

**PENGARUH VARIASI STRUKTUR PADA CORE SPESIMEN
KOMPOSIT POLYLACTIC ACID (PLA) – CARBON FIBER
TERHADAP NILAI KEKAKUAN BENDING**

TUGAS AKHIR

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



Disusun Oleh :

Nama : Zhein Zaky Zakir Misbahul

No. Mahasiswa : 18525128

NIRM : 1807120181

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

2025

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya bertanda tangan dibawah ini, Zhein Zaky Zakir Misbahul selaku penulis Tugas Akhir yang berjudul “PENGARUH VARIASI STRUKTUR PADA CORE SPESIMEN KOMPOSIT *POLYLACTIC ACID* (PLA) – *CARBON FIBER* TERHADAP NILAI KEKAKUAN BENDING” menyatakan bahwa karya tulis ilmiah yang saya buat merupakan karya sendiri dan bukan dari plagiasi karya tulis orang lain. Seluruh kutipan atau gambar yang ada pada karya tulis ini telah saya sertakan sitasi dan sumber pustakanya. Apabila dikemudian hari saya dianggap melakukan pelanggaran hak cipta atau yang saya tulis pada karya ilmiah ini tidak benar, maka saya siap menerima sanksi dan hukum dengan ketentuan yang berlaku.

Yogyakarta, 1 Juni 2025



Zhein Zaky Zakir Misbahul
(18525128)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

PENGARUH VARIASI STRUKTUR PADA CORE SPESIMEN KOMPOSIT POLYLACTIC ACID (PLA) – CARBON FIBER TERHADAP NILAI KEKAKUAN BENDING

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Zhein Zaky Zakir Misbahul

No. Mahasiswa : 18525128

NIRM : 1807120181

Yogyakarta, 1 Juni 2025

Pembimbing I

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ridlwan', with a stylized flourish extending to the right.

Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

PENGARUH VARIASI STRUKTUR PADA *CORE* SPESIMEN KOMPOSIT *POLYLACTIC ACID (PLA)* – *CARBON FIBER* TERHADAP NILAI KEKAKUAN BENDING

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

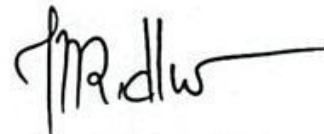
Nama : Zhein Zaky Zakir Misbahul
No. Mahasiswa : 18525128
NIRM : 1807120181

Tim Penguji

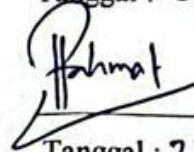
Ir. M. Ridwan, ST. MT. IPP
Ketua

Rahmat Riza, ST., M.Sc ME
Anggota I

FAHAL ARIF NURGESANG, ST MSC.
Anggota II



Tanggal : 30/08/2025



Tanggal : 28/08/2025



Tanggal : 29/08/2025 .

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Ir. Muhammad Khafid, S.T., M.T., IPP

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji syukur penulis hajatkan kepada Allah SWT yang telah melimpah kan rahmat dan hidayah serta panjatan dukungan dan doa yang tak terhingga diberikan oleh orang disekitar penulis, hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu penulis ingin mengucapkan rasa terimakasih yang sebesasr-besarnya kepada :

1. Orang tua saya bapak Misbahul Umam dan ibu Surtina yang selalu berperan besar dalam setiap langkah dikehidupan saya dalam bentuk dukungan, arahan, serta do'a yang senantiasa mereka panjatkan tanpa henti agar pelaksanaan tugas akhir ini terlaksana sesuai kehendak Allah Swt.
2. Seluruh keluarga besar saya yang selalu memberikan dukungan moral baik secara langsung dan doa yang selalu dipanjatkan kepada penulis.
3. Bapak Dosen Pembimbing Ir. Muhammad Ridlwan S.T., M.T., IPP yang selalu memberikan arahan dan saran dalam mengerjakan Penelitian Tugas Akhir ini hingga dapat berjalan dengan lancar. Serta seluruh dosen Teknik Mesin UII yang memberikan dukungan, membantu, dan memberikan ilmunya selama penulis berproses dibangku kuliah Teknik mesin FTI UII.

HALAMAN MOTTO

“Tugas kita tidak untuk berhasil, tugas kita adalah terus mencoba”

(Franz Kafka)

“Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan, Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan”

(Q.S Al Insyirah: 5-6)

“keberanian bukan berarti tanpa rasa takut, tapi kemampuan untuk menghadapi rasa takut dan melangkah maju meski tidak yakin dengan hasilnya”

(Steve Jobs)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH



Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirabbil'alamin puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah Swt Yang Maha pengasih lagi Maha penyayang, yang telah memberikan rahmat serta hidayahnya sehingga penelitian Tugas Akhir yang berjudul “PENGARUH VARIASI STRUKTUR PADA *CORE* SPESIMEN KOMPOSIT *POLYLACTIC ACID (PLA)* – *CARBON FIBER* TERHADAP NILAI KEKAKUAN BENDING” dapat terselesaikan. Sholawat serta salam kita panjatkan kepada Nabiullah Muhammad SAW sebagai suri tauladan dan membawa kita ke kehidupan yang lebih baik. penyusunan laporan Tugas Akhir ini dilakukan sebagai syarat kelulusan di program studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesi.

Tentu saja dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari kritik, saran bimbingan, dukungan serta do'a dari berbagai pihak hingga penulisan dapat diselesaikan. Oleh sebab itu, dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ungkapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah Swt, tuhan yang Maha pengasih lagi Maha Penyayang. Atas rahmat dan hidayahNya penulis diberikan kesehatan dan kelancaran rezeki hingga dapat menyelesaikan proses penelitian ini.
2. Bapak Hari Purnomo, Prof., Dr., Ir., M.T., IPU, ASEAN.Eng selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Dr.Ir. Muhammad Khafid, S.T., M.T., IPP selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesi.
4. Bapak Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa memberikan dukungan serta masukan saran agar penulis dapat menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir dengan baik.

5. Dosen-dosen Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang selalu berbagi ilmu baik dalam bidang akademik maupun non akademik.
6. Bapak Agung selaku Sekertaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan arahan selama proses perkuliahan.
7. Dewan Penguji yang memberikan saran dalam penulisan TA ini.
8. Bapak Misbahul Umam dan Ibu Surtina selaku orang tua yang selalu memberikan doa, semangat, motivasi yang tak pernah berhenti.
9. Sahabat-sahabat seperjuangan Teknik Mesin, Ghufro Rahardi S.T (gugun), Arif Rahman Hakim S.T, Aldo Susanto S.T , Reezcky Noer Alamsyah S.T (toise) , David Yade S.T (Mastuti), Luqman Makarim, Noval Farhan, Atta S.T, Drg. Nur Fadhillah, Neni Jia S.M, Partner TA Asriadi Anwar S.T, dan teman-teman Teknik Mesin UII 2018 serta KOJA YK. Yang selalu menjadi teman diskusi serta selalu mengingatkan untuk selalu berjalan pada tujuan utama hingga bertemu diatas puncak.
10. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah memberikan do'a dan dukungannya.

Penulis juga sepenuhnya menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang bersifat membangun akan sangat diharapkan oleh penulis. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan untuk orang yang membutuhkan. Akhir kata saya ucapkan banyak terimakasih, semoga Allah Swt selalu melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya serta memberkati seluruh perjalanan hidup kita semua. Berdo'a tidak akan pernah selesai Amin Ya Robbal a'lam.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 20 Juni 2025

Zhein Zaky Zakir Misbahul

ABSTRACT

Composite materials are formed by combining two or more constituent materials that possess different physical and/or chemical properties. Sandwich composites consist of two outer face sheets (skin panels) on the top and bottom surfaces, with a low-density core material placed in between. In this study, three variations of core structures were investigated: Specimen A, with a base layer of 2 mm and an 8 mm thick honeycomb core (2.8); Specimen B, with a staggered (zig-zag) honeycomb configuration consisting of a 2 mm base layer and alternating 4 mm honeycomb segments (2.4.4); and Specimen C, composed of a 1 mm base layer, a 4 mm honeycomb layer, a 1 mm intermediate layer, and an additional 4 mm honeycomb core (1.4.1.4). The specimens were fabricated using polylactic acid (PLA) as the matrix material, reinforced on one side with carbon fiber, employing the hand lay-up technique followed by vacuum bagging. Mechanical testing was carried out using both experimental and numerical approaches. The experimental bending test followed the ASTM C393 standard, while the numerical analysis was conducted using the finite element method (FEM). The results of the experimental bending tests indicated that Specimen C exhibited the highest average values of bending stiffness and specific bending stiffness, measured at 3,421,154 N·mm² and 55.226 N·mm²/g, respectively. These results demonstrate that the implementation of a staggered (zig-zag) core structure significantly enhances bending stiffness compared to specimens with conventional core arrangements. However, a notable discrepancy was observed between the experimental results and the finite element analysis, particularly in the average values of bending stiffness and specific bending stiffness. This difference is attributed to the variation in material properties used in the simulation software compared to those of the actual fabricated specimens.

Keywords : Composite, Finite Element, Core, Zig-zag Structure.

ABSTRAK

Komposit adalah hasil gabungan dari dua atau lebih material pembentuk yang memiliki sifat berbeda satu sama lain, baik secara kimia maupun fisik. Komposit *sandwich* tersusun dari dua panel kulit pada sisi atas dan bawah, diantara kedua panel terdapat material yang memiliki densitas kecil disebut *core*. Terdapat 3 variasi pada stuktur *core* yaitu spesimen kode A dengan susunan stuktur lantai dasar 2 mm dan 8 mm *honeycomb* (2.8), dibandingkan dengan stuktur *core* berseling (zig-zag) dengan susunan struktur lantai dasar 2 mm dan tumpukan *honeycomb* berseling (zig-zag) 4 mm (2.4.4) spesimen kode B dan spesimen kode C dengan susunan stuktur lantai dasar 1 mm dan 4 mm *honeycomb* kemudian lapisan lantai 1 mm dan *honeycomb* 4 mm. Proses pembuatan spesimen komposit material PLA dengan satu sisi bepenguat serat karbon menggunakan metode *hand lay up* dan *vacuum bagging*. Kemudian pengujian dilakukan menggunakan dua metode yaitu pengujian aktual dengan standar ASTM C393 dan analisis *finite element*. Didapatkan data dari hasil pengujian bending secara aktual bahwa rata-rata dari nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik tertinggi terdapat pada spesimen kode C yaitu sebesar 3.421.154 N.mm² dan 55.226 N.mm²/gr. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan pola berseling (zig-zag) pada stuktur *core* memberikan nilai kekakuan bending yang tinggi dibandingkan spesimen yang memiliki pola biasa. Berdasarkan perbandingan hasil pengujian bending aktual dan analisis *finite element* ditemukan bahwa terdapat selisih 15,8% yang terpaut cukup besar pada rerata nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik. Selisih nilai perbandingan antara kedua metode penelitian muncul karena adanya perbedaan sifat material di *software* dengan spesimen asli.

Kata Kunci : Komposit, *Finite Element*, *Core* , Struktur Zig-zag.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
Lembar Pernyataan Keaslian	ii
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	iii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iii
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih	vii
Abstrak	ix
Daftar Isi	xii
Daftar Tabel	xiii
Daftar Gambar	xiv
Daftar Notasi	xvi
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan	3
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
Bab 2 Tinjauan Pustaka	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Komposit	7
2.2.2 Komposit Sandwich	7
2.2.3 3D Print	9
2.2.4 Struktur <i>Honeycomb</i>	10
2.2.5 <i>Hand Lay Up</i>	10
2.2.6 <i>Vacuum Bagging</i>	11
2.2.7 ASTM C393	11
2.2.8 Pengujian Bending	12

2.2.9	Metode <i>Finite Element</i>	14
Bab 3	Metode Penelitian	15
3.1	Alur Penelitian	15
3.2	Peralatan dan Bahan	16
3.3	Perancangan.....	24
3.3.1	Susunan Lapisan Komposit	27
3.3	Proses Pengerjaan	24
3.4.1	Pembuatan Core dengan 3D <i>Printing</i>	28
3.4.2	Skema Lapisan <i>Vacuum</i>	28
3.4.3	Proses <i>Vacuum</i>	28
3.4.4	Proses Pengujian Bending	31
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	32
4.1	Hasil Perancangan	32
4.2	Hasil Pengujian.....	33
4.3	Analisis dan Perhitungan	34
4.3.1	Perhitungan.....	34
4.4	Pembahasan	34
4.4.1	Perhitungan.....	34
4.4.2	Kekakuan Bending	36
4.4.3	Kekakuan Bending Spesifik	37
4.4.4	Grafik Uji Antara Gaya Tekan vs Defleksi	38
4.5	<i>Finite Element Analysis</i>	34
4.5.1	Spesifikasi Material properti	38
4.5.2	Hasil Finite Element Analysis	40
4.5.3	Perbandingan Hasil Pengujian Bending dan <i>Finite Element</i>	43
Bab 5	Penutup.....	45
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya.....	45
Daftar Pustaka		46

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1 Parameter Proses Pembuatan Spesimen.....	28
Tabel 4-1 Hasil Pengerjaan Spesimen Uji.....	32
Tabel 4-2 Data Hasil Pengujian <i>Three Point Bending</i>	33
Tabel 4-3 Hasil Perhitungan Data Spesimen Uji.....	34
Tabel 4-4 Data <i>Defleksi</i> Bending.....	35
Tabel 4-5 Data Nilai <i>Defleksi</i> Hasil <i>Finite element</i>	41
Tabel 4-6 Hasil Pengolahan Data	42
Tabel 4-7 Perbandingan Nilai kekakuan bending.....	43
Tabel 4-8 Perbandingan Nilai Kekakuan Bending Spesifik.....	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Pola Batu Bata Sejajar dan Berseling.....	6
Gambar 2-2 Material Komposit <i>Sandwich</i>	8
Gambar 2-3 Proses <i>Hand Lay Up</i>	11
Gambar 2-4 Proses <i>Vacuum Bagging</i>	11
Gambar 2-5 Standar ASTM C393	12
Gambar 2-6 Pengujian <i>Three Point Bending</i>	13
Gambar 3-1 Alur penelitian.....	15
Gambar 3-2 Mesin 3D Print <i>Creality 3D Ender 6</i>	16
Gambar 3-3 Filament PLA+	16
Gambar 3-4 Pompa Vakum	17
Gambar 3-5 <i>Reservoir Pot</i>	17
Gambar 3-6 <i>Vacuum Bag</i>	18
Gambar 3-7 <i>Peel Ply</i>	18
Gambar 3-8 <i>Breathe Bleeder Fabric</i>	19
Gambar 3-9 Selang	19
Gambar 3-10 <i>Valve</i>	20
Gambar 3-11 <i>Sealant Tape</i>	20
Gambar 3-12 Serat Karbon.....	21
Gambar 3-13 Lem ALF	21
Gambar 3-14 Resin <i>Epoxy</i>	22
Gambar 3-15 Jangka Sorong	22
Gambar 3-16 Timbangan.....	23
Gambar 3-17 Kuas.....	23
Gambar 3-18 Gunting.....	24
Gambar 3-19 Gelas Plastik.....	24
Gambar 3-20 Dimensi dan Struktur Spesimen 2.8	25
Gambar 3-21 Dimensi dan Struktur Spesimen 2.4.4	26
Gambar 3-22 Dimensi dan Struktur 1.4.1.4	26
Gambar 3-23 Susunan Lapisan Komposit.....	27
Gambar 3-24 Pembuatan Spesimen.....	28

Gambar 3-25 Skema Lapisan <i>Vacuum</i>	29
Gambar 3-26 Proses <i>hand lay up</i> menggunakan lem ALF.....	29
Gambar 3-27 Proses <i>hand lay up</i> menggunakan resin	30
Gambar 3-28 Proses <i>Vacuum Bagging</i>	30
Gambar 3-29 Proses <i>Vacuum Bagging</i>	31
Gambar 4-1 Hasil Spesimen Setelah Proses <i>Vacuum Bagging</i>	32
Gambar 4-2 Grafik <i>Defleksi</i> spesimen.....	36
Gambar 4-3 Grafik Rata-rata Kekakuan Bending	36
Gambar 4-4 Grafik Rata-rata kekakuan bending spesifik	37
Gambar 4-5 Grafik Gaya Tekan Vs <i>Defleksi</i>	38
Gambar 4-6 Material properti PLA	39
Gambar 4-7 Material properti <i>carbon fiber</i>	39
Gambar 4-8 Analisis <i>Finite Element</i>	40
Gambar 4-9 Analisis <i>Finite Element</i>	40
Gambar 4-10 Analisis <i>Finite Element</i>	41

DAFTAR NOTASI

E = Modulus elastis bending (N/mm^2)

δ = Defleksi (mm)

σ = Tegangan banding (Mpa)

D = Kekakuan Banding Spesifik (Nmm^2/gr)

I = Momen Inersia (kgm)

P = Beban (N)

L = Jarak antar titik tumpuan (mm)

W = Berat (gr)

b = lebar benda uji (mm)

h = ketebalan benda uji (mm)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan dunia manufaktur khususnya dalam bidang material yang terus berinovasi untuk menciptakan material yang memiliki sifat mekanik yang lebih baik. Kebutuhan akan sebuah material yang memiliki keunggulan seperti, kekuatan yang tinggi, tahan terhadap korosi dan bobot yang ringan sangat dibutuhkan banyak bidang seperti otomotif, industri, biomedis, konstruksi dan sebagainya. Seiring dengan berjalannya waktu kebutuhan akan material tersebut meningkat sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk merancang dan menganalisis material alternatif yang dapat memenuhi kriteria tersebut, salah satunya yaitu material komposit.

Material komposit adalah material yang terdiri dari dua atau lebih material yang memiliki sifat dan fisik berbeda untuk menghasilkan sifat mekanik yang diinginkan. Dalam pembuatan komposit beberapa sifat yang dapat ditingkatkan seperti kekuatan, kekakuan, ketahanan terhadap korosi, massa dan penampilan. Berdasarkan struktur, komposit dapat dibagi menjadi dua yaitu struktur lapisan dan struktur *sandwich*. Komposit struktur *sandwich* menjadi salah satu inovasi material yang sering dikembangkan dengan memanfaatkan teknologi 3D *printing* untuk mencetak struktur inti (*core*) yang memiliki geometri kompleks dengan tingkat akurasi yang tinggi. Inti (*core*) kemudian diperkuat dengan lapisan serat karbon sebagai *skin*.

Pada penelitian sebelumnya menyatakan bahwa, spesimen dengan serat *carbon* pada satu sisi dan *infill* 100% memiliki nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen dengan *infill* 20%. Namun dalam proses pembuatan terdapat kendala yaitu rawan terjadi kegagalan pada metode *vacuum infusion* yang digunakan. Selain itu hasil spesimen yang dirancang memiliki bobot yang berat sehingga kurang ideal untuk kebutuhan material yang ringan (Rokhman, 2023).

Oleh karena itu, penelitian ini mencoba pendekatan baru untuk mengatasi masalah tersebut. Dimana fokus pada optimasi desain pada struktur *core* dengan 2 layer *skin carbon fiber* pada 1 sisi menggunakan metode fabrikasi *hand lay up* dan *vacuum bagging*. Selanjutnya peneliti menambahkan perhitungan numerik yang dikenal sebagai metode element hingga atau *finite element analysis* (FEA). Dari hasil pengujian aktual akan dibandingkan dengan simulasi *finite element* untuk memvalidasi hasil eksperimen.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi stuktur pada *core* terhadap nilai dari hasil uji *three point bending*?
2. Bagaimana perbandingan hasil pengujian aktual dengan pengujian *finite element* menggunakan solidworks?
3. Bagaimana spesifikasi material PLA dan *carbon fiber* yang digunakan dalam proses *finite element* ?

1.3 Batasan Masalah

1. Pengujian yang dilakukan adalah *three point bending* menggunakan standar pengujian ASTM C393.
2. Proses pembuatan spesimen menggunakan *hand lay up* dan *vacuum bagging*.
3. *Core* spesimen uji dibuat menggunakan mesin 3D print dengan parameter *infill* 100% dan *infill patern gyroid*.
4. Tebal *core* yang digunakan pada spesimen uji sebesar 10 mm.
5. *Ribs* berbentuk *honeycomb* atau segi enam (*hexagon*).
6. Pada setiap spesimen hanya 1 sisi yang dilapisi 2 layer serat karbon yaitu di bagian bawah *core*.
7. Proses analisis *finite element* menggunakan aplikasi berbasis CAD (Solidworks).
8. Pengujian yang dilakukan hanya menggunakan pengujian bending.
9. Pengujian bending dilakukan di laboratorium bahan teknik departemen teknik mesin universitas gajah mada.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah :

1. Mengetahui pengaruh struktur *core* dari hasil 3D print dengan parameter *infill* 100%, *infill* patern gyroid dan dilapisi 2 layer serat karbon terhadap nilai kekakuan bending.
2. Menganalisis perbedaan nilai kekakuan bending yang didapat dari hasil pengujian langsung dan analisis *finite elemen* dari aplikasi solidworks.
3. Mengetahui spesifikasi material properti dari PLA dan carbon fiber yang digunakan pada proses *finite element analysis*.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

1. Mengetahui sifat mekanik dari spesimen.
2. Mengetahui proses pembuatan komposit serat karbon menggunakan metode *hand lay up* dan *vacuum bagging*.
3. Mengetahui pengaruh struktur *core* terhadap kekuatan produk.
4. Mengetahui perbedaan hasil pengujian bending spesimen PLA dengan variasi pada struktur *core* menggunakan analisis *finite element* dan pengujian langsung.
5. Berpotensi digunakan pada produk tertutup yang hanya menggunakan satu sisi berpenguat serat karbon.
6. Memberikan efisiensi dalam penggunaan produk sehingga mengurangi biaya produksi.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

Bab ini meliputi penjelasan mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bab ini, terdapat kajian pustaka terkait dasar teori yang menjadi dasar dari pembuatan skripsi.

BAB III Metode Penelitian Bab ini mengandung isi diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, prosedur penelitian, dan pengujian spesimen.

BAB IV Hasil dan Pembahasan Dalam BAB IV terdapat pembahasan yang didalamnya membahas terkait analisa data, hasil pengujian, dan penampilan daripada grafik hasil pengujian.

BAB V Penutup Pada bagian ini berisikan tentang kesimpulan dan saran terkait penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

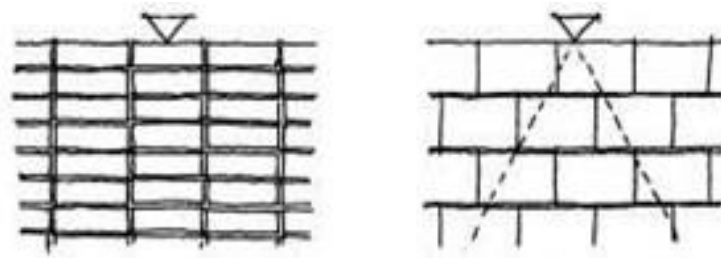
Penelitian terkait pengujian *bending* terhadap komposit telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya, misalnya pada penelitian (Olivianides, 2022) mengenai pengaruh lapisan *skin* pada komposit *sandwich* terhadap hasil uji *bending* dengan menggunakan metode *vacuum infusion*. Pada penelitian tersebut terdapat variasi *skin* pada spesimen uji yaitu 2, 3 dan 4 lapisan *fiberglass* serta tanpa lapisan *fiberglass* dengan material inti (*core*) menggunakan proses 3D *printing* berbahan PLA bertujuan untuk membandingkan nilai kekakuan pada masing-masing *skin* yang mengacu pada standar uji ASTM D 790. Hasil pengujian didapatkan nilai kekakuan tertinggi ditujukan pada variasi 2 lapisan *skin* dengan nilai 4.131.398,63 Nmm², sedangkan pada variasi 3 dan 4 lapisan *skin* nilai kekakuan lebih rendah yaitu 2.675.602,66 N.mm² dan 1.725.327,83 N.mm². Kemudian nilai kekakuan terendah terdapat pada variasi tanpa lapisan *skin* yaitu sebesar 394.189,48 N.mm².

Selanjutnya, sumber yang dijadikan sebagai dasar penelitian ini berjudul “Pengaruh Penambahan *Skin* Serat Karbon dan *Infill* 100% Material *Honeycomb Ribs* 3D Print PLA terhadap Kekakuan *Bending*” oleh (Rokhman, 2023). Penelitian ini membahas tentang pengaruh variasi *infill* yang diaplikasikan pada spesimen komposit yang menggunakan struktur *honeycomb* sebagai *ribs* terhadap hasil uji *bending* yang mengacu pada standar pengujian ASTM C393. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa spesimen uji dengan *infill* 100% menggunakan *skin* 1 lapis memiliki nilai 35.067.846 Nmm², nilai kekakuan pada penelitian tersebut 3,8 kali lipat lebih besar dibandingkan dengan penelitian sebelumnya oleh (faizun, 2022) yang memiliki dimensi spesimen yang sama dengan *infill* 20% berbahan ABS menggunakan *skin* 1 layer.

Pada penelitian (Putra, 2024), dilakukan penelitian tentang bagaimana pengaruh penambahan layer *skin carbon fiber* terhadap kekuatan *bending*. Dari hasil pengujian *three point bending* akan dibandingkan dengan *finite element*

method. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan bending tertinggi pada spesimen uji dan memvalidasi hasil pengujian aktual dengan *finite element method*. Hasil dari penelitian menyatakan bahwa spesimen 3 layer skin nilai kekakuan bending tertinggi ditujukan pada spesimen 3 layer *skin* sebesar 24.293.828 N/mm² sedangkan untuk spesimen 2 layer *skin* memiliki nilai kekakuan bending spesifik tertinggi. Dari hasil pengujian *three point bending* dibandingkan dengan hasil analisis *finite element* didapatkan bahwa terdapat selisih nilai dari tegangan bending, kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik, hal ini disebabkan karena perbedaan sifat material pada *software* dengan spesimen asli.

Selanjutnya sumber yang dijadikan dasar penelitian ini adalah artikel berjudul “eksplorasi Susunan Bata Sebagai Bidang Pembentuk Ruang”. Dari penelitian ini menyatakan bahwa pola susunan berseling sangat berpotensi besar untuk di aplikasikan pada dinding vertikal bangunan dibandingkan dengan pola sejajar. Hal ini disebabkan karena pola berseling memiliki transisi arah secara vertikal sehingga kestabilan dari struktur dinding bata selalu terjamin. Selain itu, ketika stuktur dinding bata terkena beban atau gaya eksternal dari arah vertikal, beban yang diterima tidak langsung ditransferkan secara vertikal ke satu bata dibawahnya melainkan ke dua batu bata, lalu empat batu bata dan seterusnya (Nisa et al., 2014)



Gambar 2-1 Pola Batu Bata Sejajar dan Berseling

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Komposit

Material komposit merupakan hasil kombinasi material yang terbentuk dari dua atau lebih material pembentuk, yang dimana sifat dari masing-masing material berbeda satu sama lainnya baik itu sifat kimia maupun fisik. Material komposit memiliki keunggulan tersendiri dibandingkan material alternatif lain yang seperti tahan korosi, lebih kuat, dan ekonomis. Sifat material komposit diperoleh dari penggabungan *matriks* (pengikat) dan *reinforcement* (penguat) melalui proses pembuatan yang bervariasi (Prayoga et al., 2018)

Pada umumnya material komposit terdiri dari dua penyusun yaitu *matriks* dan *reinforcement*. *Matriks* berfungsi sebagai pengikat, pemisah, pelindung serta mendistribusikan tegangan yang diterima ke serat. Sedangkan *reinforcement* (penguat) berfungsi sebagai penahan beban utama pada komposit (Nayiroh, 2019)

Menurut (Jones, 1998) material komposit adalah sebuah material yang dibentuk dari dua atau lebih material yang digabungkan pada skala makroskopis yang dapat diidentifikasi langsung. Jika material komposit dirancang dengan baik, kualitas material tersebut lebih unggul dibandingkan dengan material-material lain. Dalam pembuatan material komposit terdapat beberapa sifat-sifat mekanik yang dapat ditingkatkan seperti kekuatan, kekakuan, ketahanan terhadap korosi, ketahanan aus, penampilan, massa, konduktivitas termal, dan insulasi termal. Secara umum, sifat-sifat tersebut tidak dapat ditingkatkan secara bersamaan karena beberapa sifat saling bertolak belakang satu sama lain.

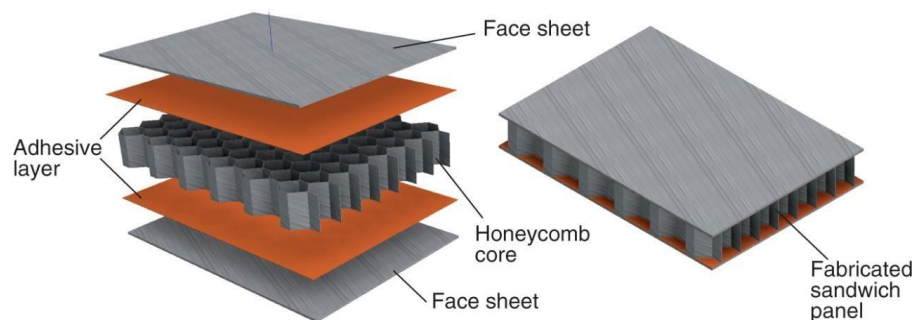
2.2.2 Komposit Sandwich

Material komposit *sandwich* atau panel *sandwich* merupakan sebuah material yang terdiri dari dua buah panel kulit yang kuat pada sisi atas dan bawah, dimana kedua lapisan tersebut dipisahkan oleh material yang memiliki densitas kecil disebut dengan core (Sari, 2018).

Umumnya penelitian tentang material komposit semakin meningkat karena memiliki kelebihan dalam hal perbandingan kekuatan dengan berat (*strenght to*

weight ratio) yang tinggi. Untuk mendapatkan beban yang ringan tanpa mengurangi kelebihan struktur *sandwich*, maka dikembangkan dengan memanfaatkan 3D printing dan material thermoplastik untuk menghasilkan *core* yang memiliki geometri kompleks dengan tingkat akurasi yang tinggi. Dengan bobotnya yang ringan, nilai kekakuan spesifik (*specific rigidity*) dari struktur *sandwich* menjadi lebih tinggi (Marsono et al., 2021).

Dalam pengembangan komposit *sandwich* banyak definisi dan variasi akan tetapi tujuan utama dari material tersebut adalah efisiensi berat yang optimal, nilai kekakuan dan kekuatan yang tinggi.



Gambar 2-2 Material Komposit Sandwich

2.2.2.1 Skin

Skin atau serat dibedakan menjadi dua yaitu serat alam dan buatan. Serat alam adalah serat yang diperoleh langsung dari alam seperti serat bambu, kapas, wol, pelepah pisang, sutra dan serat alam yang lain, sedangkan serat buatan (sintetik) seperti *fiber glass*, *fiber carbon* dan serat buatan lainnya. Serat merupakan bahan penguat untuk memperkuat material komposit *sandwich* sehingga sifat mekanik lebih kuat, Tangguh dan lebih kokoh dibanding tanpa serat penguat (Sari, 2018)

Dalam struktur komposit *sandwich*, *skin* berada pada lapisan terluar yang membungkus *core* dan berperan penting sebagai bagian utama yang menahan beban. *Skin* berfungsi menahan tegangan tarik dan tegangan tekan dalam struktur (Prayoga et al., 2018).

2.2.2.2 Core (inti)

Core merupakan salah satu bagian terpenting dari struktur komposit *sandwich* yang berfungsi menopang dan memisahkan lembaran *skin*, selain itu juga menahan deformasi akibat tegangan geser saat terjadi nya gaya dari luar (Sari, 2018).

Bagian *core* atau inti harus cukup kaku agar jarak antar permukaan tetap terjaga. Kekakuan material yang rendah kurang baik untuk diaplikasikan pada *core* karena akan mengurangi nilai kekakuan pada komposit *sandwich*. Di sisi lain, *core* harus memiliki densitas rendah sehingga menghasilkan komposit *sandwich* yang ringan (Hidayat et al., 2016).

2.2.2.3 Matriks

Menurut (Mazumdar, 2002), dalam komposisi komposit *sandwich* bagian ini berfungsi sebagai pengikat *reinforcement* secara bersamaan dan mentransferkan beban atau gaya yang diterima dari luar. Selain itu, matriks juga melindungi *skin* dari serangan kimia dan kerusakan mekanis (keausan). Setelah penggabungan komposisi dalam struktur komposit *sandwich*, matriks mengisolasi *skin* sehingga masing-masing *skin* dapat berkerja secara terpisah.

2.2.3 3D Print

3D print atau biasa dikenal dengan *additive layer manufacturing* adalah proses pembuatan sebuah objek, komponen atau *prototype* tiga dimensi berdasarkan model digital. 3D print memungkinkan untuk menciptakan sebuah produk yang kompleks dan geometris yang sulit dalam bidang otomotif, manufaktur, kesehatan, dan lain-lain. Cara kerja pada 3D printing yaitu menambahkan material leleh yang ditumpuk pada lapisan-lapisan secara berurutan sehingga membentuk produk fisik dari *Computer Aided Design* (CAD).

2.2.3.1 *Polyactic Acid (PLA/PLA+)*

PLA (*Polyactic Acid*) merupakan salah satu material cetak 3D yang sering digunakan dan terjangkau di pasaran. PLA adalah polimer termoplastik yang terbuat dari sumber daya alam terbarukan. Hal ini membuat filament PLA lebih ramah lingkungan dibanding filament yang lain sehingga memberikan dampak yang lebih baik terhadap pengelolaan limbah (Syafa'at et al., 2022).

2.2.4 Struktur *Honeycomb*

Struktur *honeycomb* dirancang dengan pola heksagonal yang terinspirasi dari sarang lebah, dimana bentuk heksagonal tersebut menciptakan kombinasi ruang guna yang ideal sehingga tidak menimbulkan ruang-ruang sisa yang tidak efektif. Struktur heksagonal (segi enam) memberikan manfaat secara maksimal pada masing-masing bagian unit dan meminimalisir penggunaan bahan baku yang dibutuhkan ketika proses pembuatan produk tiga dimensi (Meiwandari & Sriyanti, 2019).

2.2.5 *Hand lay Up*

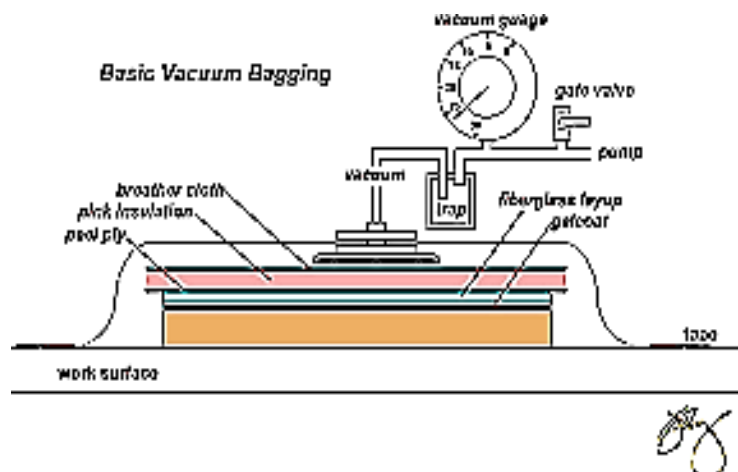
Hand lay up merupakan metode yang paling sederhana dalam proses fabrikasi material komposit diantara metode-metode yang lain. Dalam proses fabrikasi, cairan resin di oleskan pada cetakan (*mold*) kemudian serat diletakkan diatasnya, setelah itu diratakan menggunakan kuas atau rol. Langkah ini dilakukan secara terus menerus hinga mencapai ketebalan yang diinginkan. Proses pengeringan biasanya dilakukan dengan suhu ruangan sekitar selama 1 – 2 hari tergantung jumlah dan jenis resin yang digunakan.



Gambar 2-3 Proses Hand Lay Up

2.2.6 Vacuum Bagging

Vacuum bagging adalah salah satu metode dalam pembuatan material komposit yang merupakan penyempurnaan dari proses *hand lay up*. Dalam proses pembuatan material komposit, dimana konsep yang digunakan yaitu menggunakan pompa *vacuum* untuk menghilangkan udara yang terperangkap dalam wadah sehingga menekan lapisan laminasi secara merata.

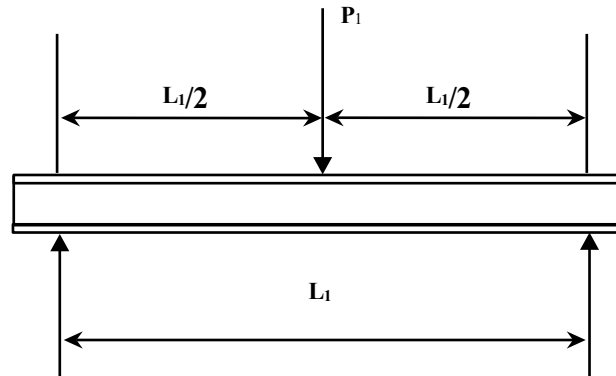


Gambar 2-4 Proses Vacuum Bagging

2.2.7 ASTM C393

Dalam aplikasinya komposit *sandwich* tak pernah lepas dari proses pembebanan mekanik terutama beban bending. Pengujian banding yang

diaplikasikan yaitu *three point bending method*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2-5 yang mengacu pada standar ASTM C393.



Gambar 2-5 Standar ASTM C393

Pengujian bending ASTM C393 merupakan metode standar pengujian yang digunakan untuk mengukur sifat mekanik suatu komposit *structural* yang diperkuat serat. Pada proses pengujian, titik pembebanan berpusat pada satu titik di tengah antara jarak tumpuan seperti pada gambar 2-5. Jarak antar tumpuan (L_1) adalah 100 mm dan titik pembebanan ($L_1/2$) di antara kedua tumpuan sebesar 50 mm.

2.2.8 Pengujian Bending

Pengujian bending merupakan salah satu metode pengujian untuk mengukur sifat mekanik suatu material akibat pembebanan pada suatu titik yang ditahan diatas dua tumpuan. Proses pengujian bending memiliki 2 jenis pengujian, yaitu *three point bending* dan *four point bending*. Akibat pembebanan bending, bagian atas spesimen mengalami gaya tekan sedangkan bagian bawah spesimen mengalami gaya tarik. Nilai pada pengujian bending tergantung dari komposisi material yang digunakan seperti serat, *core* serta *matriks*.



Gambar 2-6 Pengujian Three Point Bending

Dari hasil pengujian yang dilakukan akan menghasilkan data berupa nilai beban maksimal, defleksi (perpindahan relatif pada ujung spesimen yang ditekuk) dan tegangan bending. Data yang didapatkan akan diolah untuk perhitungan mencari nilai dari kekakuan bending *flexuraal rigidity* dan kekakuan bending spesifik, dengan rumus sebagai berikut :

- Tegangan Max

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.1)$$

- Kekuatan Bending *Flexural Rigidity*

$$D = E \cdot I = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta} \quad (2.2)$$

- Kekuatan Bending *Flexural Rigidity* Spesifik

$$D.\text{Spesifik} = \frac{D}{W} \quad (2.3)$$

Keterangan:

E = Modulus elastis bending (N/mm^2)

δ = Defleksi (mm)

σ = Tegangan banding (Mpa)

D = Kekakuan Bending Spesifik (Nmm^2/gr)

I = Momen Inersia (kgm)

P = Beban (N)

L = Jarak antar titik tumpuan (mm)

W = Berat (gr)

b = lebar benda uji (mm)

h = ketebalan benda uji (mm)

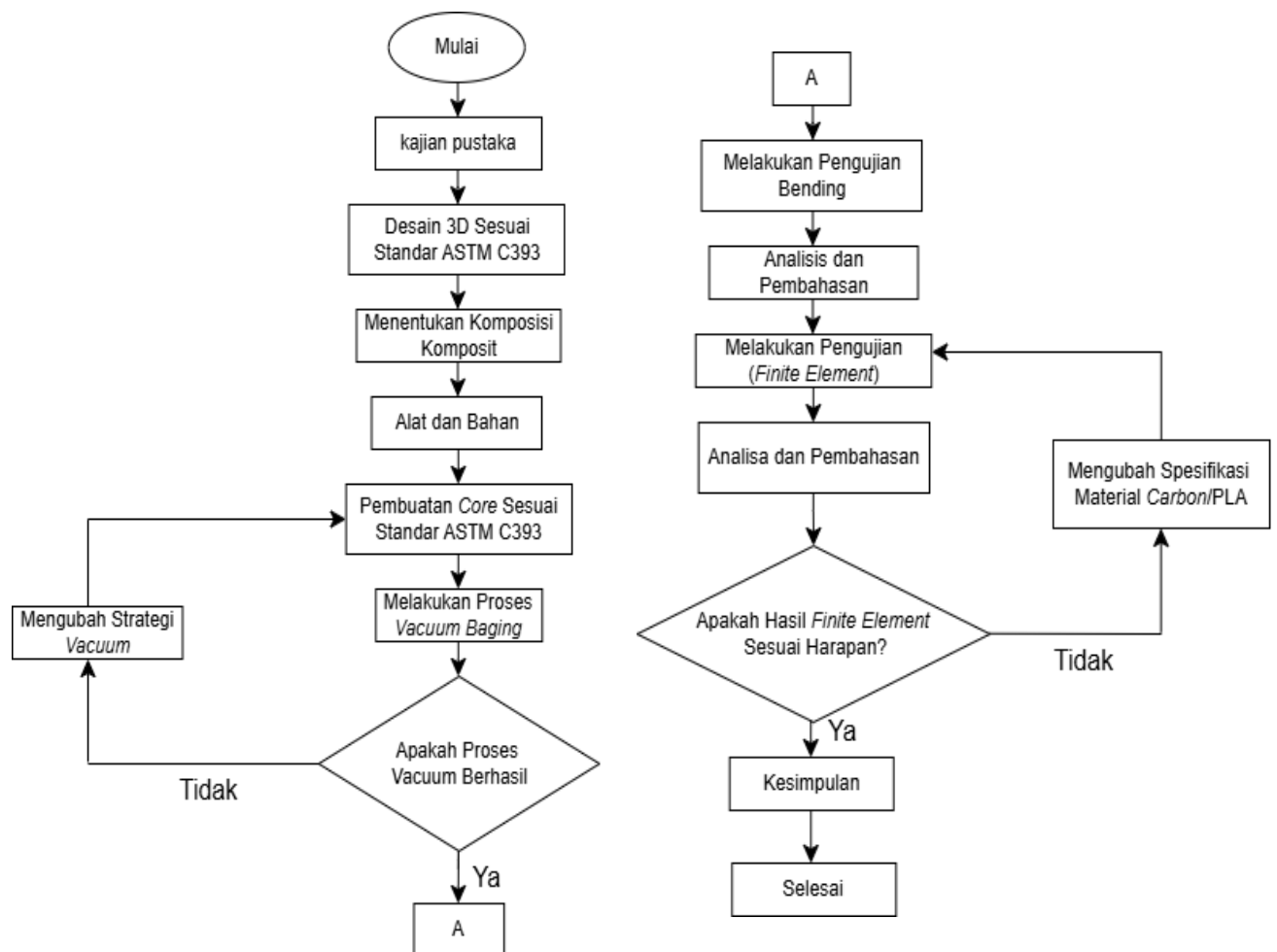
2.2.10 Metode Finite Element

Finite element analysis atau metode elemen hingga merupakan metode numerik untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan persamaan matematika yang kompleks dan kondisi batas tertentu. Pada metode ini, geometri di pecah menjadi bagian-bagian kecil yang lebih sederhana. Bagian-bagian kecil ini disebut elemen hingga, kemudian diterapkan persamaan matematika yang lebih sederhana sehingga menghasilkan persamaan dan hasil dari elemen hingga. Setelah itu, semua bagian kecil disusun menjadi satu system besar. Finite element digunakan untuk menyelesaikan masalah diantaranya permasalahan fisik. Beberapa masalah yang dapat dipecahkan dengan menggunakan metode ini antara lain tegangan, tekukan dan analisis getaran (Mulyadi, 2011).

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3-1 Alur penelitian

3.2 Peralatan dan Bahan

1. 3D Printing

Pada gambar 3-2 dibawah menunjukan mesin 3D print dengan merk Creality 3D dengan seri Ender 6 yang digunakan untuk mencetak atau membuat spesimen dari filament.



Gambar 3-2 Mesin 3D Print Creality 3D Ender 6

2. Filament PLA+

Pada gambar 3-3 dibawah ini menunjukan filament PLA+ atau *polyactic acid* yang digunakan untuk membuat spesimen 3D print atau *core*.



Gambar 3-3 Filament PLA+

3. Pompa *Vacuum*

Pada gambar 3-4 dibawah ini menunjukan pompa *vacuum* digunakan untuk menyedot udara dari *vacuum* bag sehingga memberikan tekanan dan menyusut mengikuti bentuk spesimen.



Gambar 3-4 Pompa *Vacuum*

4. *Reservoir Pot*

Reservoir pot berfungsi untuk menampung tekanan udara agar pada saat proses *vacuum* daya hisap menjadi lebih tinggi. Selain itu terdapat *barometer* pada alat ini digunakan untuk mengukur tekanan yang terjadi pada saat proses *vacuum*.



Gambar 3-5 *Reservoir Pot*

5. *Vacuum Bag*

Pada gambar 3-6 dibawah ini menunjukan *vacuum bag* yang digunakan sebagai wadah untuk meletakkan spesimen komposit yang akan dilakukan proses *vacuum*.



Gambar 3-6 *Vacuum Bag*

6. *Peel Ply* (Kain Nylon)

Peel ply digunakan sebagai pembatas antara spesimen komposit dan *breathe bleeder fabric* agar memudahkan proses pelepasan *breathe bleeder fabric* dari spesimen.



Gambar 3-7 *Peel Ply*

7. *Breathe Bleeder Fabric*

Breathe bleeder fabric berfungsi untuk menyerap resin yang berlebihan dari komposit agar tidak terjadi penyebaran resin ke area spesimen yang tidak diinginkan.



Gambar 3-8 *Breathe Bleeder Fabric*

8. Selang

Selang digunakan sebagai saluran *vacuum* untuk menghisap udara yang terperangkap di dalam *vacuum bag*.



Gambar 3-9 Selang

9. *Valve*

Valve berfungsi sebagai pembuka dan penutup jalur aliran udara dari *vacuum bag*.



Gambar 3-10 *Valve*

10. *Sealant Tape*

Pada gambar 3-11 dibawah ini menunjukan *sealant tape* yang digunakan untuk merekatkan *vacuum bag* di setiap sisi sehingga pada saat proses *vacuum* tidak terjadi kebocoran udara yang dapat menyebabkan udara dari luar masuk ke dalam plastik vakum.



Gambar 3-11 *Sealant Tape*

11. Serat Karbon

Pada gambar 3-12 dibawah ini menunjukan serat karbon yang digunakan sebagai *skin* komposit *sandwich*.



Gambar 3-12 Serat Karbon

12. Lem ALF

Pada gambar 3-13 dibawah ini menunjukan lem ALF yang digunakan sebagai perekat untuk menempelkan *skin* berbahan serat karbon dengan *core* berbahan PLA.



Gambar 3-13 Lem ALF

13. Resin Epoxy

Resin *epoxy* merupakan senyawa kimia yang dihasilkan dari proses polimerisasi epoksida. *Epoxy* berfungsi sebagai perekat serat karbon.

Katalis berfungsi sebagai campuran resin untuk membantu proses pengerasan atau mempercepat proses reaksi.



Gambar 3-14 Resin Epoxy

14. Jangka Sorong

Jangka sorong berfungsi untuk mengukur ketebalan, lebar dan panjang spesimen sebelum dan sesudah dilapisi *skin*.



Gambar 3-15 Jangka Sorong

15. Timbangan

Pada gambar 3-16 dibawah ini merupakan timbangan yang digunakan untuk mengukur bahan-bahan yang digunakan.



Gambar 3-16 Timbangan

16. Kuas

Pada proses *skinning* menggunakan metode *hand lay up*, kuas berfungsi untuk memberi dan meratakan resin pada serat karbon.



Gambar 3-17 Kuas

17. Gunting

Gunting berfungsi untuk memotong bahan-bahan yang akan digunakan untuk proses *vacuum* seperti serat karbon, *sealant tape*, selang, *vacuum bag*.



Gambar 3-18 Gunting

18. Gelas Plastik

Gelas plastik berfungsi sebagai wadah untuk mencampurkan resin *epoxy* dan *hardener*.



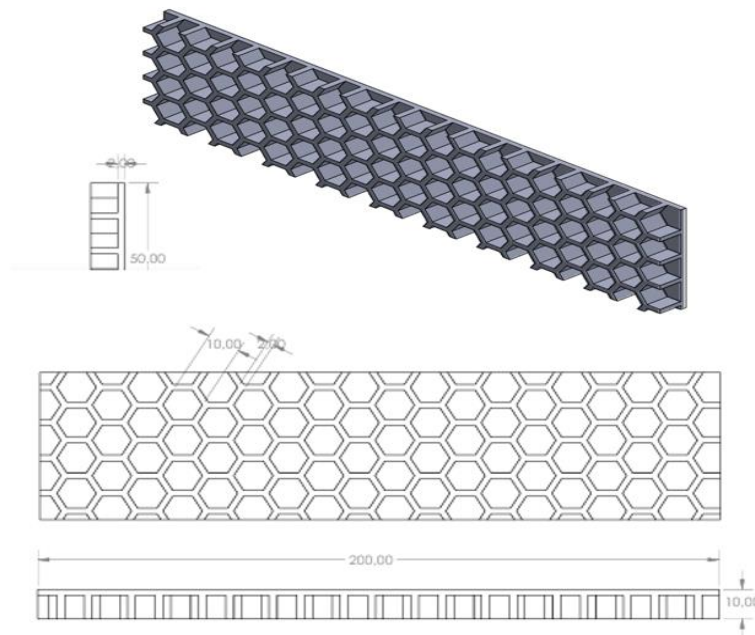
Gambar 3-19 Gelas Plastik

3.3 Perancangan

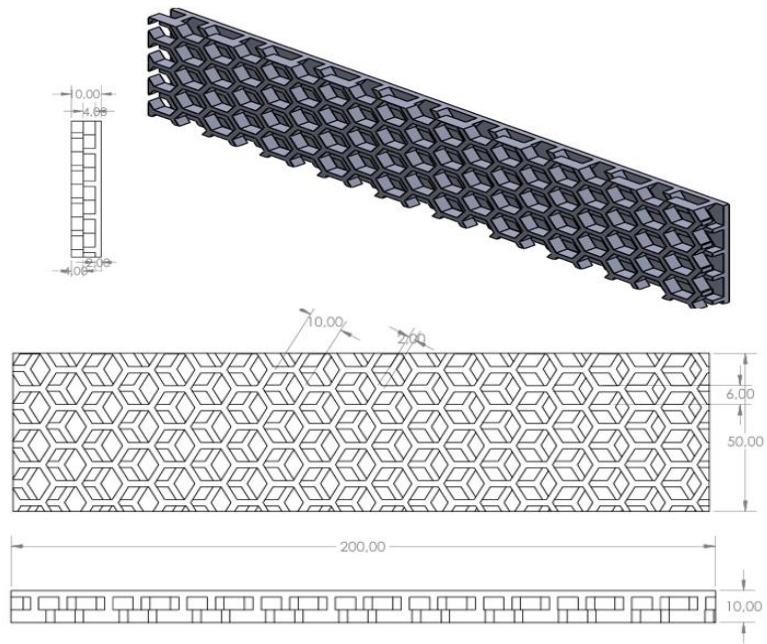
Pengujian bending yang dilakukan pada spesimen komposit *sandwich* yaitu standar pengujian ASTM C393. Bahan yang digunakan pada *core* adalah PLA+ dengan parameter pencetakan *infill* 100%.

Dimensi spesimen yang akan dibuat pada penelitian ini mengacu pada standar ASTM C393. Penelitian ini dibuat dengan *core* berbahan *Polyactic Acid* (PLA) yang memiliki dimensi ketebalan 10 mm, panjang keseluruhan 200 mm, dan lebar 50 mm. Selain itu, *ribs* yang dirancang heksagonal atau *honeycomb* memiliki dimensi 10 mm dan jarak antara *honeycomb* sebesar 2 mm. Terdapat tiga variasi desain struktur spesimen sebagai pembanding yaitu 2.8, 2.4.4, dan 1.4.1.4.

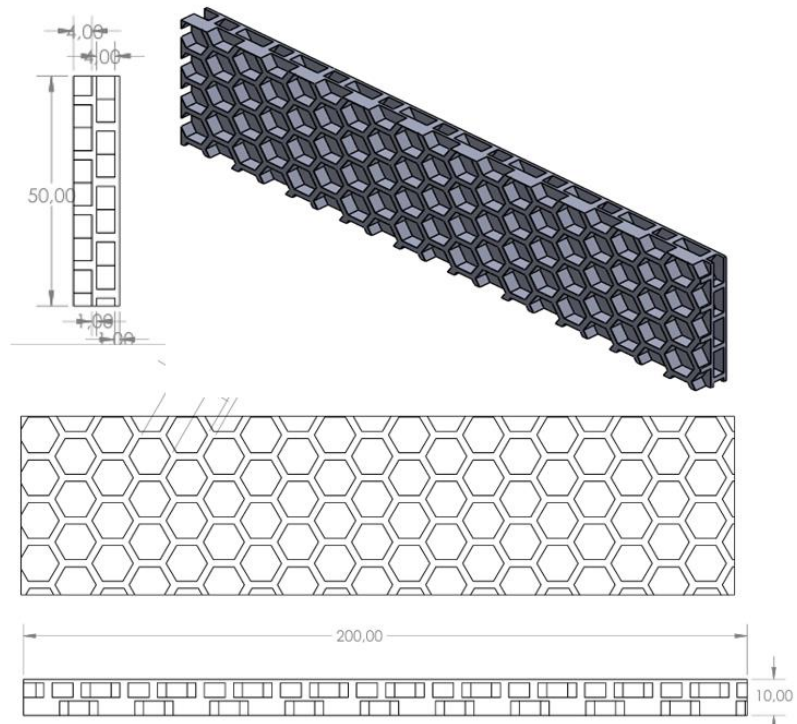
Gambar 3-20 menunjukkan desain struktur 2.8 yang memiliki dimensi lantai dasar 2 mm dan *honeycomb* 8 mm. Kemudian gambar 3-21 menunjukkan desain struktur 2.4.4 dengan dimensi tebal lantai dasar 2 mm dan tiap *honeycomb* pada tumpukan berseling (*zig-zag*) sebesar 4 mm. Gambar 3-22 menunjukkan desain struktur 1.4.1.4, dimana dimensi ketebalan lantai dasar 1 mm dan *honeycomb* sebesar 4 mm kemudian lapisan lantai 1 mm dan *honeycomb* 4 mm.



Gambar 3-20 Dimensi dan Struktur Spesimen 2.8



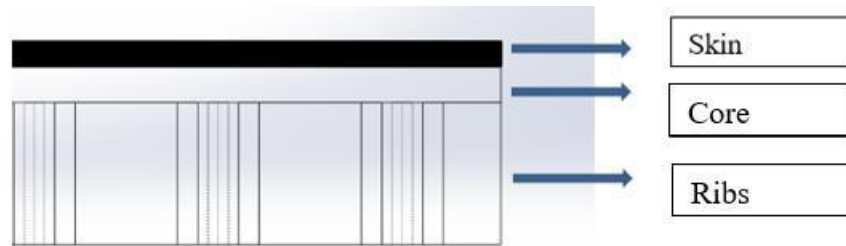
Gambar 3-21 Dimensi dan Struktur Spesimen 2.4.4



Gambar 3-22 Dimensi dan Struktur 1.4.1.4

Jumlah spesimen yang akan dibuat sebanyak 9 spesimen dan menggunakan 2 layer skin serat karbon. Setiap variasi struktur 2.8, 2.4.4, dan 1.4.1.4 masing-masing memiliki 3 spesimen uji.

3.3.1 Susunan Lapisan Komposit



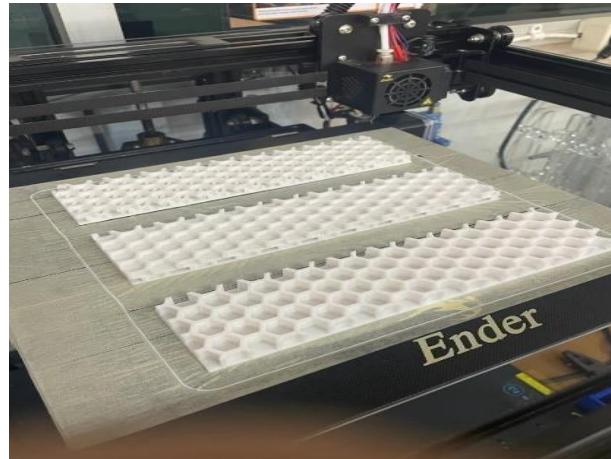
Gambar 3-23 Susunan Lapisan Komposit

Susunan pada spesimen komposit terdiri dari tiga bagian yaitu *skin*, *core* dan *ribs*. Pada bagian *skin* menggunakan serat karbon, bagian *core* dan *ribs* menggunakan material *Polyactic Acid* (PLA) dan dicetak menggunakan 3D *printing*. *Ribs* memiliki bentuk heksagonal atau *honeycomb*, *ribs* juga merupakan satu kesatuan dari bagian *core*.

3.4 Proses Pengerjaan

Proses pengerjaan dilakukan melalui beberapa langkah dimulai dari pembuatan *core* menggunakan 3D print kemudian dilanjutkan dengan proses *hand lay up* untuk memberikan lapisan *skin* berbahan serat karbon dengan bantuan lem ALF, resin dan hardener. Setelah itu dilakukan proses *vacuum bag* untuk menyempurnakan proses *hand lay up* agar hasil dari reaksi yang terjadi antara serat dan resin lebih baik.

3.4.1 Pembuatan Core dengan 3D Printing



Gambar 3-24 Pembuatan Spesimen

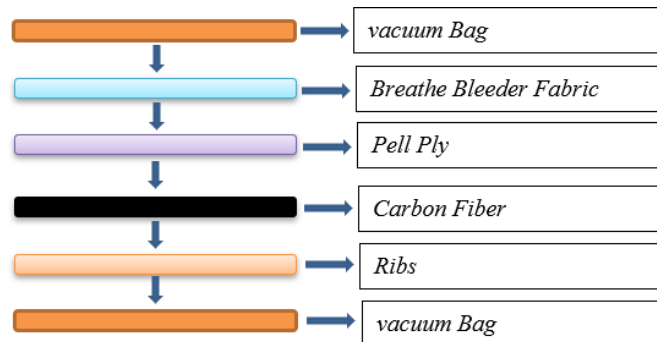
Gambar 3-24 menunjukkan proses pembuatan spesimen menggunakan mesin 3D print dengan material filament yang digunakan adalah *Polyactic Acid* (PLA). Pembuatan spesimen menggunakan dimensi yang mengacu pada standar pengujian ASTM C393 seperti yang dijelaskan pada sub bab 3.3

Tabel 3-1 Parameter Proses Pembuatan Spesimen

Bahan	PLA
<i>Infil</i>	100%
Suhu <i>bed</i>	60°C
Suhu nozzle	220°C
<i>Speed</i>	100mm/s
<i>Layer thickness</i>	0.06mm
<i>Fill pattern</i>	<i>gyroid</i>

Pada tabel 3-1 menunjukkan parameter yang digunakan dalam proses 3D menggunakan filamen jenis PLA dengan *infill* 100%, suhu bed 60 C, Suhu *nozzle* 220 C, speed 100 mm/s, *layer thickness* 0.06 mm dengan *fill pattern gyroid*.

3.4.2 Skema Lapisan Vacuum



Gambar 3-25 Skema Lapisan Vacuum

Gambar 3-25 menunjukkan urutan lapisan yang digunakan dalam proses *vacuum bagging*. Mulai dari lapisan terluar dibungkus plastik *vacuum* kemudian terdapat *breathe bleeder fabric* dan *pell ply*, kemudian lapisan skin 2 layer berbahan serat karbon yang sebelumnya sudah ditempel pada *core* menggunakan metode *hand lay up*.

3.4.3 Proses Vacuum

Berikut adalah tahap yang dilakukan dalam proses vacuum :

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan. Kemudian mencampur lem ALF dan *hardener* dengan perbandingan 1:1, selanjutnya lem ALF dioleskan ke *core* spesimen sampai rata lalu tempelkan serat karbon dan tunggu hingga kering.



Gambar 3-26 Proses *Hand Lay Up* Menggunakan Lem ALF

2. Menyiapkan dan mencampur resin *epoxy* dan *hardener* dengan perbandingan 2:1, kemudian oleskan resin pada serat karbon sampai rata lalu tempelkan serat karbon 1 layer. Setelah itu oleskan lagi resin sebelum dilapisi *peel ply*.



Gambar 3-27 Proses *Hand Lay Up* Menggunakan Resin

Setelah spesimen melalui tahapan *hand lay up*, kemudian dilanjutkan proses *vacuum bagging*. Berikut adalah proses *vacuum bagging* :

3. Menyiapkan bahan yang akan digunakan pada proses *vacuum bagging*. Melapisi semua sisi plastik *vacuum* menggunakan *sealant tape*, kemudian menyiapkan saluran *output* yang terhubung dengan *reservoir pot* dan pompa vakum.



Gambar 3-28 Proses *Vacuum Bagging*

4. Menyusun spesimen komposit di dalam plastik *vacuum*, selanjutnya melakukan proses *vacuum* sampai plastik *vacuum* mengepres spesimen dengan sempurna. Diamkan selama 24 jam.



Gambar 3-29 Proses *Vacuum Bagging*

3.4.4 Proses Pengujian bending

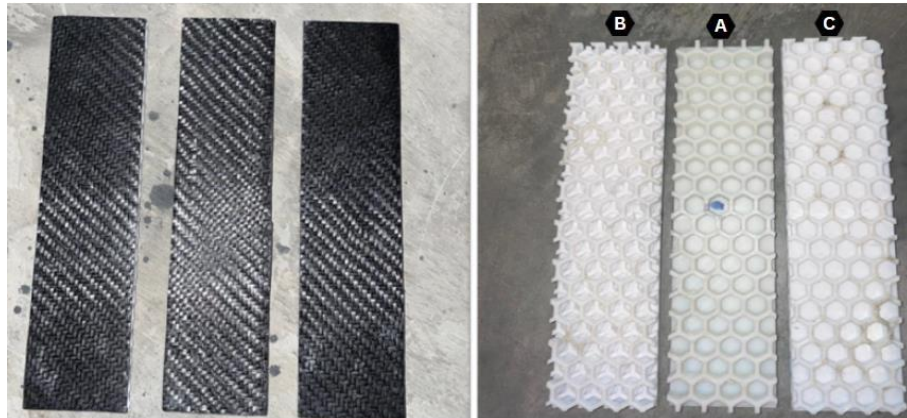
Pengujian banding dilakukan menggunakan mesin uji banding menggunakan standar ASTM C393, berikut adalah langkah-langkah proses pengujian bending :

1. Menyiapkan spesimen kemudian mengukur ulang dimensi panjang, lebar dan tebal menggunakan jangka sorong.
2. Menyiapkan mesin uji bending dengan mengatur jarak antar tumpuan sebesar 100 mm dan mengatur pengambilan grafik.
3. Meletakkan spesimen uji pada tumpuan tepat pada titik tengah dan sesuai dengan jarak antar titik tumpuan.
4. Memulai pengujian dengan memberikan beban maksimal pada bagian tengah spesimen secara perlahan hingga spesimen mengalami kegagalan.
5. Mesin akan mencatat hasil nilai beban maksimal yang diberikan dan membuat grafik beban terhadap defleksi yang terjadi.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan



Gambar 4-1 Hasil Spesimen Setelah Proses *Vacuum Bagging*

Gambar 4-1 diatas menunjukkan hasil spesimen yang telah melalui tahap proses *hand lay up*, *vacuum bag* dan *finishing*. Kode A menunjukkan desain struktur 2.8, kode B menunjukkan desain struktur 2.4.4. Kode C menunjukkan desain struktur 1.4.1.4

Tabel 4-1 Hasil Pengerjaan Spesimen Uji

No	Kode Spesimen	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Lebar Awal (mm)	Lebar Akhir (mm)	Tebal Awal (mm)	Tebal Akhir (mm)	Tebal Skin
1	A1 (1.8)	54	62,8	50,2	50,2	10,6	10,9	0,3
2	A2 (1.8)	51	60	50,6	50,6	10,3	10,8	0,5
3	A3 (1.8)	50	63	50,7	50,7	10,3	11	0,7
4	B1(2.4.4)	55	63,8	50,1	50,1	10,7	10,9	0,2
5	B2 (2.4.4)	52	60,4	50,6	50,6	10,4	10,9	0,5
6	B3 (2.4.4)	53	63,2	50,5	50,5	10,3	11,2	0,9
7	C1 (1.4.1.4)	55	63,8	50,2	50,2	10,7	10,8	0,1
8	C2 (1.4.1.4)	53	60	50,3	50,3	10,3	11,1	0,8
9	C3 (1.4.1.4)	52	63	50,9	50,9	10,4	10,9	0,5

4.2 Hasil Pengujian

Pengujian *three point bending* dilakukan pada spesimen uji berjumlah 9, dimana masing-masing variasi struktur memiliki 3 spesimen uji. Pengujian bending dilaksanakan di laboratorium Bahan Teknik UGM dengan menggunakan standar pengujian ASTM C393.

Berdasarkan hasil pengujian bending terhadap spesimen uji 2 layer skin karbon. Maka didapatkan hasil data pada setiap spesimen yang telah di uji, yaitu nilai tekan atau beban maksimal, defleksi dan tegangan bending. Mesin *universal testing machine* juga memberikan grafik beban berbanding defleksi pada masing-masing spesimen uji.

Tabel 4-2 Data Hasil Pengujian *Three Point Bending*

No	Variasi Spesimen	Tebal (mm)	Lebar (mm)	P Max (KN)	Defleksi (mm)	Tegangan Bending (MPa)
1	A1 (2.8)	10,90	50,20	0,52	9,11	10,46
2	A2 (2.8)	10,80	50,58	0,60	6,10	12,20
3	A3 (2.8)	11,00	50,70	0,71	5,20	13,89
4	B1 (2.4.4)	10,90	50,12	0,50	7,56	10,08
5	B2 (2.4.4)	10,98	50,60	0,56	6,75	11,02
6	B3 (2.4.4)	11,20	50,48	0,66	6,51	12,51
7	C1 (1.4.1.4)	10,85	50,24	0,66	6,56	13,39
8	C2 (1.4.1.4)	11,10	50,32	0,83	4,31	16,06
9	C3 (1.4.1.4)	10,98	50,96	0,74	3,71	14,45

Pada tabel 4-2 menunjukan hasil bahwa rata-rata beban maksimal dan tegangan bending tertinggi terdapat pada spesimen uji dengan kode C (1.4.1.4) yaitu spesimen yang memiliki komposisi struktur 1 mm alas, 4 mm *ribs honeycombs* dilanjut dengan 1 mm alas dan 4 mm *ribs honeycombs*. Pada spesimen

C2 memiliki nilai tertinggi dari hasil pengujian langsung, dimana beban maksimal yang dapat ditahan oleh spesimen uji C2 sebesar 830 N serta tegangan bending yang dihasilkan yaitu sebesar 16,06 Mpa. Sedangkan nilai terendah dari hasil pengujian langsung terdapat pada spesimen uji B1. Spesimen uji B1 hanya mampu menerima beban maksimal sebesar 500 N dan tegangan bending yang terjadi yaitu sebesar 10,08 Mpa. Selain itu, nilai defleksi terendah terdapat pada spesimen uji C3 yaitu sebesar 3,71 mm sedangkan spesimen uji A1 memiliki nilai defleksi tertinggi sebesar 9,11 mm.

4.3 Analisis dan Perhitungan

Dari hasil pengujian bending terhadap spesimen uji, maka didapatkan nilai beban maksimal, tegangan serta defleksi yang terjadi selama proses pengujian.

4.3.1 Perhitungan

Dari data yang telah didapatkan dari hasil pengujian bending dilakukan pengolahan data untuk mencari nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik dari setiap spesimen uji menggunakan persamaan pada bab 2 yaitu 2.1, 2.2, dan 2.3.

Tabel 4-3 Hasil Perhitungan Data Spesimen Uji

Kode Spesimen	Defleksi (mm)	Berat (gram)	Tegangan Max (Mpa)	Kekakuan Bending (kN.mm ²)	Rata-rata Kekakuan Bending (kN.mm ²)	Kekakuan Bending Spesifik (kN.mm ² /gr)	Rerata Kekakuan Bending Spesifik (kN.mm ² /gr)
A1 (2.8)	9,11	62,80	13,08	1.189,17	2.027,63	18,93	32,74
A2 (2.8)	6,10	60,00	15,26	2.049,18		34,15	
A3 (2.8)	5,20	63,00	17,36	2.844,55		45,15	
B1 (2.4.4)	7,56	63,80	12,59	1.377,86	1.739,46	21,59	27,87
B2 (2.4.4)	6,75	60,40	13,77	1.728,39		28,61	
B3 (2.4.4)	6,51	63,20	15,63	2.112,13		33,42	
C1 (1.4.1.4)	6,56	63,80	16,74	2.096,03	3.421,15	32,85	55,22
C2 (1.4.1.4)	4,31	60,00	20,08	4.011,98		66,86	
C3 (1.4.1.4)	3,71	63,00	18,07	4.155,43		65,95	

Pada tabel 4-3 menunjukan hasil data yang telah diolah menggunakan persamaan pada bab 2. Didapatkan hasil bahwa nilai rata-rata kekakuan bending tertinggi terdapat pada spesimen uji C (1.4.1.4) yaitu $3.421,15 \text{ kN.mm}^2$, sedangkan untuk spesimen uji A (2.8) dan B (2.4.4) memiliki nilai rata rata kekakuan bending sebesar $2.027,63 \text{ kN.mm}^2$ dan $1.739,46 \text{ kN.mm}^2$. Kemudian untuk rata-rata nilai kekakuan bending spesifik pada spesimen uji A (2.8) sebesar $32,74 \text{ kN.mm}^2/\text{gram}$ dan spesimen uji B (2.4.4) sebesar $27,87 \text{ kN.mm}^2/\text{gram}$, sedangkan untuk spesimen uji C (1.4.1.4) memiliki nilai rata-rata kekakuan bending spesifik tertinggi yaitu sebesar $55,22 \text{ kN.mm}^2/\text{gram}$.

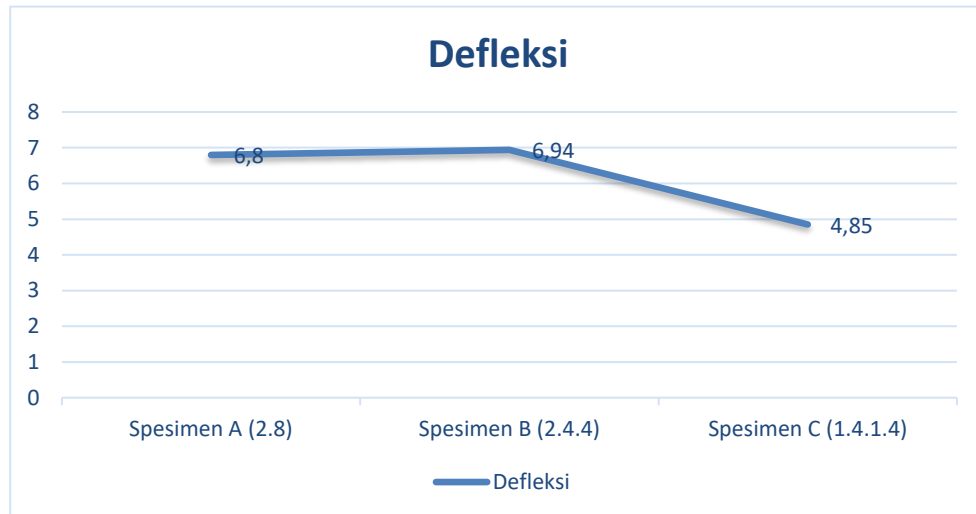
4.4 Pembahasan

Hasil data yang telah diperoleh dari pengujian bending kemudian diolah untuk mendapatkan nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik. Dari hasil pengolahan data kemudian dibandingkan antara spesimen uji A (2.8), spesimen uji B (2.4.4) dan spesimen uji C (1.4.1.4).

4.4.1 Defleksi Bending

Tabel 4-4 Data Defleksi Bending

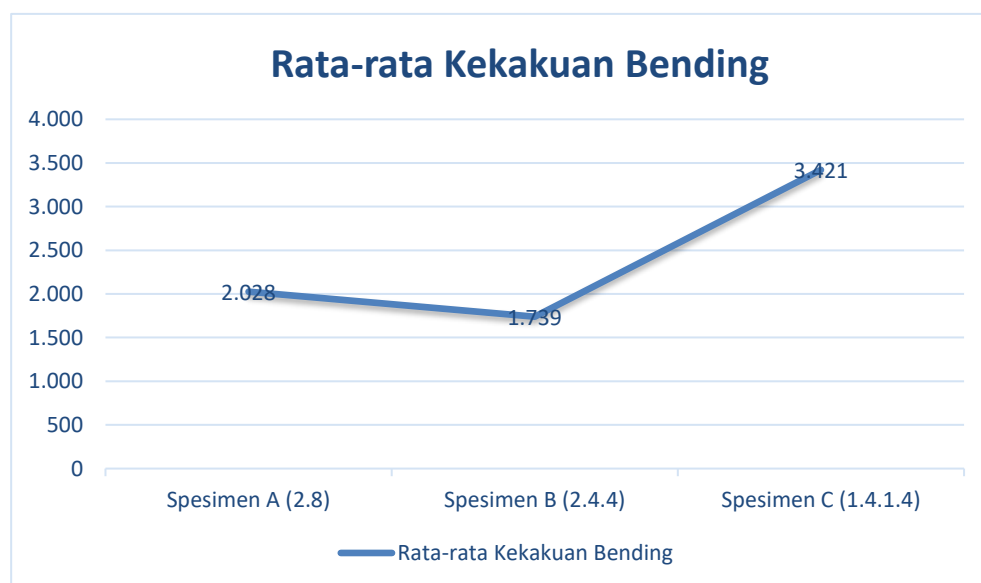
Kode Spesimen	Defleksi (mm)	Rata-rata Defleksi (mm)
A1 (2.8)	9,11	6,80
A2 (2.8)	6,10	
A3 (2.8)	5,20	
B1 (2.4.4)	7,56	6,94
B2 (2.4.4)	6,75	
B3 (2.4.4)	6,51	
C1 (1.4.1.4)	6,56	4,85
C2 (1.4.1.4)	4,31	
C3 (1.4.1.4)	3,71	



Gambar 4-2 Grafik Defleksi spesimen

Pada tabel 4-4 diatas menunjukan data hasil pengujian yaitu nilai defleksi yang terjadi pada spesimen uji. Spesimen uji A memiliki rata-rata nilai defleksi sebesar 6,80 mm. Pada spesimen uji B nilai rata-rata defleksi bending sebesar 6,94 mm. Sedangkan pada spesimen C memiliki nilai rata-rata defleksi sebesar 4,85 mm. Berdasarkan data diatas, spesimen C dengan variasi struktur 1.4.1.4 memiliki nilai rata-rata defleksi bending terendah.

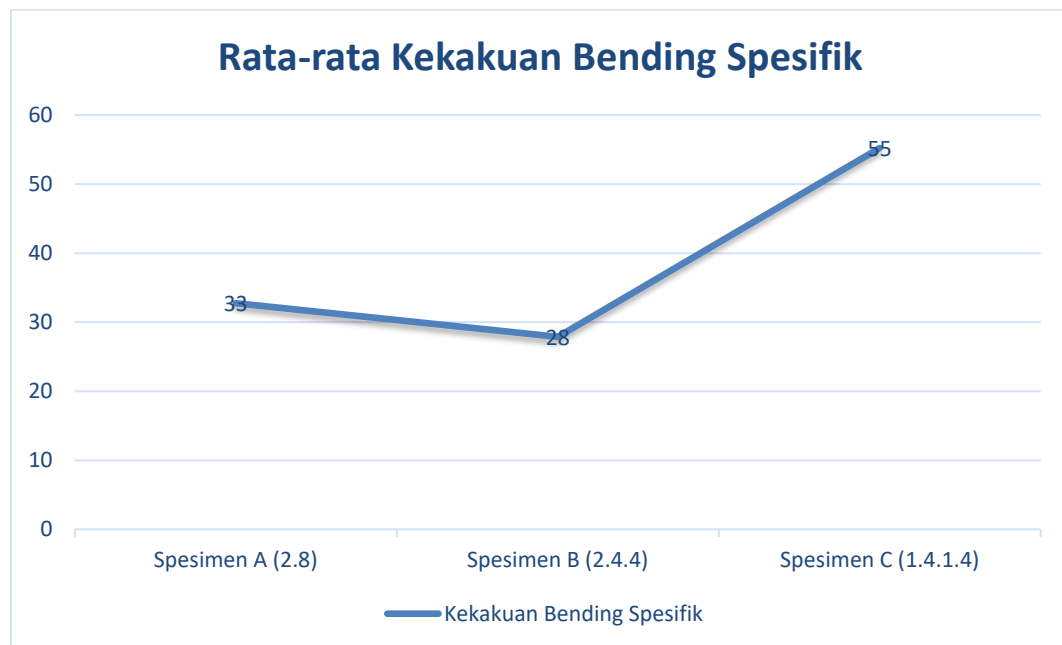
4.4.2 Kekakuan Bending



Gambar 4-3 Grafik Rata-rata Kekakuan Bending

Dari hasil pengolahan data, gambar 4-3 diatas menunjukkan grafik rata-rata nilai kekakuan bending dari masing-masing spesimen uji. Spesimen uji C menunjukkan nilai rata-rata kekakuan bending tertinggi sebesar $3.421,15 \text{ kN.mm}^2$. Sedangkan untuk spesimen A menunjukkan nilai rata-rata kekakuan bending sebesar $2.027,63 \text{ kN.mm}^2$. Kemudian spesimen B memiliki nilai rata-rata kekakuan bending terendah yaitu sebesar $1.739,46 \text{ kN.mm}^2$.

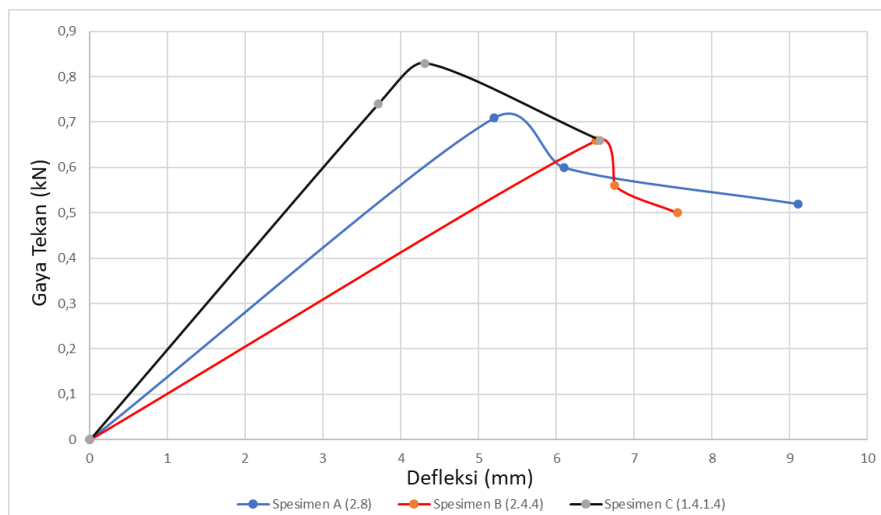
4.4.3 Kekakuan Bending Spesifik



Gambar 4-4 Grafik Rata-rata Kekakuan Bending Spesifik

Setelah melakukan pengolahan data, gambar 4-13 diatas menunjukkan nilai dari rata-rata kekakuan bending spesifik spesimen A, spesimen B dan spesimen C. Spesimen C memiliki rata-rata nilai kekakuan bending spesifik tertinggi yaitu sebesar $55,22 \text{ kN.mm}^2/\text{gram}$. Kemudian rata-rata nilai kekakuan bending spesifik pada spesimen A sebesar $32,74 \text{ kN.mm}^2/\text{gram}$. Sedangkan spesimen B memiliki rata-rata nilai kekakuan bending spesifik terendah yaitu $27,87 \text{ kN.mm}^2/\text{gram}$. Dari hasil pengolahan data diatas menunjukkan bahwa spesimen C yang menerapkan pola berseling (*zig-zag*) dan tambahan alas pada struktur core memberikan nilai kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen A yang memiliki struktur biasa.

4.4.4 Grafik Uji Antara Gaya Tekan vs Defleksi



Gambar 4-5 Grafik Gaya Tekan Vs Defleksi

Gambar 4-14 diatas menunjukkan grafik perbandingan dari nilai hasil pengujian bending yaitu gaya tekan dan defleksi yang terjadi pada masing-masing spesimen uji. Didapatkan bahwa spesimen C memiliki gaya tekan tertinggi sebesar 0,83 kN dengan defleksi 4,31 mm. Sedangkan spesimen A memiliki defleksi tertinggi yaitu sebesar 9,11 mm dengan gaya tekan sebesar 0,52 kN.

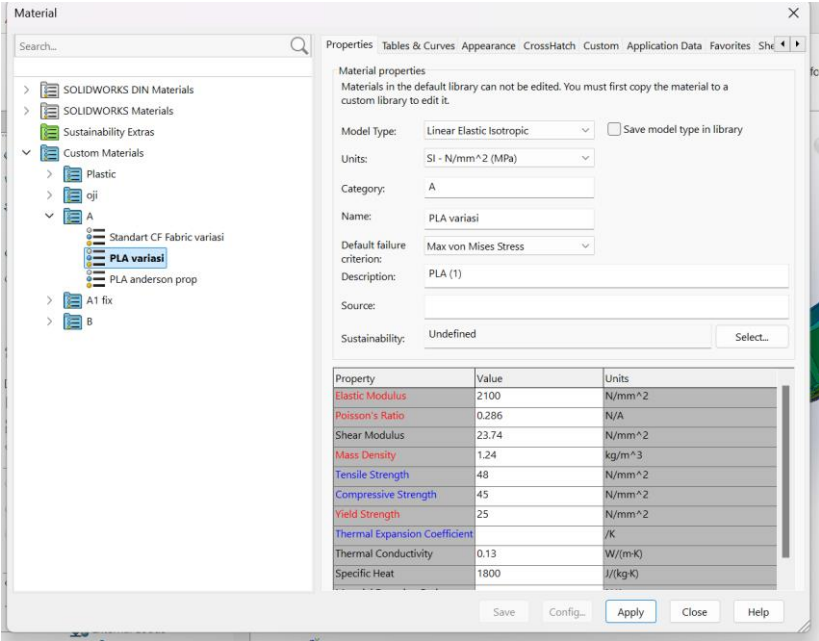
4.5 Finite Element Analysis

Setelah melakukan pengolahan data dari hasil pengujian bending, salah satu metode yang digunakan untuk memvalidasi hasil pengujian *adalah finite element analysis* (FEA) atau *finite element method* (FEM). Metode *finite element analysis* pada penelitian ini menggunakan *software* solidworks 2022. Solidworks adalah perangkat lunak yang digunakan untuk membantu proses desain suatu komponen, sparepart ataupun benda kerja dengan mudah.

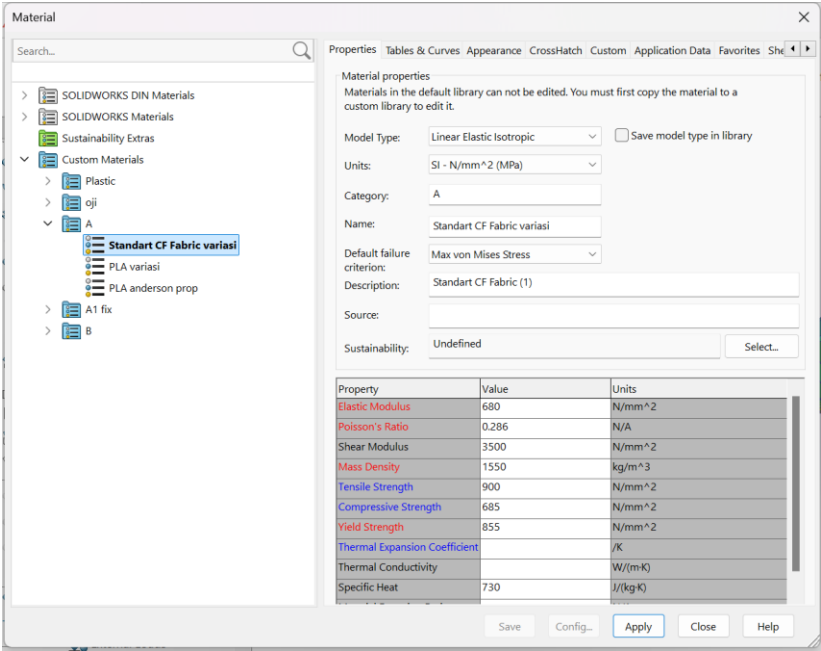
4.5.1 Spesifikasi Material Properti

Pada proses finite element analysis terdapat dua material yang diaplikasikan pada spesimen yaitu *Polyactic Acid* (PLA) dan *Fiber carbon*.

Spesifikasi material properti PLA dan *carbon fiber* yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4-15 dan gambar 4-16.



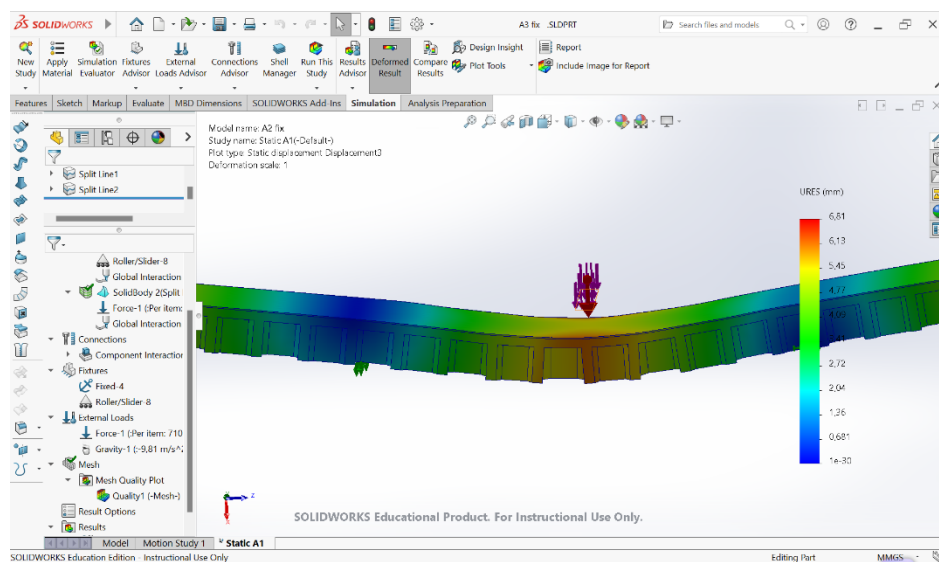
Gambar 4-6 Material properti PLA



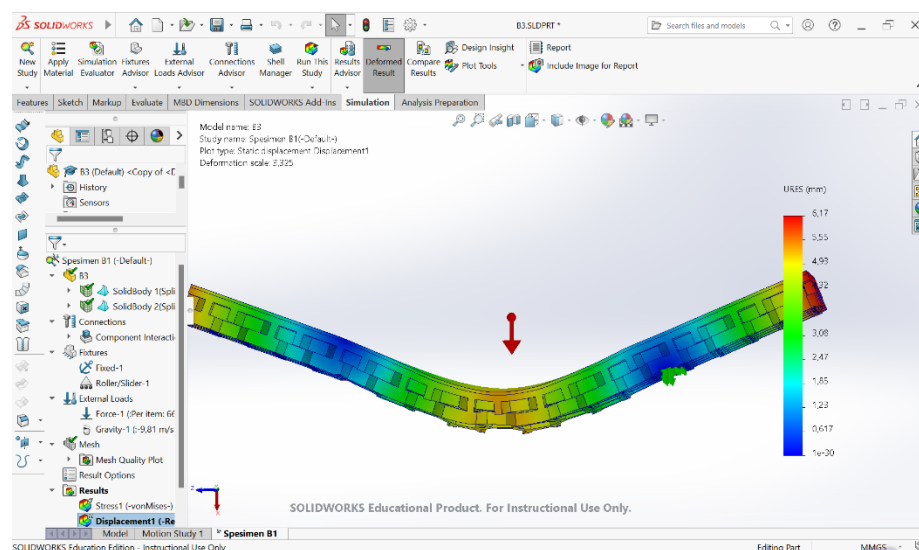
Gambar 4-7 Material Properti *Carbon Fiber*

4.5.2 Hasil Finite Element Analysis

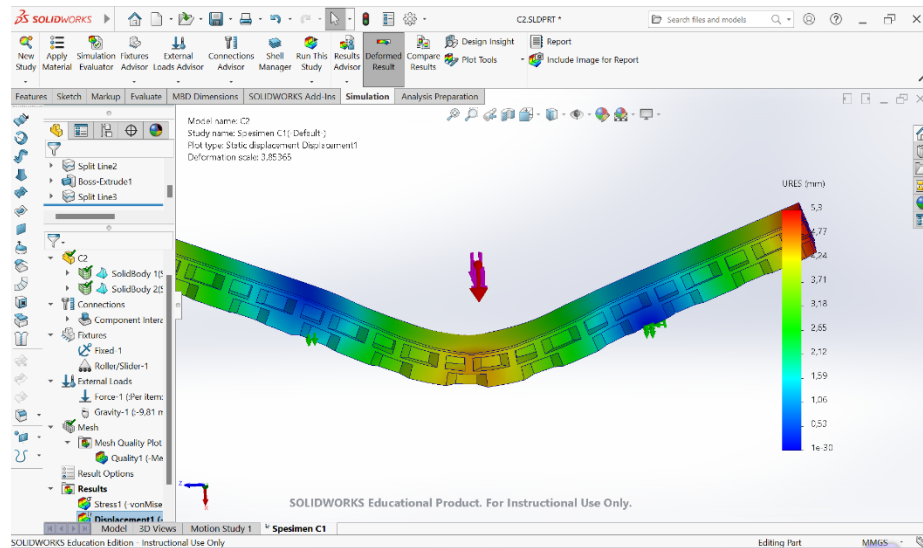
Dari analisis uji bending yang dilakukan pada spesimen uji menggunakan *software* solidworks 2022 seperti terlihat pada gambar 4-8, gambar 4-9 dan gambar 4-10 didapatkan nilai defleksi seperti ditunjukkan pada tabel 4-5. Kemudian nilai defleksi dari hasil analisis uji bending diolah menggunakan persamaan pada bab 2 untuk mendapatkan nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik. Hasil pengolahan data menggunakan persamaan pada bab 2 ditunjukkan pada tabel 4-6.



Gambar 4-8 Analisis *Finite Element*



Gambar 4-9 Analisis *Finite Element*



Gambar 4-10 Analisis *Finite Element*

Tabel 4-5 Data Nilai Defleksi Hasil *Finite element*

Kode Spesimen	Defleksi (mm)	Rata-rata Defleksi (mm)
A1 (2.8)	6,79	6,44
A2 (2.8)	5,74	
A3 (2.8)	6,81	
B1 (2.4.4)	5,31	5,79
B2 (2.4.4)	5,94	
B3 (2.4.4)	6,12	
C1 (1.4.1.4)	4,96	5,07
C2 (1.4.1.4)	5,34	
C3 (1.4.1.4)	4,91	

Dari analisis yang telah dilakukan menggunakan *software* solidworks 2022 didapatkan bahwa nilai defleksi terendah berada pada spesimen C dengan nilai rata-rata sebesar 5,07 mm. Sedangkan untuk spesimen B memiliki nilai rata-rata defleksi sebesar 5,79 mm. Kemudian untuk nilai defleksi tertinggi berada pada spesimen A yaitu 6,44 mm.

Tabel 4-6 Hasil Pengolahan Data

Kode spesimen	Kekakuan <i>Bending</i> ($kN.mm^2$)	Rata-rata Kekakuan <i>Bending</i> ($kN.mm^2$)	Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik ($kN.mm^2/gr$)	Rata-rata Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik ($kN.mm^2/gr$)
A1 (2.8)	1.595,48	1.981,74	25,40	32,06
A2 (2.8)	2.177,70		36,30	
A3 (2.8)	2.172,05		34,48	
B1 (2.4.4)	1.961,70	2.057,17	30,74	32,94
B2 (2.4.4)	1.963,08		32,52	
B3 (2.4.4)	2.246,73		35,55	
C1 (1.4.1.4)	2.772,17	3.050,05	43,45	49,08
C2 (1.4.1.4)	3.238,14		53,97	
C3 (1.4.1.4)	3.139,85		49,84	

Dari nilai defleksi yang didapat dari hasil analisis menggunakan solidworks dan melakukan pengolahan data menggunakan persamaan pada bab 2. Didapatkan bahwa spesimen C memiliki nilai rata-rata kekakuan bending tertinggi yaitu $3.050,05 kN.mm^2$. Kemudian untuk spesimen A memiliki nilai rata-rata kekakuan bending spesifik sebesar $1.981,74 kN.mm^2$. Sedangkan untuk spesimen B memiliki nilai rata-rata kekakuan terendah yaitu sebesar $2.057,17 kN.mm^2$.

Spesimen C memiliki nilai rata-rata kekakuan bending spesifik tertinggi yaitu sebesar $49,08 kN.mm^2/gr$. Kemudian spesimen A memiliki nilai rata-rata kekakuan bending spesifik sebesar $32,06 kN.mm^2/gr$. Sedangkan spesimen B memiliki nilai rata-rata kekakuan bending terendah yaitu sebesar $32,94 kN.mm^2/gr$.

4.5.3 Perbandingan Hasil Pengujian Bending dan *Finite Element*

Tabel 4-7 Perbandingan Nilai kekakuan bending

Kode spesimen	Kekakuan <i>Bending</i> (<i>kN.mm</i> ²)				Persentasi perbandingan (%)
	Pengujian langsung	Rata-rata	Finite Element	Rata-rata	
A1 (2.8)	1.189,16	2.027,63	1.595,48	2.473.34	34,17
A2 (2.8)	2.049,18		2.177,70		6,27
A3 (2.8)	2.844,55		2.172,05		-23,64
B1 (2.4.4)	1.377,86	1.739,46	1.961,70	2.452.907	42,37
B2 (2.4.4)	1.728,39		1.963,08		13,57
B3 (2.4.4)	2.112,13		2.246,73		6,37
C1 (1.4.1.4)	2.096,03	3.421,15	2.772,17	3.631.264	32,25
C2 (1.4.1.4)	4.011,98		3.238,14		-19,22
C3 (1.4.1.4)	4.155,43		3.139,85		-24,43
Rata-rata					7,52

Dari hasil pengolahan data yang dilakukan kemudian dibandingkan antara pengujian langsung dan simulasi pengujian menggunakan *software* solidworks. Didapatkan hasil bahwa spesimen A, spesimen B dan spesimen C memiliki selisih nilai rata-rata sebesar 7,52%. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa selisih nilai kekakuan bending antara pengujian langsung dan simulasi menggunakan *software* solidworks didapatkan bahwa terdapat perbedaan sifat material pada *solidworks* dan spesimen asli.

Tabel 4-8 Perbandingan Nilai Kekakuan Bending Spesifik

Kode spesimen	Kekakuan <i>Bending Spesifik</i> (N.mm ² /gr)				Persentasi perbandingan (%)
	Pengujian langsung	Rata-rata	Finite Element	Rata-rata	
A1 (2.8)	18,93	32,74	38.592	39.948	34,17
A2 (2.8)	34,15		40.770		6,27
A3 (2.8)	45,15		40.481		-23,64
B1 (2.4.4)	21,59	27,87	37.620	39.288	42,37
B2 (2.4.4)	28,61		40.325		13,57
B3 (2.4.4)	33,42		39.920		6,37
C1 (1.4.1.4)	32,85	55,22	54.839	58.401	32,25
C2 (1.4.1.4)	66,86		62.651		-19,22
C3 (1.4.1.4)	65,95		57.714		-24,43
Rata-rata					7,52

Dari hasil pengolahan data yang dilakukan kemudian dibandingkan antara pengujian langsung dan simulasi pengujian menggunakan *software* solidworks. Didapatkan hasil bahwa spesimen A, spesimen B dan spesimen C memiliki selisih nilai rata-rata 7,52%. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa selisih nilai kekakuan bending spesifik antar pengujian aktual dan simulasi menggunakan *software* solidworks memiliki perbedaan sifat material yang mengakibatkan hasil dari kedua pengujian memiliki selisih nilai sebesar 7,25%.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Pada spesimen menggunakan core 3D print dengan parameter *infill* 100% dan penambahan *skin* 2 layer pada 1 permukaan yang rata menghasilkan nilai kekakuan bending yang tinggi pada spesimen yang mengaplikasikan pola berseling (*zig-zag*).
2. Nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik tertinggi terdapat pada spesimen C dengan variasi struktur 1.4.1.4 sebesar $3.421.153 \text{ N.mm}^2$ dan $55.226 \text{ N.mm}^2/\text{gr}$.
3. Berdasarkan perbandingan hasil pengujian bending secara langsung dengan simulasi pengujian menggunakan software sooliworks bahwa terdapat selisih nilai yang besar pada nilai defleksi, nilai kekakuan bending dan nilai kekakuan bending spesifik. Selisih tersebut muncul karena adanya perbedaan sifat material yang bersifat solid pada software solidwoks dengan spesimen uji asli. Kemudian salah satu faktor kesalahan juga bisa terjadi pada saat pengujian langsung.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

1. Perlu mencari spesifikasi material properti yang tepat sebelum melakukan simulasi pengujian bending menggunakan software solidworks.
2. Perlu menggunakan software yang memang diperuntukan untuk melakukan analisis finite element method.

DAFTAR PUSTAKA

- Hidayat, A., Yudo, H., & Manik, P. (2016). Analisa Teknis Komposit Sandwich Berpenguat Serat Daun Nanas Dengan Core Serbuk Gergaji Kayu Sengon Laut Ditinjau dari Kekuatan Tekuk dan Impak. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 4(1), 265–273.
- Jones, R. M. (1998). *Mechanics of Composites Materials.pdf* (p. 554).
- Marsono, M., Anggraeni, N. D., & Faisal, F. A. (2021). Kaji Eksperimental Sifat Mekanik Honeycomb Sandwich Komposit Serat Karbon dengan Uji Bending. *METAL: Jurnal Sistem Mekanik Dan Termal*, 5(2), 114.
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites Manufacturing. Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press.
- Meiwandari, M., & Sriyanti, I. (2019). Analisis Struktur Heksagonal terhadap Bentuk Sarang Lebah. *Jurnal Inovasi Dan Pembelajaran Fisika*, 6(1), 82–89. <https://doi.org/10.36706/jipf.v6i1.7818>
- Mulyadi, S. (2011). Analisa Tegangan-Regangan Produk Tongkat Lansia Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal ROTOR*, 4, 1.
- Nayiroh, N. (2019). Teknologi Material Komposit.
- Nisa, I. J., Mustikawati, T., & Yatnawijaya, B. S. (2014). *Ekplorasi Susunan Bata sebagai Bidang Pembentuk Ruang*. 2(2), 109070.
- Olivianides, F. (2021). Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan Skin Pada Komposit Sandwich Terhadap Uji Bending. In *Universitas Islam Indonesia*. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/37824>
- Petras, A. (1999). *Design of sandwich structures*.
- Prayoga, A., Eryawanto, B., & Hadi, Q. (2018). Pengaruh Ketebalan Skin Terhadap Kekuatan Bending dan Tarik Komposit Sandwich dengan Honeycomb Polypropylene sebagai Core. *Jurnal Teknik Mesin*, 18(1), 23–28.
- Putra, F. A. P. (2024). Analisis *Finite Element* Terhadap Pengaruh Bending Komposit Serat karbon Dan PLA Dengan Struktur *Honeycombs Ribs*
- Rokhman, H. M. (2023). *Pengaruh Penambahan Skin Serat Karbon Dan Infill 100 % Material Honeycomb Ribs 3D Print Pla Terhadap Kekakuan Bending*.

Universitas Islam Indonesia

- Sari, N. (2018). Analisa Pengaruh Sudut Karbon *Twill* Dan *Fiber E-Glass* Dengan *Core Polyurethane* Pada Komposit Sandwich Menggunakan Metode Bagging Vacuum Dan Pengujian *Three Point Bending*. <https://repository.its.ac.id>.
- Syafa'aat, I., Setyawan, P., & Mujiarto, I. (2022). Analisis Pengaruh Bentuk Infill Terhadap Kekuatan Tarik Pada Spesimen ASTM D638-14 Material Polylactic Acid Produk Mesin Cetak 3D. *Jurnal Ilmiah Momentum*, 18(2), 1. <https://doi.org/10.36499/jim.v18i2.6710>

LAMPIRAN



LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN BENDING

No.	Variasi Spesimen	Tebal	Lebar	Pmax	Defleksi	Tegangan
		(mm)	(mm)	(KN)	(mm)	Bending (MPa)
1	A_1	10.90	50.20	0.52	9.11	10.46
2	A_2	10.80	50.58	0.60	6.10	12.20
3	A_3	11.00	50.70	0.71	5.20	13.89
4	B_1	10.90	50.12	0.50	7.56	10.08
5	B_2	10.98	50.60	0.56	6.75	11.02
6	B_3	11.20	50.48	0.66	6.51	12.51
7	C_1	10.85	50.24	0.66	6.56	13.39
8	C_2	11.10	50.32	0.83	4.31	16.06
9	C_3	10.98	50.96	0.74	3.71	14.45

Keterangan:

1. Pengujian dilakukan tanggal 29 Desember 2023
2. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine
3. Standar spesimen menggunakan ASTM C393

Identitas Penguji :

Nama : Asriadi
 NPM : 19525040
 Institusi : Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia

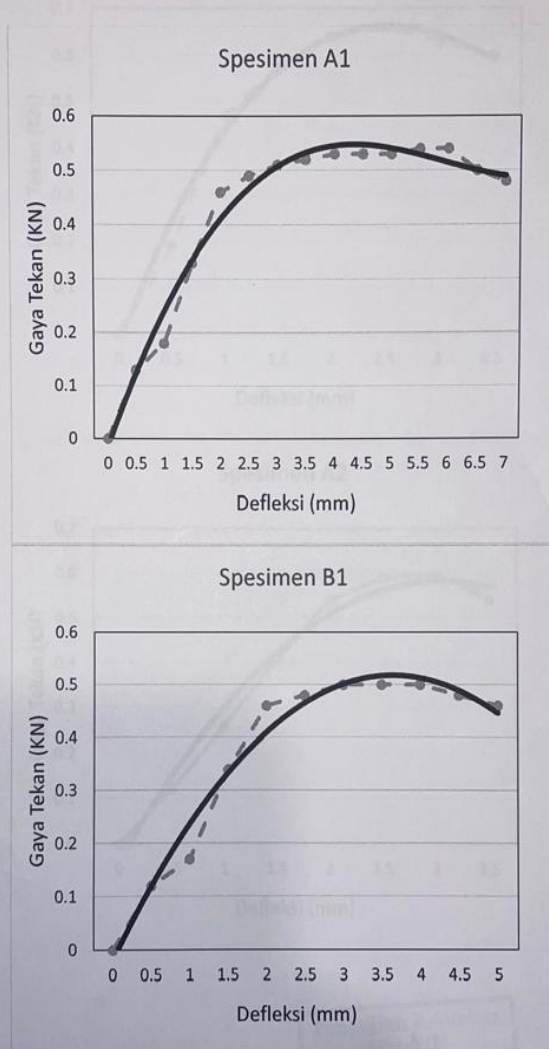
Yogyakarta, 29 Desember 2023
 Staf Laboratorium Bahan Teknik

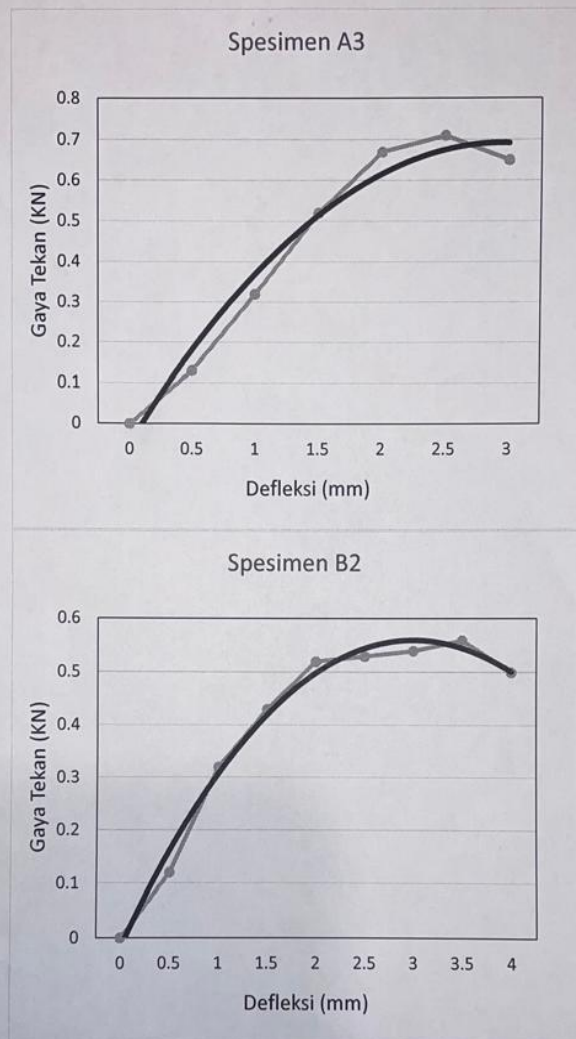


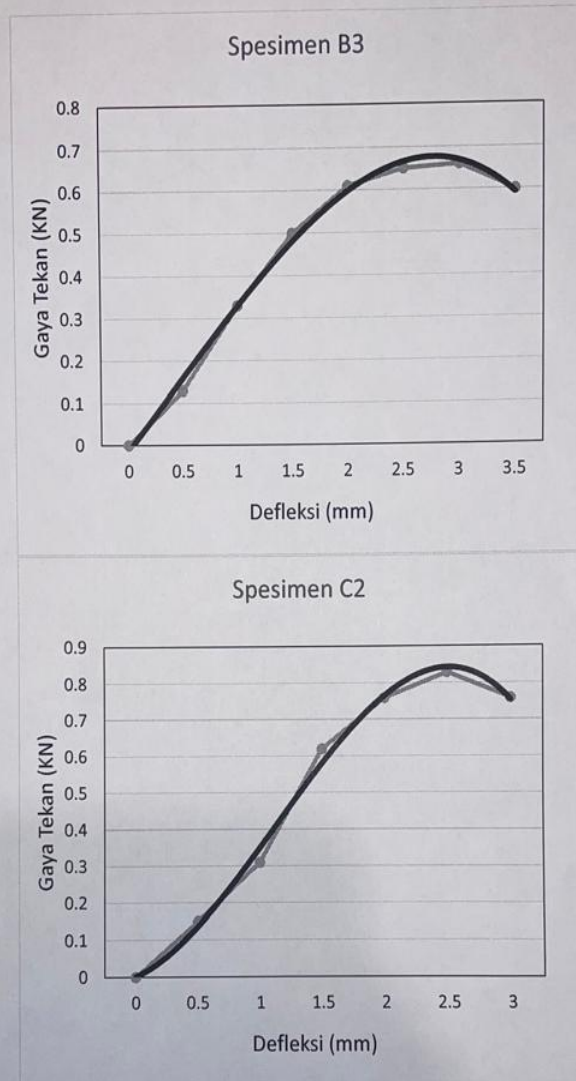
Dr. Lilik Dwi Setyana, S.T., M.T.
 NIP. 197703312002121002

Lembar asli, tidak untuk digandakan

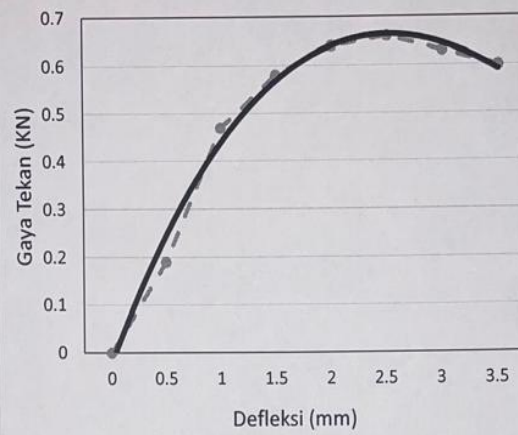
Grafik Uji antara Gaya Tekan vs Defleksi







Spesimen C1



Spesimen A2

