* dapat menyebabkan terjadinya *cross-link* dan dapat mengurangi adanya *void*, sehingga semakin tinggi suhu *post curing* maka semakin tinggi pula nilai tegangan *bending*-nya.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

1. Perlu dilakukan penelitian selanjutnya dengan suhu 90°C, dikarenakan masih terdapat kemungkinan kenaikan nilai tegangan *bending* pada suhu 80°C.
2. Perlu dilihat menggunakan SEM pada bagian *core* yang tidak dilapisi dengan karbon agar dapat melihat struktur *core* setelah di *post curing*.
3. Penggunaan Lem 3M Spray *adhesive* karena pada saat *post curing* lem tidak akan menguap yang dapat merusak skin.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriansyah. (2021). “Analisis uji bending komposit sandwich yang digabungkan 3D printing.
- Alhazmi. (2020). Influence of Infill density and Orientation on the Mechanical Response of PLA+ Specimens Produced using FDM 3D Printing.
- Boissonneault, T. (8 April, 2022). *Understanding the Gyroid Infill in 3D Printing*. Retrieved 26 Agustus, 2023, from WEVOLVER: <https://www.wevolver.com/article/understanding-the-gyroid-infill-in-3d-printing>
- Farikhin, F. (2016). *Analisa Scanning Electron Microscope Komposit Polyester dengan Filler Karbon Aktif dan Karbon Non Aktif*. Solo: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Hartono. (2016). Analisa Teknis Komposit Sandwich Berpenguat Daun Nanas dengan Core Serbuk Gergaji Kayu Sengon Laut Ditinjau dari Kekuatan Tekuk dan Impak,”. 265-273.
- Hartono. (2016). Analisa Teknis Komposit Sandwich Berpenguat Daun Nanas dengan Core Serbuk Gergaji Kayu Sengon Laut Ditinjau dari Kekuatan Tekuk dan Impak,”.
- Kollmann, F. F., Kuenzi, e. W., & Stamm, A. J. (1975). *Principles of Wood Science and Technology: Sandwich Composites*. Berlin: Springer.
- Muhyi, A., Ferdiyanto, R., Rajagukguk, K., Sipahutar, W. S., & Arif, M. F. (2023). Analisis Sifat Mekanik dari Struktur Seluler yang Difabrikasi dengan Printer 3D. *Journal of Science and Applicative Technology, Vol. 7, No. 1*, 1-5.
- Petras, A. (1998). Design of Sandwich Structures. *Cambridge University Engineering Department*, 1-114.
- Rahmani, J. P. (18 November, 2022). *STUDI PENGARUH JENIS PEREKAT DAN VARIASI SUHU CURING TERHADAP KEKUATAN BENDING KOMPOSIT SANDWICH MENGGUNAKAN CORE 3D PRINTING*. Retrieved 2023 Agustus, 25, from dspace.uii:

<https://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/41698/17525069.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Suryono, A. F., Faizal, A., & Hestiawan, H. (2020). PENGARUH POST CURING TREATMENT DAN PERENDAMAN AIR LAUT PADA KOMPOSIT HYBRID KEVLAR/KARBON. *Rekayasa Mekanik, Vol.4, No.1*, 13-17.
- Utomo, W. B., & Drastiawati, N. S. (2021). Pengaruh Variasi Jenis Core, Temperatur Curing dan Post-Curing terhadap Karakteristik Bending Komposit Sandwich Serat Karbon dengan Metode Vacuum Infusion. *Jurnal Teknik Mesin UNESA, Vol. 9, No. 2*, 45-54.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering, Vol. 110*, 442-458.
- Widiyono. (2021). Komposit Carbon Fiber Sandwich Sebagai Bahan Alternatif Pengganti Alumunium Alloy 6063 Pada Knuckle Plate Mobil Nogogeni 5 Evo. *Jurnal Nasional Aplikasi Mekatronika, Otomasi dan Robot Industri (AMORI)*.
- Widiyono. (2021). Komposit Carbon Fiber Sandwich Sebagai Bahan Alternatif Pengganti Alumunium Alloy 6063 Pada Knuckle Plate Mobil Nogogeni 5 Evo. *Jurnal Nasional Aplikasi Mekatronika, Otomasi dan Robot Industri*.
- Wijayanto, S. E., Handoko, R., Noel, J. C., Anggawirawan, T. W., & Suteja, T. J. (2022). Identifikasi Jenis Infill Pattern pada Proses 3D Printing yang Menghasilkan Hasil Cetak dengan Kekuatan Tekan dan Panjang Filamen yang Optimal. *Rekayasa Mesin*, 531-539.
- Zweben, C. (2015). *Composite Materials*. Pennsylvania: Zweben Consulting.

LAMPIRAN 1



LABORATORIUM BAHAN TEKNIK DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN BENDING

No.	Variasi INFIL	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Pmax (KN)	Defleksi (mm)	Tegangan Bending (MPa)
1	A0_1	10.32	49.90	1.06	9.65	50.86
2	A0_2	10.52	49.90	1.18	5.05	54.49
3	A0_3	10.50	50.38	1.16	6.70	53.26
4	A1_1	10.62	50.94	1.27	7.64	56.37
5	A1_2	10.62	50.60	1.54	13.56	68.81
6	A1_3	10.78	51.26	1.60	5.56	68.49
7	A2_1	10.66	50.38	1.48	12.99	65.92
8	A2_2	10.70	50.68	1.42	9.37	62.41
9	A2_3	10.70	50.58	1.53	5.70	67.37
10	A3_1	10.38	50.98	1.55	6.18	71.96
11	A3_2	10.84	51.02	1.54	6.02	65.50
12	A3_3	10.58	50.80	1.44	12.57	64.58

Keterangan:

1. Pengujian dilakukan tanggal 28 Maret 2023
2. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine
3. Standar spesimen menggunakan ASTM C393

Yogyakarta, 28 Maret 2023
Staf Laboratorium Bahan Teknik



Dr. Lilik Dwi Selyane, S.T., M.T
NIP. 197703312002121002

Lembar asli, tidak untuk digandakan

