

**OPTIMASI DESAIN *CORE* UNTUK RANGKA PRODUK
KOMPOSIT *SANDWICH* MENGGUNAKAN MATERIAL
CORE ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE (ABS)**

TUGAS AKHIR

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



Disusun Oleh :

Nama : Faris Iza Mahendra

No. Mahasiswa : 18525114

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**OPTIMASI DESAIN *CORE* UNTUK RANGKA PRODUK KOMPOSIT
SANDWICH MENGGUNAKAN MATERIAL
*CORE ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE (ABS)***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Faris Iza Mahendra

No. Mahasiswa : 18525114

Yogyakarta, 15 Desember 2024

Pembimbing 1,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ridwan', with a long horizontal stroke extending to the right.

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

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

OPTIMASI DESAIN *CORE* UNTUK RANGKA PRODUK KOMPOSIT *SANDWICH* MENGGUNAKAN MATERIAL *CORE ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE (ABS)*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Faris Iza Mahendra

No. Mahasiswa : 18525114

Tim Penguji



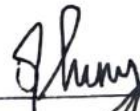
Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP

Ketua

Tanggal : 24/12/2024

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

Anggota I



Tanggal : 24 Desember 2024.

Ir. Arif Budi Wicaksono, S.T., M.Eng., IPP

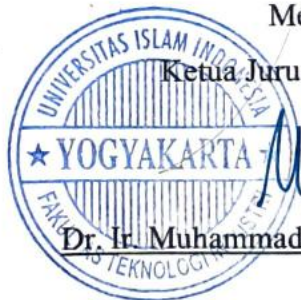
Anggota II



Tanggal : 24/12/2024

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Demi Allah yang maha segalanya, dengan ini saya menyatakan bahwa karya ini adalah hasil kerja saya sendiri, kecuali kutipan dan ringkasan yang telah saya cantumkan sumbernya sebagai referensi. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pengakuan saya tidak benar serta melanggar peraturan yang sah dalam hak kekayaan intelektual maka saya bersedia mengikuti hukuman maupun sanksi apapun sesuai hukum yang diberlakukan Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 9 Desember 2024



Faris Iza Mahendra

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan semesta alam Allah SWT yang telah memberikan nikmat ilmu pengetahuan, kesehatan, kesempatan serta doa dan dukungan yang diberikan orang-orang tercinta sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

Orang tua dan saudara yang senantiasa memberikan doa dan dukungan kepada penulis, sehingga terciptalah dan terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Bapak Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP selaku dosen pembimbing, penguji, dosen pengajar dan seluruh staf program studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang telah membimbing dan membagikan ilmunya kepada penulis secara ikhlas.

Rekan-rekan dari jurusan Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang senantiasa memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.

Besar harapan penulis semoga Tugas Akhir ini dapat berguna serta bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang yang sesuai dengan topik penulis pada masa yang akan mendatang.

HALAMAN MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Tidak penting apa pun agama atau sukumu, kalau kamu bisa melakukan sesuatu yang baik untuk semua orang, orang tidak akan pernah bertanya apa agamamu.”

(Abdurrahman Wahid)

"All the days that you wake up, you gotta win the day. That's the most important thing. You can't worry about the past. You can't worry about the future. You just

gotta win the day."

(Derrick Rose)

"Don't waste your talent"

(Arif Rachman Hakim)

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillah rabbil 'alamin, segala puja dan puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Optimasi Desain *Core* untuk Rangka Produk Komposit *Sandwich* Menggunakan Material *Core Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*” dengan lancar dan tepat waktu. Shalawat serta salam tidak lupa penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa umat manusia dari zaman gelap gulita menjadi zaman terang benderang sehingga manusia dapat merdeka untuk berfikir, berekspresi, dan belajar.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini tentunya penulis banyak mendapatkan doa dan dukungan dari berbagai pihak, sehingga penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak, Ibu, Mba Revi, Mas Arif, Mas Bima dan seluruh sanak keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis, sehingga penulis dapat menjalankan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan cepat.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang selalu memberikan bimbingan dan ilmu yang sangat bermanfaat kepada penulis selama pelaksanaan Tugas Akhir dan selama penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan staf program studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
5. Teman-teman mahasiswa Teknik Mesin UII diantaranya adalah: Egi Badger, Kapibara Abiyyu, Feryantoro Cino Palembang, Ijad Kobra, Baginda Raja Sapli, Rato Maling Besi, Bos BmxpunkOG, Bacil, Ajis

Plankton, Kim, Ulum, Mriki Huang, Mario Ocol Pandemi dan seluruh teman – teman angkatan 2018 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga semua pihak yang telah membantu penulis selama melaksanakan Tugas Akhir dan selama penyusunan Laporan Tugas Akhir ini mendapatkan balasan yang jauh lebih besar dari Allah SWT dan selalu diberikan kesehatan, dan kemudahan dalam segala urusannya.

Penulis menyadari bahwa di dalam penulisan laporan ini masih banyak terdapat kesalahan sehingga jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk mencapai hasil yang lebih baik. Penulis juga berharap agar laporan ini dapat berguna bagi semua yang membacanya dan khususnya bagi penulis sendiri.

Yogyakarta, 9 Desember 2024



(Faris Iza Mahendra)

ABSTRAK

Penggunaan material baja pada struktur rangka produk komposit memiliki kelemahan, seperti bobot yang berat dan kesulitan untuk dibentuk menjadi geometri yang kompleks. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa mekanik material alternatif dengan metode komposit *sandwich* yang memadukan bahan ABS hasil *3D printing* dan pelapisan serat karbon (*skinning carbon*). Penelitian ini berfokus pada pengujian kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik untuk mengidentifikasi potensi dan kendala dalam proses pembuatan spesimen serta performa material yang dihasilkan. Alur penelitian diawali dengan studi literatur dan konseptualisasi desain spesimen menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Dua variasi desain spesimen dibuat dan dicetak menggunakan mesin *3D printing*, dengan total enam spesimen (tiga untuk setiap desain). Setelah proses pencetakan, seluruh spesimen dilapisi dengan serat karbon menggunakan metode kantong vakum. Pengujian *bending* dilakukan pada keenam spesimen untuk memperoleh data defleksi, gaya maksimum (P_{max}), kekakuan *bending* (D), dan kekakuan *bending* spesifik (D/W). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekakuan *bending* spesifik tertinggi sebesar $2.6 \text{ MN.mm}^2/\text{g}$ diperoleh oleh spesimen A_1, namun ditemukan ketidaksempurnaan berupa distribusi resin yang tidak merata, sehingga A_1 diidentifikasi sebagai anomali. Jika spesimen A_1 dieliminasi, desain A menunjukkan performa paling stabil, dengan nilai rerata kekakuan *bending* spesifik sebesar $2 \text{ MN.mm}^2/\text{g}$. Hal ini membuktikan bahwa perpaduan material ABS 3D printing dan *skinning carbon* dapat menghasilkan material yang ringan, kuat, dan fleksibilitas lebih baik. Penelitian ini mengidentifikasi tantangan dalam proses fabrikasi, khususnya dalam pengendalian distribusi resin. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan pengembangan metode fabrikasi yang lebih presisi serta pengujian tambahan untuk mengevaluasi sifat mekanik lainnya.

Kata kunci: kekakuan *bending*, komposit *sandwich*, *skinning carbon*, *ABS 3D printing*

ABSTRACT

The use of steel material in the framework of composite products has certain drawbacks, such as heavy weight and difficulty in forming complex geometries. This study aims to evaluate the mechanical performance of alternative materials using a sandwich composite method, combining ABS material from 3D printing and carbon fiber skinning. The research focuses on bending stiffness and specific bending stiffness tests to identify the potential and challenges in specimen manufacturing processes and the resulting material performance. The research flow began with a literature study and conceptualization of specimen design using SolidWorks software. Two variations of specimen designs were created and printed using a 3D printer, with a total of six specimens (three for each design). After printing, all specimens were coated with carbon fiber using the vacuum bagging method. Bending tests were conducted on the six specimens to obtain data on deflection, maximum force (P_{max}), bending stiffness (D), and specific bending stiffness (D/W). The test results showed that the highest specific bending stiffness of $2.6 \text{ MN}\cdot\text{mm}^2/\text{g}$ was achieved by specimen A_1. However, A_1 was identified as an anomaly due to an imperfection in resin distribution. When A_1 was excluded, Design A demonstrated the most stable performance, with an average specific bending stiffness of $2 \text{ MN}\cdot\text{mm}^2/\text{g}$. These findings demonstrate that combining ABS 3D printing material and carbon fiber skinning can produce lightweight, strong, and more flexible materials. This study highlights challenges in the fabrication process, particularly in controlling resin distribution. For future research, it is recommended to develop more precise fabrication methods and conduct additional tests to evaluate other mechanical properties.

Keywords: bending stiffness, sandwich composite, carbon fiber skinning, ABS 3D printing.

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	ii
Lembar Pengesahan Penguji.....	iii
Pernyataan Keaslian	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto.....	vi
Kata Pengantar.....	vii
Abstrak.....	ix
<i>Abstract</i>	x
Daftar Isi.....	xi
Daftar Tabel.....	xiv
Daftar Gambar	xv
Daftar Notasi.....	xvii
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
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.....	6
2.2.1 <i>H Beam</i>	6
2.2.2 <i>Computer-Aided Design (CAD)</i>	7
2.2.3 <i>Computer Aided-Engineering (CAE)</i>	8
2.2.4 <i>3D Print Fused Deposition Modeling (FDM)</i>	9
2.2.5 <i>Prepreg Carbon Fiber</i>	10
2.2.6 <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene Filament (ABS Filament)</i>	10

2.2.7	Struktur <i>Sandwich Composite</i>	11
2.2.8	<i>Vacuum Bagging</i>	11
2.2.9	<i>Curing</i>	12
2.2.10	<i>Three-Point Bending Test</i>	13
2.2.11	Modulus Kegagalan Komposit <i>Sandwich</i>	14
Bab 3 Metode Penelitian.....		16
3.1	Alur Penelitian	16
3.2	Kriteria Desain.....	17
3.3	Alat dan Bahan.....	18
3.4	Pembuatan Desain.....	20
3.5	Penentuan Desain Inti Yang Dipakai	21
3.5.1	Data Momen Inersia Penampang.....	21
3.5.2	Simulasi Pengujian Bending.....	22
3.5.3	Pencetakan Sampel Inti	25
3.6	Fabrikasi Spesimen Uji.....	26
3.6.1	Pencetakan Desain Terpilih.....	26
3.6.2	Proses Pelapisan Fiber Karbon.....	27
3.6.3	Proses <i>Vacuum Bagging</i>	28
3.6.4	Proses <i>Curing</i> Fiber Karbon.....	28
3.6.5	<i>Finishing</i> Spesimen Uji	29
3.7	Pengujian <i>Bending</i>	29
3.7.1	Persiapan Spesimen Uji.....	30
3.7.2	Pelaksanaan Pengujian	30
Bab 4 Hasil dan Pembahasan.....		32
4.1	Proses Desain.....	32
4.2	Pemilihan Desain Untuk Spesimen.....	37
4.3	Hasil Produk.....	39
4.4	Hasil Pengujian	40
4.5	Analisis dan Pembahasan.....	43
4.5.1	Identifikasi Cacat Spesimen	43
4.5.2	Analisis Data Pengujian <i>Bending</i>	44
4.5.3	Perbandingan dengan Penelitian Sebelum.....	47

Bab 5 Penutup.....	51
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran Untuk Penelitian Selanjutnya.....	51
Daftar Pustaka.....	52
Lampiran.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 3- 1 Alat.....	18
Tabel 3- 2 Bahan.....	19
Tabel 4- 1 Tabel Nilai Momen Inersia Penampang dan Defleksi hasil FEA	38
Tabel 4- 2 Berat Masing-masing Spesimen Sebelum dan Sesudah Proses <i>Skinning</i>	39
Tabel 4- 3 Data Hasil Pengujian Three-point <i>Bending</i>	42
Tabel 4- 4 Data <i>yield</i> Spesimen Uji.....	46
Tabel 4- 5 Data Hasil Perhitungan Kekakuan <i>Bending</i> dan Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik.....	47
Tabel 4- 6 Spesimen Penelitian Komposit <i>Sandwich</i>	48
Tabel 4- 7 Spesimen Penelitian ABS <i>Prepreg</i> _30 mm	48
Tabel 4- 8 Data Rerata Varian Spesimen	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2- 1 Struktur Komposit <i>Sandwich</i>	11
Gambar 2- 2 <i>Multi-stage temperature cycle</i>	13
Gambar 2- 3 <i>Pengujian Three-point bending</i>	13
Gambar 2- 4 Modulus Kegagalan pada Bagian <i>Face/Skin</i>	15
Gambar 2- 5 Modulus Kegagalan pada Bagian <i>Core</i>	15
Gambar 3- 1 Alur Penelitian.....	17
Gambar 3- 2 Proses pengecekan kebutuhan <i>support</i> pada <i>software UltiMaker Cura 5.8.0</i>	20
Gambar 3- 3 <i>Section Properties Solidworks 2022</i>	21
Gambar 3- 4 Penentuan Material.....	22
Gambar 3- 5 Penentuan <i>Fixtures</i>	23
Gambar 3- 6 Penentuan Gaya yang diterapkan	23
Gambar 3- 7 <i>Generate Mesh</i>	24
Gambar 3- 8 Menjalankan <i>Study</i> atau Simulasi.....	24
Gambar 3- 9 Spesifikasi <i>Flashforge Creator Pro</i>	25
Gambar 3- 10 Mesin <i>3D Printer (FDM)</i>	26
Gambar 3- 11 Spesifikasi Detail Produk Esun Filamen ABS	27
Gambar 3- 12 Pelapisan Fiber Karbon pada <i>Core</i>	27
Gambar 3- 13 Persiapan Spesimen untuk proses <i>Vacuum Bagging</i>	28
Gambar 3- 14 Proses <i>Curing</i> Spesimen.....	29
Gambar 3- 15 Proses <i>Finishing</i> Spesimen Uji.....	29
Gambar 3- 16 Alat <i>Universal Testing Machine</i>	30
Gambar 3- 17 Proses Pengujian Spesimen Uji.....	31
Gambar 4- 1 <i>Original Design Scaling</i>	32
Gambar 4- 2 Kebutuhan <i>Support</i> Desain <i>Original</i>	32
Gambar 4- 3 Perubahan Desain.....	33
Gambar 4- 4 Kebutuhan <i>Support</i> Orientasi Rebah Desain Alt.....	33
Gambar 4- 5 Kebutuhan <i>Support</i> Orientasi Berdiri Desain Alt.....	33
Gambar 4- 6 Percobaan Beberapa Desain Bentuk Geometri Berbeda	34
Gambar 4- 7 Kebutuhan <i>Support</i> Orientasi Rebah Variasi Geometri	34

Gambar 4- 8 Kebutuhan <i>Support</i> Orientasi Berdiri Variasi Geometri	34
Gambar 4- 9 Desain Akhir pada <i>Solidworks</i>	35
Gambar 4- 10 Kebutuhan <i>Support</i> Orientasi Rebah Hasil Desain	36
Gambar 4- 11 Kebutuhan <i>Support</i> Orientasi Berdiri Hasil Desain	36
Gambar 4- 12 Desain A.....	36
Gambar 4- 13 Desain B.....	37
Gambar 4- 14 Desain C	37
Gambar 4- 15 Desain D.....	37
Gambar 4- 16 Hasil sampel produk mesin <i>3D print</i>	38
Gambar 4- 17 Hasil Pengujian Spesimen A_1	40
Gambar 4- 18 Hasil Pengujian Spesimen A_2	40
Gambar 4- 19 Hasil Pengujian Spesimen A_3	41
Gambar 4- 20 Hasil Pengujian Spesimen B_1	41
Gambar 4- 21 Hasil Pengujian Spesimen B_2	41
Gambar 4- 22 Hasil Pengujian Spesimen B_3	42
Gambar 4- 23 Kecacatan Spesimen Uji pada Proses <i>Curing</i>	43
Gambar 4- 24 Kecacatan Spesimen A_1 pada Proses <i>Finishing</i>	44
Gambar 4- 25 Grafik P_{max} terhadap defleksi Desain A.....	45
Gambar 4- 26 Grafik P_{max} terhadap defleksi Desain B	45
Gambar 4- 27 Grafik <i>Scatter</i> P_{yield}	46
Gambar 4- 28 Grafik Perbandingan Kekakuan <i>Bending</i>	49
Gambar 4- 29 Grafik Perbandingan Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik.....	50

DAFTAR NOTASI

ABS	= <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
PLA	= <i>Polylactic Acid</i>
PLA+	= <i>Polylactic Acid</i> +
3D	= <i>Three-Dimensional</i>
FDM	= <i>Fused Deposition Modeling</i>
CAD	= <i>Computer Aided Design</i>
CAE	= <i>Computer Aided Engineering</i>
CFD	= <i>Computational Fluid Dynamics</i>
FEA	= <i>Finite Element Analysis</i>
STL	= <i>Standard Triangle Language</i>
P_{max}	= Gaya Maksimum
δ	= Defleksi
P_{yield}	= Beban pada titik <i>yield</i>
δ_{yield}	= Defleksi pada titik <i>yield</i>
I_x	= Momen inersia penampang terhadap sumbu x
I_y	= Momen inersia penampang terhadap sumbu y
D	= Kekakuan <i>bending</i>
$D_{spesifik}$	= Kekakuan <i>bending</i> spesifik
P	= Beban yang diterapkan (<i>load</i>)
L	= Bentang tumpuan
W	= Massa spesimen

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dunia rekayasa material, produk berbahan komposit kerap memerlukan rangka untuk meningkatkan kekakuan (rigiditas) dan kekuatan struktural. Rangka tersebut umumnya dibuat dari material logam seperti besi, yang meskipun kuat, memiliki kelemahan berupa bobot yang berat dan fleksibilitas bentuk yang rendah. Tantangan utama adalah menemukan alternatif material yang dapat memenuhi kebutuhan kekuatan tanpa mengorbankan aspek fleksibilitas aplikasi dan bobot.

Dalam berbagai aplikasi konstruksi, seperti gedung, jembatan, dan proyek pembangunan lainnya, *H Beam* merupakan salah satu komponen struktural (*frame*) yang sangat penting. *H Beam* dikenal karena kemampuannya dalam mendukung berbagai jenis struktur dengan kekuatan yang memadai dengan berat yang relatif ringan. Namun umumnya *H Beam* yang tersedia berbahan baja yang sulit untuk dibentuk menjadi bentuk geometri yang kompleks.

Salah satu solusi yang potensial adalah penggunaan komposit *sandwich*, dimana inti (*core*) struktur dapat memanfaatkan teknologi *3D printing* untuk mencetak geometri yang kompleks dengan fleksibel. Struktur ini kemudian diperkuat dengan lapisan serat karbon (*carbon fiber skin*) untuk meningkatkan kekakuan. Namun, tantangan utamanya adalah merancang desain yang mampu menghasilkan kekakuan bending spesifik yang tinggi, bobot ringan, dan performa mekanik optimal. Pemilihan desain dan orientasi pencetakan 3D menjadi faktor kritis dalam keberhasilan metode ini.

Penelitian sebelumnya menunjukkan beberapa kendala yang perlu diatasi. Pada penelitian pertama, orientasi cetak 3D belum optimal karena desain spesimen memerlukan support tambahan untuk pencetakan dengan berbagai orientasi. Hal ini berdampak pada efisiensi proses dan hasil spesimen. Selain itu, spesimen yang dicetak dengan *infill* 100% memang kuat, tetapi bobotnya menjadi terlalu berat, sehingga kurang ideal untuk aplikasi ringan. (Putra, 2023)

Penelitian kedua, yang merupakan lanjutan dari penelitian pertama, mencoba mengatasi kendala tersebut dengan menggunakan *infill* 20% untuk mengurangi bobot. Material penguat yang digunakan adalah *prepreg carbon fiber*, yang memiliki potensi besar dalam meningkatkan performa komposit. Namun, nilai *infill* dan proses *curing* pada penelitian ini masih belum optimal dikarenakan *infill* yang lebih sedikit mengakibatkan kurangnya dukungan struktural yang diperlukan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan spesimen, lalu temperatur *curing* ideal tidak tercapai, suhu *curing* yang digunakan pada penelitian ini yaitu 70°C. Sehingga spesimen yang dihasilkan mengalami *crushed core* atau kerusakan pada inti akibat tekanan. Hasilnya, meskipun spesimen menjadi lebih ringan, performa mekanik yang diharapkan belum sepenuhnya tercapai. (Pradana, 2024)

Maka dari itu diperlukan penelitian dengan pendekatan baru yang akan dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut, dengan fokus pada optimasi desain, orientasi pencetakan, dan proses fabrikasi yang mencakup pemilihan material filamen dan juga proses *curing*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan diatas, maka dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana proses pembuatan rangka menggunakan bahan ABS dan *prepreg carbon fiber* menggunakan metode *vacuum bagging*.
2. Bagaimana membuat desain rangka yang dapat direalisasikan menggunakan mesin 3D *print* dengan berbagai orientasi tanpa membutuhkan tambahan *support*.
3. Bagaimana pengaruh perbedaan desain terhadap kekakuan spesimen produk komposit *sandwich* dengan metode fabrikasi yang sama.
4. Bagaimana performa spesimen uji pada penelitian ini dibandingkan dengan spesimen uji penelitian sebelumnya.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan diatas, maka disusunlah batasan masalah yang berfungsi sebagai pembatas

dalam penelitian, sehingga tidak menimbulkan permasalahan diluar penelitian yang dilakukan. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Jenis material bahan komposit yang digunakan dalam penelitian ini adalah *carbon fiber twill 2*2 3K 200GSM*.
2. Pembuatan inti (*core*) menggunakan *3D Print FDM* dengan material bahan *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*.
3. Semua proses *3D printing* pada penelitian ini menggunakan spesifikasi material dan mesin yang sama.
4. Desain inti (*core*) memiliki tebal 30 mm.
5. Pelapisan *carbon fiber* ke inti (*core*) menggunakan metode *vacuum bagging*.
6. Desain alternatif berjumlah empat desain yang berbeda.
7. Terdapat dua desain terpilih pada dua spesimen berbeda, diantaranya memiliki nilai numerik momen inersia penampang yang tinggi serta kemampuan cetak 3D (*printability*) yang baik.
8. Parameter *3D printing* diatur *default* kecuali *infill* menggunakan 60%.
9. Pengujian *Three-point bending* dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Departemen Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada.
10. Spesimen uji penelitian ini dibandingkan dengan spesimen uji penelitian sebelumnya.
11. Pembeda difokuskan pada nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun penelitian ini bertujuan sebagai berikut:

1. Mampu membuat rangka dengan bahan ABS dan *Prepreg Carbon Fiber* menggunakan metode *Komposit Sandwich*.
2. Mampu menghasilkan desain rangka yang mampu direalisasikan menggunakan mesin *3D print* dengan berbagai orientasi *printing* tanpa membutuhkan *support* tambahan.
3. Untuk melihat performa produk komposit *sandwich* dari dua desain rangka yang berbeda.

4. Untuk melihat performa spesimen uji penelitian ini dibandingkan dengan spesimen uji penelitian sebelumnya.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Ada beberapa manfaat dari penelitian dan perancangan ini, yaitu :

1. Menggantikan bahan rangka yang ada dengan yang lebih ringan dan kuat.
2. Membuat solusi agar desain rangka dapat dibuat dengan lebih fleksibel dengan mengurangi kebutuhan *support*.
3. Dapat menjadi landasan pengetahuan dalam proses pembelajaran dan mendorong penggunaan metode *3D print* pada struktur komposit *sandwich*.
4. Mengetahui kelebihan dan kekurangan dari masing-masing spesimen uji.

1.6 Sistematika Penulisan

Bab I PENDAHULUAN

Bagian ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab II TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini berisi kajian pustaka dan menjelaskan dasar teori yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian dan metode penelitian yang digunakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini berisi tentang hasil dan pembahasan berdasarkan penelitian dan perancangan yang telah dilakukan.

BAB V PENUTUP

Bagian ini berisi tentang kesimpulan dari pembahasan yang dilakukan serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh (Astuti, 2024) terkait pengaruh parameter *3D printing*, khususnya temperatur *nozzle* dan orientasi posisi objek terhadap kekuatan impak spesimen dengan hasil cetak telah dianalisis secara mendalam. Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi temperatur *nozzle* dan orientasi pencetakan dapat mempengaruhi kekuatan impak dari spesimen yang dicetak menggunakan filamen PLA. Hasil penelitian menunjukkan temperatur *nozzle* dan orientasi posisi objek mempengaruhi kekuatan impak material PLA+. Kekuatan impak terbesar pada arah orientasi horizontal pada temperatur *nozzle* 220°C.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Putra, 2023) dengan judul "Pengaruh Pelapisan Serat Karbon pada Komposit Sandwich Batang Profil H Menggunakan Material Inti Polylactic Acid (PLA) Terhadap Sifat Rigiditas Bending," ditemukan bahwa pelapisan serat karbon pada batang profil H secara signifikan meningkatkan nilai kekakuan bending spesifik. Konstruksi spesimen dalam penelitian ini melibatkan penggunaan material PLA yang dicetak menggunakan teknologi 3D printing dengan infill 100%. Proses pelapisan dilakukan dengan menerapkan serat karbon melalui metode komposit sandwich, yang bertujuan untuk meningkatkan performa mekanik dari spesimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi antara material inti PLA dan pelapisan serat karbon memberikan kontribusi positif terhadap rigiditas bending, menjadikannya pilihan yang menarik untuk aplikasi struktural yang memerlukan kekuatan dan kekakuan tinggi.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Pradana, 2024) dengan judul "Kekuatan Bending Rangka Produk Komposit Menggunakan Material Komposit Sandwich dengan Inti Polimer Produk 3D Printing dan Lapisan Penguat Serat Karbon," ditemukan bahwa nilai kekakuan bending spesifik yang diperoleh sangat rendah, yang dapat diatribusikan kepada penggunaan

parameter infill yang terlalu rendah, yaitu 20%. Konstruksi spesimen dalam penelitian ini menggunakan *prepreg carbon fiber* dan dua jenis filamen, yaitu PLA+ dan ABS. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan infill yang rendah berkontribusi terhadap penurunan kekakuan bending, karena infill yang lebih sedikit mengakibatkan kurangnya dukungan struktural yang diperlukan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan spesimen.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Harper, Miller, & Yap, 1993) yang berjudul "*The Influence of Temperature and Pressure During the Curing of Carbon Fiber Epoxy Resin*", penelitian ini mengeksplorasi bagaimana kondisi *Curing*, khususnya temperatur dan tekanan, mempengaruhi sifat fisik dan mekanik dari resin epoxy yang diperkuat serat karbon. Penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan antara temperatur dan tekanan *Curing* berpengaruh signifikan terhadap densitas, fraksi volume serat, dan kandungan *void* dari laminat yang telah disembuhkan. Untuk material *unidirectional* 914C yang digunakan, ditemukan bahwa ada temperatur *Curing* optimal yang memberikan fraksi volume serat dan densitas komposit maksimum, serta kandungan *void* minimum. Temuan ini memberikan wawasan penting bagi proses pembuatan komposit berbasis *carbon fiber*, terutama dalam konteks pengoptimalan kondisi *Curing* untuk mencapai sifat mekanik yang diinginkan.

2.2 Dasar Teori

Perancangan dan pembuatan dalam penelitian ini memerlukan beberapa teori untuk melandasi rangkaian proses yang dilakukan. Berikut merupakan beberapa teori yang melandasi penelitian ini

2.2.1 H Beam

H-beam, atau yang sering disebut sebagai balok H, adalah salah satu jenis balok struktural yang memiliki penampang berbentuk huruf "H". Desain ini memberikan kekuatan dan stabilitas yang tinggi, sehingga sering digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi, seperti gedung bertingkat, jembatan, dan struktur lainnya. *H-beam* terdiri dari dua *flens* horizontal yang dihubungkan oleh *web*

vertikal, yang memungkinkan distribusi beban yang efisien dan mengurangi kemungkinan terjadinya deformasi.

Salah satu keunggulan dari *H-beam* adalah kemampuannya dalam menahan beban berat dengan bobot yang relatif ringan. Hal ini disebabkan oleh bentuknya yang optimal, yang memungkinkan penggunaan material secara efisien. Selain itu, *H-beam* juga memiliki kekuatan lentur yang baik, sehingga dapat digunakan dalam berbagai kondisi beban. Dalam konteks teknik sipil, *H-beam* sering digunakan dalam struktur rangka baja, di mana kekuatan dan daya tahan adalah faktor penting dalam desain. (Chen & Zhao, 2010)

Penggunaan *H-beam* tidak hanya terbatas pada konstruksi bangunan, tetapi juga meluas ke industri lain seperti otomotif dan *aerospace*, di mana kekuatan dan bobot menjadi pertimbangan utama. Dengan perkembangan teknologi, desain dan pembuatan *H-beam* juga semakin bervariasi, termasuk penggunaan teknologi baru seperti web bergelombang yang dapat meningkatkan kapasitas beban dan efisiensi biaya. (Shi & Liu, 2011)

Secara keseluruhan, *H-beam* merupakan elemen struktural yang sangat penting dalam rekayasa sipil dan industri, berkat kombinasi antara kekuatan, efisiensi material, dan fleksibilitas dalam aplikasi

2.2.2 Computer-Aided Design (CAD)

Desain 3D dengan menggunakan perangkat lunak CAD (*Computer-Aided Design*) adalah proses yang memungkinkan perancang untuk membuat model tiga dimensi dari objek atau sistem dengan bantuan komputer. Dalam konteks ini, CAD menyediakan alat dan fitur yang memungkinkan pengguna untuk menggambar, memodifikasi, dan menganalisis desain secara lebih efisien dan akurat dibandingkan dengan metode tradisional. Desain 3D CAD sangat penting dalam berbagai industri, termasuk teknik, arsitektur, dan manufaktur, karena kemampuannya untuk menghasilkan representasi visual yang mendetail dan memungkinkan simulasi perilaku objek dalam kondisi tertentu. (Pasha, Saleem, & Bilal, 2023)

Salah satu keuntungan utama dari desain 3D CAD adalah kemampuannya untuk memfasilitasi kolaborasi antar tim. Dengan menggunakan model 3D,

berbagai pemangku kepentingan dapat lebih mudah memahami dan memberikan masukan terhadap desain yang diusulkan. Selain itu, CAD juga memungkinkan untuk melakukan analisis dan pengujian virtual, sehingga mengurangi kebutuhan untuk membuat prototipe fisik yang mahal dan memakan waktu. Proses ini tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga mengurangi risiko kesalahan dalam tahap produksi.

Dalam perkembangan teknologi, desain 3D CAD telah menjadi semakin canggih dengan integrasi fitur-fitur seperti pemodelan parametrik, di mana perubahan pada satu bagian model dapat secara otomatis diperbarui di seluruh desain. Hal ini memungkinkan perancang untuk mengeksplorasi berbagai opsi desain dengan cepat dan mudah, serta meningkatkan kreativitas dalam proses desain. Dengan demikian, CAD tidak hanya berfungsi sebagai alat untuk menggambar, tetapi juga sebagai platform untuk inovasi dan pengembangan produk yang lebih baik. (Swennen, Pottel, & Haers, 2020)

2.2.3 Computer Aided-Engineering (CAE)

Computer-Aided Engineering (CAE) adalah suatu pendekatan yang menggunakan perangkat lunak komputer untuk membantu insinyur dalam menganalisis dan merancang produk. Dengan CAE, proses desain menjadi lebih efisien dan efektif, karena insinyur dapat melakukan simulasi dan analisis performa produk sebelum memproduksinya secara fisik. Misalnya, melalui teknik seperti analisis elemen hingga *Finite Element Analysis* (FEA) dan analisis dinamika fluida komputasional *Computational Fluid Dynamics* (CFD), insinyur dapat memprediksi bagaimana produk akan berfungsi dalam berbagai kondisi.

Salah satu keuntungan utama dari CAE adalah kemampuannya untuk mengurangi kebutuhan akan prototipe fisik. Dengan melakukan simulasi, insinyur dapat mengidentifikasi potensi masalah dan melakukan perbaikan pada desain tanpa harus membuat banyak prototipe yang memakan waktu dan biaya. Ini sangat berguna dalam industri yang memerlukan inovasi cepat dan efisiensi biaya, seperti otomotif dan aerospace. Selain itu, CAE juga membantu dalam pengembangan produk yang lebih ramah lingkungan dengan mengoptimalkan desain untuk mengurangi limbah dan penggunaan sumber daya. Dengan demikian, CAE tidak

hanya meningkatkan efisiensi dalam proses desain, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan dan inovasi dalam berbagai bidang rekayasa. (Joshi, 2023)

2.2.4 3D Print Fused Deposition Modeling (FDM)

Fused Deposition Modeling (FDM) adalah salah satu metode pencetakan 3D yang paling umum digunakan, di mana material termoplastik diekstrusi melalui *nozzle* yang dipanaskan untuk membentuk objek tiga dimensi secara bertahap. Proses ini dimulai dengan pemanasan filamen plastik hingga titik leleh, kemudian material tersebut dikeluarkan lapis demi lapis sesuai dengan desain yang telah ditentukan. FDM dikenal karena kemudahan penggunaannya, biaya yang relatif rendah, dan kemampuan untuk mencetak berbagai bentuk geometris yang kompleks.

Kekuatan struktural dari objek yang dihasilkan melalui FDM sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk jenis material yang digunakan, parameter pencetakan seperti kecepatan cetak, ketebalan lapisan, dan suhu *nozzle*. Pada proses pencetakan terkadang dibutuhkan struktur *support* agar menghindari kegagalan cetak. *Support* adalah struktur sementara yang dibuat selama proses pencetakan untuk mendukung bagian-bagian model yang menggantung atau memiliki sudut overhang tertentu. Support diperlukan karena FDM mencetak lapisan demi lapisan dari bawah ke atas, sehingga area yang tidak memiliki dukungan di bawahnya akan gagal dicetak tanpa struktur pendukung ini.

Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material seperti *Polylactic Acid* (PLA) dan *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) memberikan hasil yang berbeda dalam hal kekuatan tarik dan ketahanan terhadap deformasi. Misalnya, PLA sering dipilih karena sifat biodegradabilitasnya, meskipun memiliki kekuatan mekanik yang lebih rendah dibandingkan dengan ABS.

Selain itu, orientasi cetak dan pengaturan parameter pencetakan juga berperan penting dalam menentukan kekuatan akhir produk. Penelitian menunjukkan bahwa mengurangi ketebalan lapisan dan kecepatan cetak dapat meningkatkan kekuatan tarik dari objek yang dicetak. Hal ini disebabkan oleh peningkatan ikatan antar lapisan yang lebih baik, yang berkontribusi pada integritas struktural keseluruhan (Arifin, Zamheri, & Yusuf, 2021).

2.2.5 *Prepreg Carbon Fiber*

Prepreg carbon fiber adalah material komposit yang terdiri dari serat karbon yang telah diresapi sebelumnya dengan sistem resin, biasanya resin termoset seperti *epoxy*. Material ini memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, sehingga sangat menguntungkan untuk digunakan dalam industri seperti otomotif, dan barang olahraga. Proses *prepreg* melibatkan perendaman serat karbon dengan resin sebelum diletakkan dalam cetakan, memungkinkan kontrol yang presisi terhadap rasio serat terhadap resin, sehingga menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik pada produk komposit akhir. (Guimarães, 2019)

Pembuatan komposit serat karbon *prepreg* biasanya melibatkan proses *curing* di mana resin dipadatkan, seringkali menggunakan panas dan tekanan dalam *autoclave*. Proses ini meningkatkan sifat mekanik komposit, termasuk kekuatan tarik, kekakuan, dan ketahanan terhadap degradasi lingkungan. Proses *curing* dari material ini bisa kompleks dan sering memerlukan pemantauan yang cermat untuk memastikan karakteristik kinerja yang optimal. Misalnya, pada salah satu penelitian menunjukkan bahwa kinetika *curing* dapat dipengaruhi oleh faktor seperti suhu dan formulasi resin spesifik yang digunakan dalam *prepreg*. (Zhao & Chen, 2023)

Salah satu keunggulan utama dari penggunaan serat karbon *prepreg* adalah kemampuannya untuk menghasilkan laminasi berkualitas tinggi dan bebas cacat. Lingkungan yang terkendali selama proses *prepregging* meminimalkan risiko adanya void atau ketidakkonsistenan yang sering terjadi pada metode *wet layup* tradisional. Selain itu, penggunaan material *prepreg* dapat mengurangi waktu dan biaya manufaktur karena tidak diperlukan aplikasi resin tambahan selama proses *lay up*.

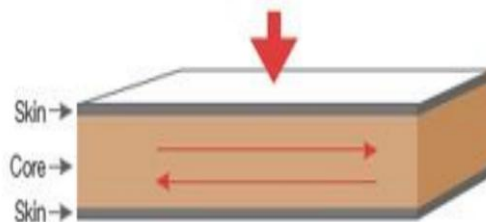
2.2.6 *Acrylonitrile Butadiene Styrene Filament (ABS Filament)*

Plastik ABS adalah jenis plastik yang terbentuk dari beberapa jenis monomer yaitu Acrylonitrile, Butadiene, dan Styrene. Sifat dari material ABS ini stabil ketika terkena panas, tahan bahan kimia, liat, tahan banting, kaku, dan mudah dibentuk. Material ABS memiliki berbagai proses cetak, yaitu cetak injeksi, cetak tiup, ekstrusi, roto molding, thermoforming (Wicaksono, Budiyanoro, & Sosiati, 2019).

ABS cenderung mudah digunakan untuk pencetakan, tetapi cenderung mudah menyusut selama pendinginan, yang sedikit mempengaruhi hasil cetak. Saat menggunakan ABS, bed harus dipanaskan dan direkatkan. Material ini cukup aman untuk manusia tetapi menghasilkan sedikit bau plastik saat ABS dipanaskan.

2.2.7 Struktur *Sandwich Composite*

Struktur *sandwich composite* adalah jenis material komposit yang terdiri dari dua lapisan luar yang kuat dan inti yang ringan di antara keduanya. Sesuai dengan namanya, struktur ini menyerupai *sandwich*, dimana lapisan luar berfungsi sebagai "kulit" dan inti berfungsi sebagai "inti" seperti pada gambar 2- 1. Karakteristik utama dari struktur *sandwich* adalah rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi, yang menjadikannya ideal untuk aplikasi di mana bobot menjadi faktor penting, seperti dalam industri penerbangan dan otomotif. (Banowati, 2023)



Gambar 2- 1 Struktur Komposit *Sandwich*

Proses pembuatan struktur *sandwich composite* melibatkan penggabungan berbagai material untuk memanfaatkan sifat masing-masing komponen. Inti biasanya terbuat dari bahan yang memiliki kekuatan rendah tetapi ketebalan yang lebih tinggi, yang memberikan kekakuan lentur yang tinggi dengan densitas keseluruhan yang rendah. Sebagai contoh, inti dapat terbuat dari busa, *honeycomb*, atau material komposit lainnya. Penggunaan inti yang tepat pada struktur *sandwich* dapat tercapainya kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan material konvensional, serta memberikan isolasi termal dan akustik yang lebih baik. (Prasad & Reddy, 2016)

2.2.8 *Vacuum Bagging*

Vacuum bagging adalah metode yang umum digunakan dalam proses pembuatan komposit, termasuk komposit *sandwich*. Metode ini melibatkan penempatan material komposit, seperti serat karbon dan resin, di dalam cetakan

yang kemudian ditutup dengan kantong vakum. Setelah itu, tekanan negatif diterapkan di dalam kantong vakum untuk mengeluarkan udara dan kelembaban yang terperangkap di antara lapisan-lapisan material. Penggunaan *vacuum bagging* dapat mengurangi kandungan *void* dalam laminat, yang sering terjadi pada metode lain seperti *hand lay-up*. Dengan menghilangkan udara yang terperangkap, proses ini meningkatkan kualitas dan kekuatan struktur komposit yang dihasilkan.

Salah satu keuntungan utama dari *vacuum bagging* adalah kemampuannya untuk menghasilkan laminat yang lebih padat dan berkualitas tinggi. Proses ini memungkinkan resin untuk mengalir dengan baik di antara serat, memastikan impregnasi yang merata. Dengan menggunakan teknik *vacuum bagging*, komposit yang dihasilkan memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan metode lain. Selain itu, teknik ini juga memungkinkan pengontrolan yang lebih baik terhadap rasio serat terhadap resin, yang merupakan faktor penting dalam menentukan kekuatan akhir dari komposit. (Hastuti, Pramono, & Paryono, 2022)

2.2.9 Curing

Curing adalah proses penting dalam produksi komposit berbasis serat karbon, di mana resin dalam (*pre-impregnated fiber*) dikristalisasi melalui pemanasan untuk mencapai sifat mekanik yang diinginkan. Proses ini melibatkan pemanasan pada suhu tertentu untuk jangka waktu tertentu seperti tampak pada gambar grafik 2- 2, sehingga resin dapat mengalir dan mengisi ruang antar serat, kemudian mengeras saat mendingin. *Curing* dapat dilakukan dengan berbagai metode, termasuk pemanasan *oven*, pemanasan dengan *microwave*, atau menggunakan teknik pemanasan lainnya yang sesuai dengan jenis resin yang digunakan (Easy Composites Ltd, n.d). Dalam praktiknya, suhu dan waktu *Curing* sangat tergantung pada spesifikasi resin yang digunakan; misalnya, resin epoksi seringkali memerlukan suhu *Curing* antara 120°C hingga 180°C selama beberapa jam untuk mencapai konversi maksimum resin menjadi matriks yang kuat. Selain itu, pengendalian atmosfer selama proses *Curing* juga penting untuk mencegah kontaminasi dan memastikan kualitas akhir dari komposit. Dengan demikian,

Curing merupakan langkah krusial yang menentukan performa dan daya tahan dari produk akhir berbasis serat karbon.



Gambar 2- 2 *Multi-stage temperature cycle*

2.2.10 *Three-Point Bending Test*

Three-point bending test adalah metode pengujian mekanik yang umum digunakan untuk mengevaluasi kekuatan dan kekakuan material, termasuk material komposit *sandwich*. Dalam pengujian ini, spesimen diletakkan di atas dua penyangga, dan beban diterapkan di tengah spesimen. Metode ini memungkinkan pengukuran respons material terhadap beban lentur, serta analisis perilaku deformasi dan kegagalan. Menurut standar ASTM C393, pengujian ini dirancang untuk menentukan sifat lentur dari struktur *sandwich*, termasuk kekuatan maksimum, defleksi, dan kekakuan.



Gambar 2- 3 *Pengujian Three-point bending*

Pada material komposit *sandwich*, *three-point bending test* digunakan untuk mengevaluasi performa inti dan lapisan luar komposit di bawah beban seperti pada gambar 2- 3. Pengujian ini memberikan informasi penting tentang bagaimana struktur *sandwich* dapat menahan beban dan bagaimana desain inti mempengaruhi sifat mekanik keseluruhan. Sebagai contoh, penelitian oleh (Hastuti, Pramono, & Paryono, 2022) menunjukkan bahwa pengujian tiga titik *bending* pada struktur Komposit *sandwich* dengan inti hibrida menunjukkan peningkatan beban lentur

maksimum hingga 127,7%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengujian tiga titik *bending* adalah alat yang efektif untuk menilai kekuatan dan kekakuan dari material.

Adapun rumus perhitungan tegangan *bending* maksimal, kekakuan *bending*, dan kekakuan *bending* spesifik. Berikut adalah rumus yang dipakai dalam penelitian ini. (Pratama, 2022)

1. Tegangan *bending* maksimal

$$\sigma_{bending} = \frac{1/8 \cdot P \cdot L \cdot T}{I_{sandwich}} \quad (2.1)$$

Kekakuan *bending*

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

2. Kekakuan *bending* spesifik

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

Keterangan :

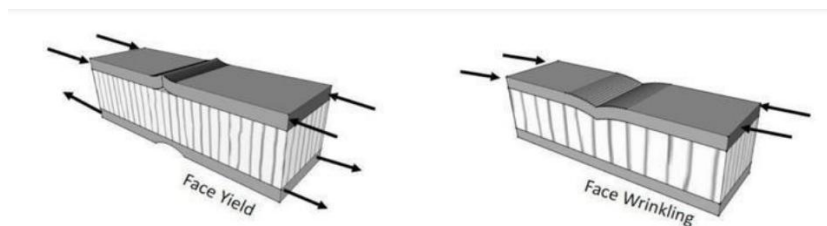
$\sigma_{bending}$	= Tegangan bending maksimal (MPa) / (N/mm ²)
P	= Beban (N)
L	= Bentang tumpuan (mm)
T	= Tebal spesimen (mm)
E	= Modulus Elastisitas (MPa) / (N/mm ²)
$I_{sandwich}$	= Momen inersia penampang sandwich (mm ⁴)
δ	= Defleksi (mm)
D	= Kekakuan bending (N.mm ²)
$D \cdot \text{Spesifik}$	= Kekakuan bending spesifik (N.mm ² /g)
W	= Berat spesimen (g)

2.2.11 Modulus Kegagalan Komposit *Sandwich*

Dalam aplikasinya di bidang rekayasa, komposit *sandwich* sering kali menghadapi berbagai jenis beban mekanik, seperti beban tekan, tarik, lentur, geser,

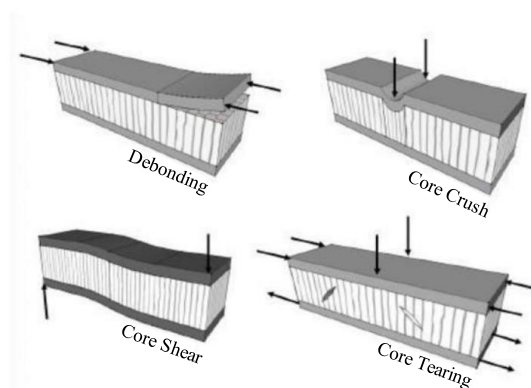
dan puntir. Terkadang, beban yang dialami material ini dapat melebihi kapasitas yang dirancang, sehingga menyebabkan kegagalan pada material tersebut.

Kegagalan pada *skin* komposit *sandwich* yang pertama adalah *face yield*, yang terjadi ketika tegangan normal melampaui tegangan luluh material *skin*. Jika material *skin* bersifat getas, kegagalan *face yield* kemungkinan besar terjadi pada *skin* bagian atas karena lebih rentan terhadap tegangan tekan. Selanjutnya, *face wrinkling* adalah fenomena *buckling* pada *skin* atas yang disebabkan oleh tegangan tekan dan kurangnya dukungan dari *core*, biasanya karena dimensi *core* yang terlalu besar (densitas rendah). Kedua modulus kegagalan tersebut dapat dilihat pada gambar 2- 4.



Gambar 2- 4 Modulus Kegagalan pada Bagian *Face/Skin*

Pada bagian *core*, terdapat empat jenis kegagalan utama. Pada kegagalan debonding, lapisan *skin* terlepas dari *core* spesimen. *Core crush* terjadi ketika bagian tengah spesimen mengalami perubahan bentuk. Kegagalan *core shear* ditandai oleh deformasi spesimen akibat beban yang diberikan. Sedangkan pada *core tearing*, pecahnya atau lepasnya bagian *core* spesimen terjadi akibat gaya gesek pada bagian tengah spesimen. Empat jenis kegagalan tersebut dapat dilihat pada gambar 2- 5 dibawah ini. (Olivianides, 2022)



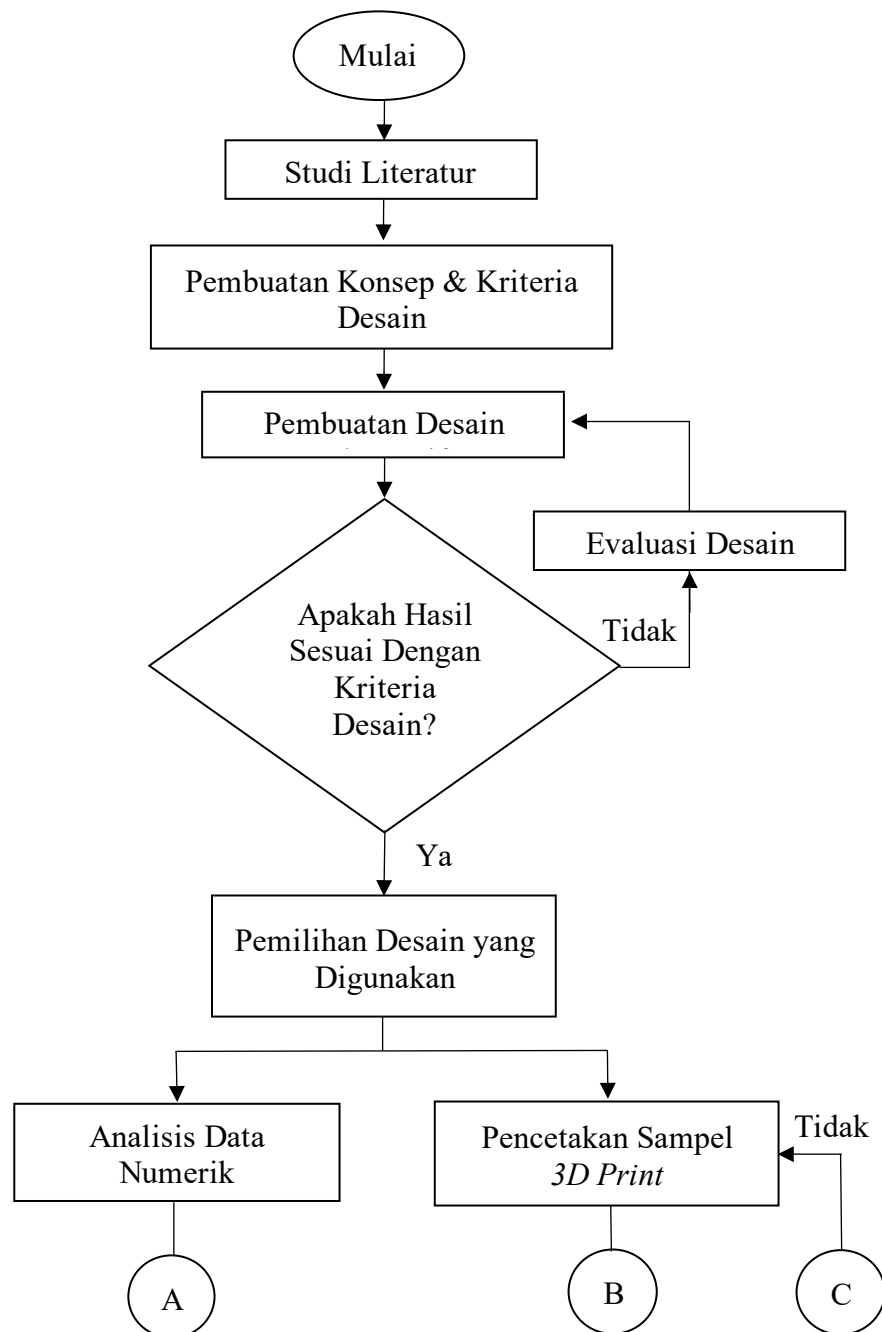
Gambar 2- 5 Modulus Kegagalan pada Bagian *Core*

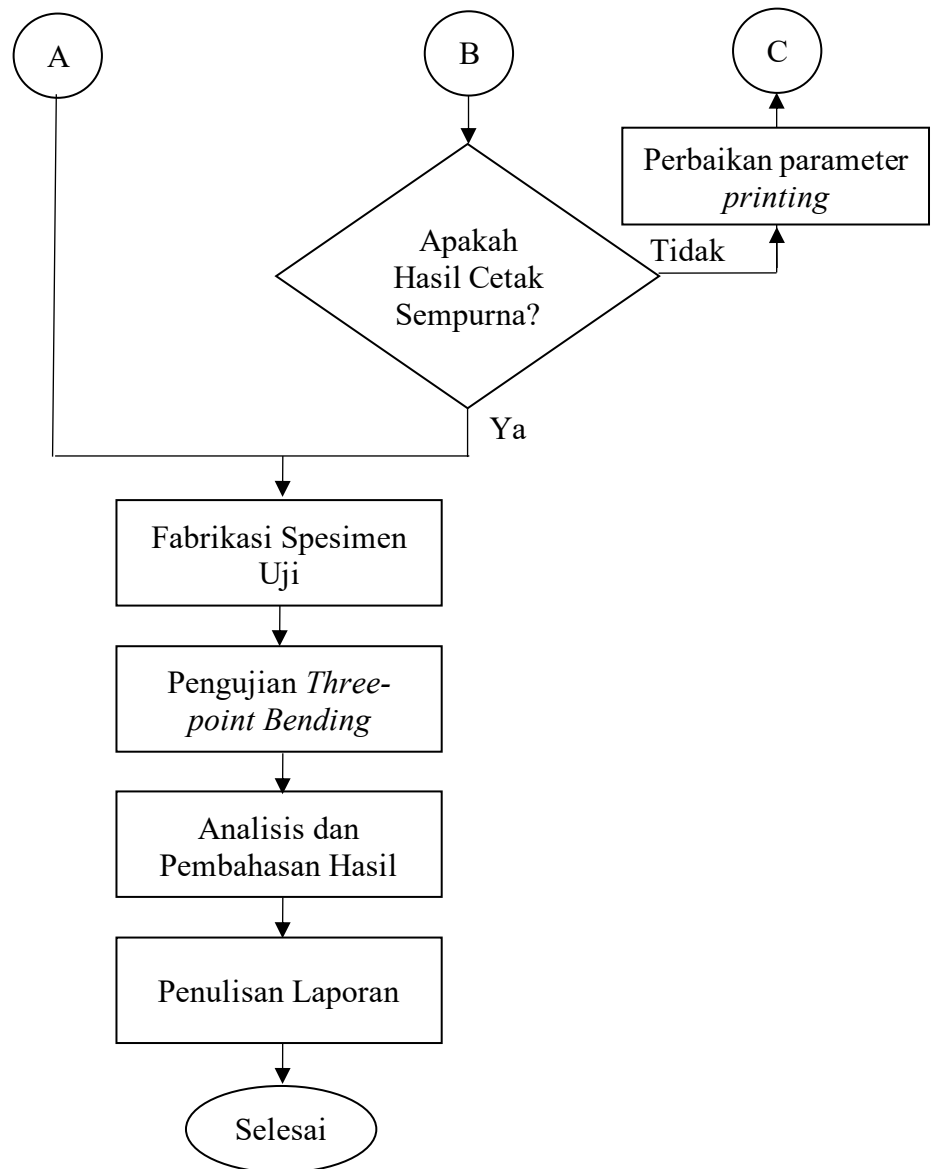
BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur penelitian yang digunakan pada penelitian ini disajikan dalam bentuk flowchart pada gambar 3- 1 dibawah ini :





Gambar 3- 1 Alur Penelitian

3.2 Kriteria Desain

Dalam penelitian ini, memiliki salah satu tujuan utama adalah untuk menghasilkan cetakan 3D yang dapat dicetak tanpa menggunakan dukungan (*support*) dengan mempertimbangkan momen inersia penampang yang kurang lebih sama dengan desain sebelumnya. Oleh karena itu, terdapat beberapa kriteria desain yang harus dipenuhi. Kriteria yang harus diperhatikan adalah sebagai berikut:

1. Hasil dari produk 3D *print* harus mampu dicetak tanpa dukungan (*support*), sehingga memaksimalkan penggunaan material.

2. Pada bagian sudut-sudut dirancang *fillet* agar memudahkan proses *skinning*
3. Dimensi desain harus disesuaikan dengan skala, di mana bagian terpanjang berukuran 30 mm, mengubah desain asli yang berdimensi 50 x 40 mm menjadi 30 x 24 mm.
4. Desain harus memiliki nilai numerik momen inersia penampang kurang lebih menyamai desain dari penelitian sebelumnya.

Dengan memenuhi kriteria-kriteria tersebut, diharapkan hasil cetakan 3D dapat mencapai performa yang diinginkan dan berfungsi sesuai dengan tujuan penelitian.

3.3 Alat dan Bahan

Terdapat beberapa alat dan bahan yang digunakan untuk menunjang pengerjaan penelitian ini. Berikut merupakan Tabel 3- 1 dan Tabel 3- 2 yang berisikan alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini :

Tabel 3- 1 Alat

No.	Alat	Fungsi
1	Laptop	Perangkat utama dalam proses desain dan pembuatan <i>3D printed model</i>
2	<i>SOLIDWORKS 2022</i>	Perangkat lunak untuk membuat desain 3D
3	<i>UltiMaker Cura 5.8.0</i>	Perangkat lunak untuk menyiapkan file desain untuk di cetak <i>3D Printer</i>
4	<i>3D Printer (FDM)</i>	Alat untuk mencetak desain spesimen uji
5	<i>Vacuum Compressor</i>	Menghilangkan udara dari dalam plastik <i>vacuum</i> untuk memastikan tekanan merata.
6	<i>Oven</i>	Untuk proses curing fiber karbon pada spesimen dengan kontrol suhu tertentu.
7	Mesin Uji <i>Bending (Universal Testing Machine)</i>	Untuk melakukan pengujian <i>bending</i> terhadap spesimen
8	Jangka Sorong	Digunakan untuk mengukur dimensi spesimen dengan akurat.

9	Timbangan Digital	Untuk menimbang berat spesimen sebelum dan sesudah pelapisan karbon.
10	Gunting	Digunakan untuk memotong material seperti <i>prepreg</i> karbon atau plastik <i>vacuum</i> .
11	Penggaris	Untuk melakukan pengukuran panjang spesimen atau jarak bentang tumpuan.
12	Kuas	Untuk mengoleskan resin pada proses <i>finishing</i>

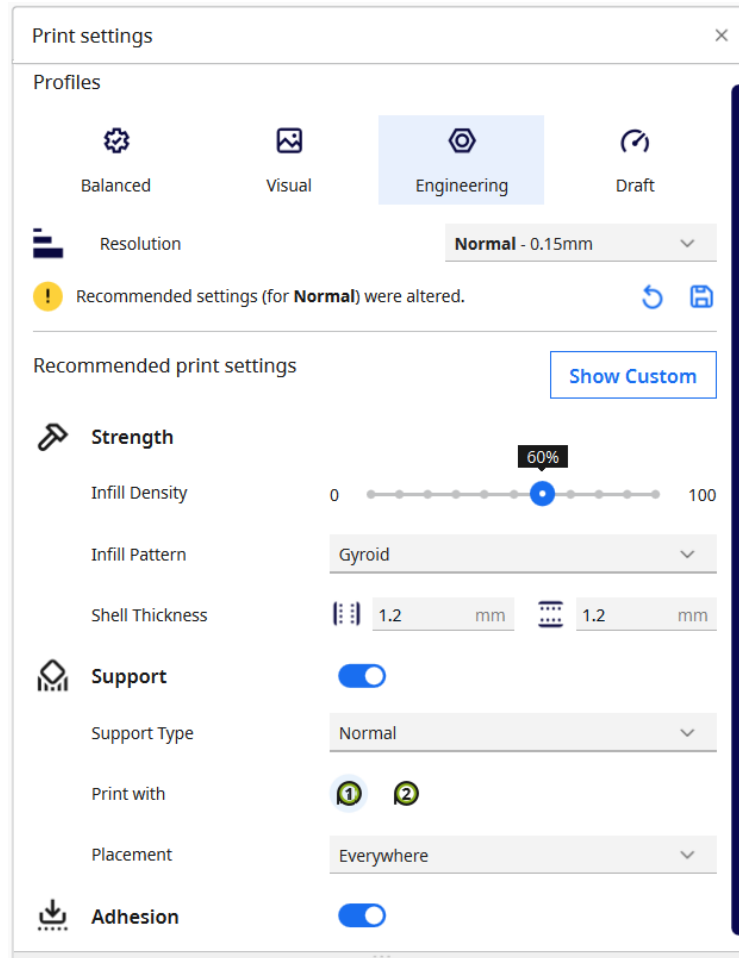
Tabel 3- 2 Bahan

No.	Bahan	Fungsi
1	<i>ABS Filament</i>	Digunakan sebagai material utama untuk mencetak spesimen menggunakan <i>3D printer</i> .
2	<i>Prepreg Carbon Fiber 2*2 Twill 3K 220 GSM</i>	Sebagai bahan pelapis sekaligus penguat utama spesimen.
3	<i>Lem Semprot 3M (Super 77 Spray Adhesive)</i>	Digunakan untuk merekatkan <i>prepreg</i> karbon ke permukaan spesimen.
4	<i>Sealing Tape</i>	Digunakan untuk merekatkan plastik <i>Vacuum Bag</i> agar tidak ada kebocoran
5	<i>Polyester Peel Ply</i>	Digunakan untuk memastikan permukaan lapisan karbon bersih dari resin berlebih setelah proses <i>curing</i> .
6	<i>Kain Breather</i>	Membantu distribusi tekanan merata selama proses <i>vacuum bagging</i> .
7	<i>Plastik Vacuum Bag</i>	Untuk membungkus spesimen saat proses <i>vacuum bagging</i> berlangsung.
8	<i>Resin Epoxy & Hardener</i>	Digunakan untuk <i>finishing</i> lapisan karbon agar tidak ada rongga yang kosong.

Bahan utama dalam penelitian ini yaitu filamen ABS dan juga *prepreg carbon fiber*. Plastik ABS adalah jenis plastik yang terbentuk dari beberapa jenis monomer yaitu *Acrylonitrile*, *Butadiene*, dan *Styrene*. Sifat dari material ABS ini stabil ketika terkena panas, tahan bahan kimia, liat, tahan banting, kaku, dan mudah dibentuk.

3.4 Pembuatan Desain

Tahap pembuatan desain bertujuan untuk menghasilkan model yang sesuai dengan kriteria desain yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, desain dibuat menggunakan *software CAD (Solidworks 2022)*. Kemudian dilanjutkan dengan pengecekan kebutuhan support menggunakan *software UltiMaker Cura 5.8.0*. Dengan pengaturan parameter pada gambar 3- 2.



Gambar 3- 2 Proses pengecekan kebutuhan *support* pada *software UltiMaker Cura 5.8.0*

Proses pada bab ini akan diulang ke tahap pembuatan desain menggunakan *software Solidworks 2022* apabila kebutuhan support masih menjadi kendala.

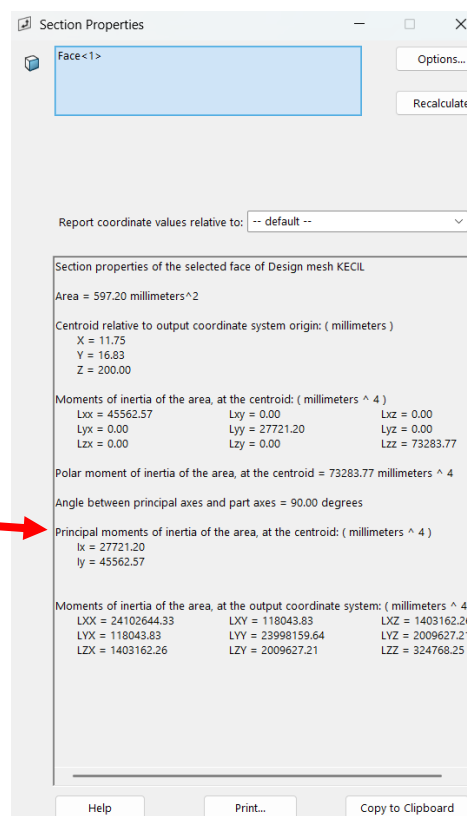
3.5 Penentuan Desain Inti Yang Dipakai

Proses penentuan desain yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan tiga tahap utama, yaitu pencetakan sampel menggunakan teknologi cetak 3D dan pengumpulan data terkait momen inersia penampang. Metode ini bertujuan untuk memastikan bahwa desain yang dipilih memenuhi kriteria fungsionalitas dan efisiensi, baik dari segi kekuatan maupun berat.

3.5.1 Data Momen Inersia Penampang

Data numerik terkait momen inersia penampang didapatkan berdasarkan model CAD yang dirancang menggunakan *SolidWorks*. Momen inersia penampang dipilih sebagai parameter utama dalam pemilihan desain karena parameter ini menentukan seberapa besar kemampuan struktur untuk menahan lenturan. Pada gambar 3- 3 momen inersia penampang didapatkan untuk I_x dan I_y .

Nilai
 I_x dan I_y



Gambar 3- 3 *Section Properties Solidworks 2022*

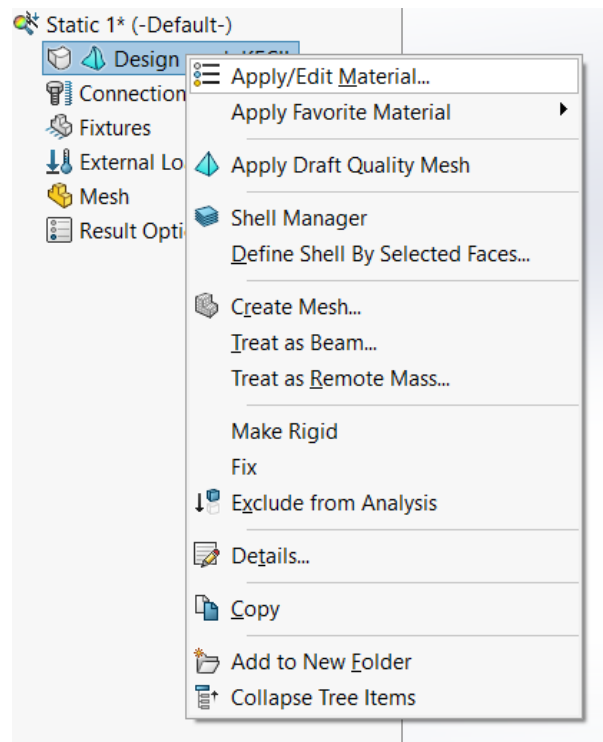
3.5.2 Simulasi Pengujian Bending

Simulasi atau *finite element* dilakukan pada perangkat lunak *Solidworks* 2022 dengan mengikuti standar ASTM C393 guna melihat kemampuan masing-masing desain dalam mempertahankan bentuknya atau kekakuan dari spesimen.

Analisis ini melalui beberapa tahapan diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan Material

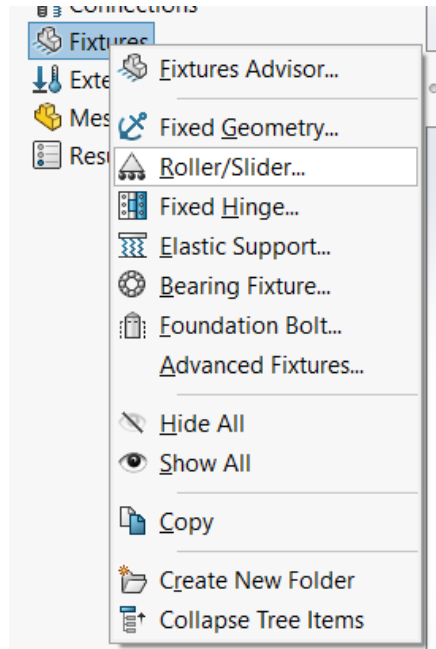
Tahap awal sebelum melakukan analisis adalah memilih material yang akan digunakan dalam kasus ini adalah material ABS.



Gambar 3- 4 Penentuan Material

2. Pemilihan *Fixtures*

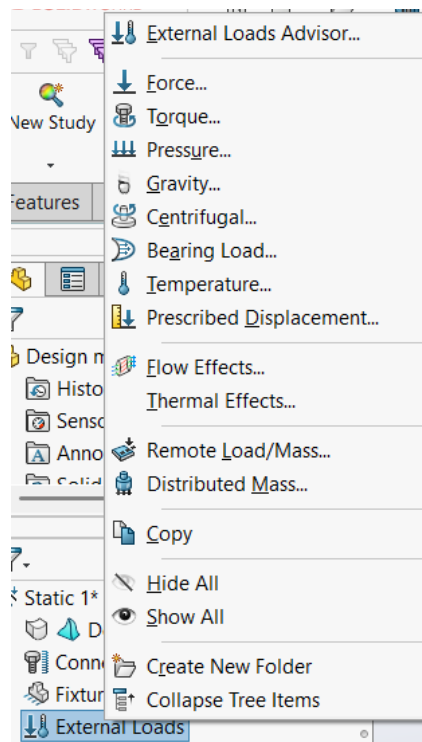
Pada tahapan ini ditentukan *Fixtures* atau bagian yang melawan gaya. *Fixtures* yang digunakan pada penelitian ini adalah *roller/slider*.



Gambar 3- 5 Penentuan *Fixtures*

3. Pemberian Beban (External Load)

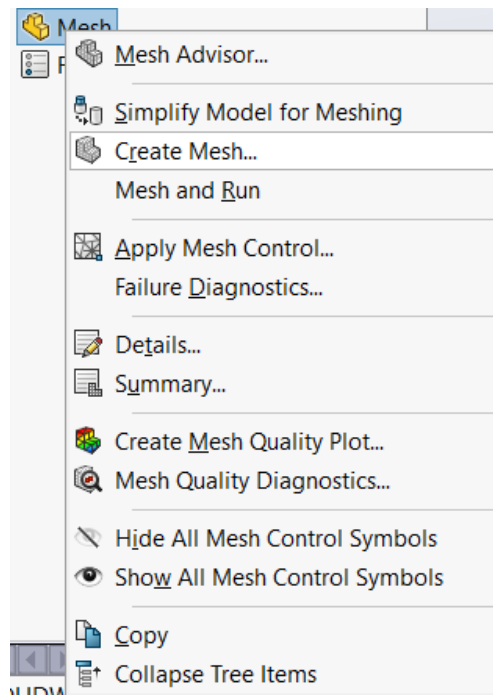
Pada tahap ini dipilih bagian yang dikenai gaya lalu menentukan besar gaya yang telah ditentukan dalam satuan Newton



Gambar 3- 6 Penentuan Gaya yang diterapkan

4. Generating Mesh

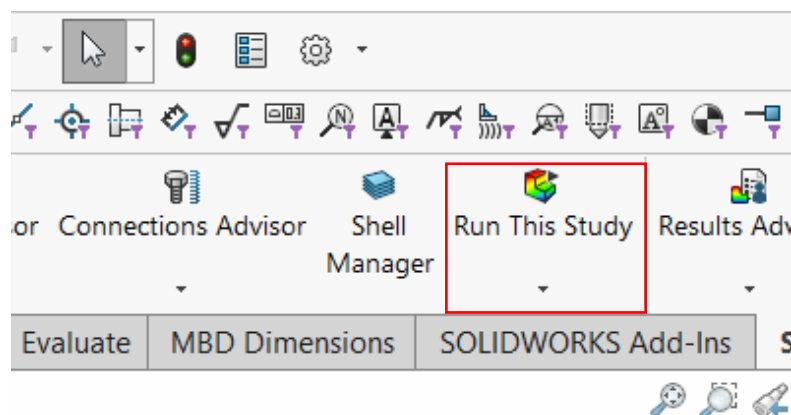
Pada tahap ini dibuatlah mesh untuk desain yang sudah dibuat, semakin kecil ukuran *mesh* maka akan semakin detail tetapi memakan waktu yang lama.



Gambar 3- 7 Generate Mesh

5. Menjalankan Simulasi

Pada tahap ini adalah tahap terakhir dalam analisis tegangan. Hasil yang didapatkan yaitu nilai stress, displacement, strain, dan factor of safety.



Gambar 3- 8 Menjalankan *Study* atau Simulasi

Adapun beberapa persyaratan dari standar pengujian ASTM C393 *Three-point bending test* yang harus dipenuhi oleh spesimen dan juga mesin uji sebagai berikut :

1. Panjang spesimen harus 200 mm atau sepanjang bentang support ditambah 50 mm.
2. Radius dari ujung *loading bar* berbentuk *cylinder* atau *V-Shaped* dengan radius minimum 3 mm.
3. Peletakan spesimen harus pada titik tengah atau panjang support dibagi dua.

3.5.3 Pencetakan Sampel Inti

Tahap ini dimulai dengan proses pencetakan desain menggunakan teknologi cetak 3D berbasis material *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS). Proses pencetakan dilakukan dengan parameter yang telah ditentukan, seperti resolusi cetak, ketebalan lapisan, dan orientasi cetakan. Sampel dicetak untuk memvalidasi kesesuaian desain dalam bentuk fisik, yang mencakup stabilitas dimensi, kehalusan permukaan, dan kemampuan cetakan untuk direalisasikan sesuai dengan konsep desain yang telah dirancang.

Untuk spesifikasi detail mesin yang dipakai yaitu *Flashforge Creator Pro* terdapat pada Gambar 3- 9 berikut.

Specification			
Print Extruder Number: 2 Extruder Diameter: 0.4mm Maximum Set Temperature Of Extruder: 240°C Print Speed: 10-100mm/s Maximum Set Temperature Of Platform: 120°C Support Filament: PLA, TPU 95A, ABS, PETG Print Volume: 227*148*150mm Layer Resolution: 0.1mm-0.4mm Print Resolution: ±0.2mm		Device Device Measure: 526*360*403 (550) mm Screen: LCD screen Net Weight: 14.8kg Gross Weight: 21.5kg Input: 100-240 VAC, 47-63Hz Output: 24V, 13.3A Power: 320w Spool: External	
Software/Communication Data Transmission: SD card Software: FlashPrint Output: X3G files Input: 3MF/STL/OBJ/FPP/BMP/PNG/JPG/JPEG files		Other Camera: no Filter Fan: no Resume Print: no Running Noise: 50dB Working Environment: 18-30°C	

Gambar 3- 9 Spesifikasi *Flashforge Creator Pro*

Apabila hasil cetakan tidak sempurna, maka akan dilakukan perulangan ke tahap pencetakan sampel dengan merubah parameter *printing* sampai dimana desain dapat tercetak dengan sempurna.

Pemilihan desain akhir dilakukan dengan mempertimbangkan hasil evaluasi dari ketiga subbab ini, yaitu kualitas hasil cetakan 3D, data numerik terkait momen inersia penampang, dan besar defleksi maksimal pada masing-masing desain. Desain yang terpilih pada penelitian ini adalah Desain A dan Desain B yang memiliki nilai momen inersia terbesar, serta kemampuan cetak yang lebih baik dan juga nilai defleksi yang paling kecil dibandingkan dengan desain yang lain.

3.6 Fabrikasi Spesimen Uji

Fabrikasi spesimen uji dilakukan untuk merealisasikan desain terpilih ke dalam bentuk fisik yang akan diuji. Tahap ini mencakup proses pencetakan spesimen, pelapisan serat karbon, *vacuum bagging*, *curing*, serta proses tambahan untuk meningkatkan kualitas spesimen seperti *finishing*. Seluruh tahapan dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan spesimen memiliki kualitas yang sesuai dengan standar pengujian.

3.6.1 Pencetakan Desain Terpilih

Desain yang telah dipilih kemudian dicetak menggunakan mesin *3D Printer* (FDM) *Flashforge Creator Pro* seperti pada Gambar 3-10 ini merupakan mesin 3D print dengan tipe FDM (Fused Deposition Material) yang memiliki fitur lengkap seperti dapat mencetak berbagai material, memiliki dua nozzle, bed terbuat dari aluminium yang dapat dipanaskan, dan memiliki panel LCD yang ergonomis yang nyaman.



Gambar 3- 10 Mesin 3D Printer (FDM)

Material yang digunakan pada proses pembuatan dengan mesin 3D print adalah ABS dari merk esun dengan spesifikasi detail pada gambar 3- 11

Tabel Properti Filamen	
FILAMEN PENCETAKAN 3D	ABS
Kepadatan (g/cm ³)	1.04
Suhu Distorsi Panas (°C, 0,45MPa)	78
Indeks Aliran Leleh (g/10mnt)	12(220°C/10kg)
Kekuatan Tarik (MPa)	43
Perpanjangan Saat Putus (%)	22
Kekuatan Lentur (MPa)	66
Modulus Lentur (MPa)	1177
Kekuatan Dampak IZOD (kJ/m ²)	29
Daya tahan	8/10
Kemampuan mencetak	8/10
Parameter pencetakan yang disarankan	
Suhu Ekstruder (°C)	230 – 270°C Suhu yang disarankan: 240°C
Suhu tempat tidur (°C)	95 – 110°C
Kecepatan kipas	0%
Kecepatan Pencetakan	40 – 100 mm/detik
Tempat Tidur Berpemanas	Diperlukan
Permukaan Bangunan yang Direkomendasikan	Pita suhu tinggi, lem padat PVP

Gambar 3- 11 Spesifikasi Detail Produk Esun Filamen ABS

3.6.2 Proses Pelapisan Fiber Karbon

Setelah pencetakan selesai, spesimen dilapisi dengan serat karbon jenis *Prepreg Carbon Fiber 2*2 Twill 3K 220 GSM*. Sebelum pelapisan dilakukan, permukaan spesimen terlebih dahulu dilapisi dengan lem semprot 3M (*Super 77 Spray Adhesive*) untuk memastikan serat karbon dapat menempel dengan sempurna. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan spesimen. Proses pelapisan dapat dilihat dari gambar 3- 12.



Gambar 3- 12 Pelapisan Fiber Karbon pada Core

3.6.3 Proses *Vacuum Bagging*

Tahap selanjutnya adalah *vacuum bagging*, di mana spesimen yang telah dilapisi serat karbon disiapkan seperti pada gambar 3- 13, untuk nantinya dilakukan proses penghisapan udara. Permukaan spesimen dilapisi dengan *Polyester Peel Ply* dan Kain *Breather* untuk mencegah kerusakan atau cacat selama proses. Kemudian, spesimen dibungkus dengan plastik *vacuum*, dan udara di dalamnya dihisap menggunakan *vacuum compressor*. Proses ini memastikan serat karbon menempel dengan rapat dan mengurangi risiko adanya rongga udara.



Gambar 3- 13 Persiapan Spesimen untuk proses *Vacuum Bagging*

3.6.4 Proses *Curing* Fiber Karbon

Proses *curing* dilakukan untuk menguatkan lapisan serat karbon pada spesimen. Spesimen yang telah melalui *vacuum bagging* dimasukkan ke dalam *oven* yang bisa dilihat pada gambar 3- 14, kemudian dipanaskan dalam dua siklus suhu yang telah ditentukan pada gambar 2- 1. Siklus pertama bertujuan untuk mengaktifkan resin, sementara siklus kedua memastikan resin mengeras dengan sempurna. Proses ini sangat penting untuk memastikan serat karbon memiliki sifat mekanik yang optimal.



Gambar 3- 14 Proses *Curing* Spesimen

3.6.5 *Finishing* Spesimen Uji

Tahap terakhir dalam fabrikasi spesimen uji adalah proses *finishing* pada setiap spesimen seperti tampak pada gambar 3- 15, yang dilakukan dengan melapisi spesimen menggunakan resin. Pelapisan ini bertujuan untuk memastikan tidak ada rongga-rongga serat karbon yang kosong atau tidak terisi resin, sehingga meningkatkan kekuatan spesimen serta memastikan permukaan spesimen lebih halus dan homogen. Proses ini dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari kelebihan resin yang dapat mempengaruhi dimensi dan berat spesimen. Setelah resin diaplikasikan, spesimen dibiarkan mengering sempurna sebelum digunakan dalam pengujian.



Gambar 3- 15 Proses *Finishing* Spesimen Uji

3.7 Pengujian *Bending*

Pengujian *bending* menggunakan alat universal testing machine dilakukan untuk mengevaluasi performa mekanik spesimen yang telah dibuat, khususnya dalam menahan beban lentur. Pengujian ini penting untuk mengetahui P_{max} ,

Defleksi, dan Tegangan *bending*, yang merupakan parameter utama dalam analisis sifat mekanis material komposit yang digunakan. Berikut adalah tampak visual alat pengujian ada pada gambar 3- 16.



Gambar 3- 16 Alat *Universal Testing Machine*

3.7.1 Persiapan Spesimen Uji

Sebelum dilakukan pengujian *bending*, spesimen disiapkan dengan standar dimensi tertentu sesuai metode pengujian. Permukaan spesimen diperiksa untuk memastikan bahwa tidak ada cacat seperti retakan, gelembung udara, atau lapisan karbon yang terlepas, karena hal ini dapat mempengaruhi hasil pengujian.

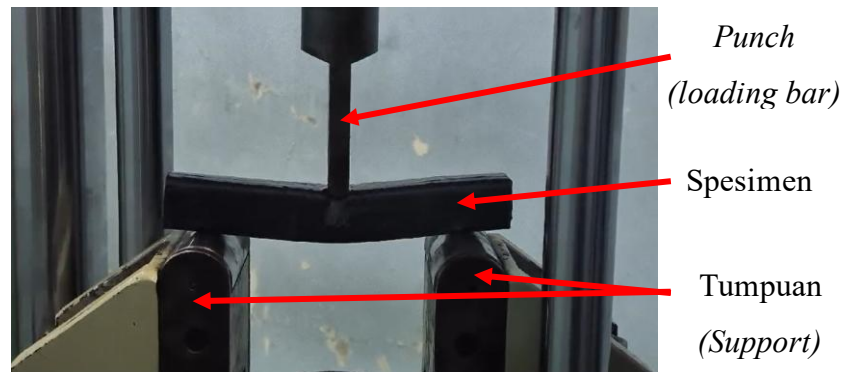
Adapun langkah-langkah pada ada pengujian *three point bending* yaitu:

1. Pastikan spesimen yang sudah dirapikan dan sesuai dengan standar ASTM C393 dikumpulkan menurut variasi nya masing-masing.
2. Letakkan spesimen uji yang sudah dibuat pada alat uji *bending* dengan jarak antar titik tumpuan 150 mm dengan panjang spesimen 200 mm.
3. Mesin uji *bending* akan memberikan beban maksimal secara perlahan hingga spesimen patah.

3.7.2 Pelaksanaan Pengujian

Pengujian *bending* dilakukan menggunakan metode *Three-point bending*, sesuai standar ASTM C393. Spesimen ditempatkan di atas dua tumpuan dengan jarak bentang tertentu yang tampak pada gambar 3- 17, kemudian beban diaplikasikan di titik tengah secara perlahan hingga spesimen mencapai titik patah

atau deformasi maksimal. Data yang direkam meliputi beban yang diterapkan dan defleksi yang terjadi pada spesimen.



Gambar 3- 17 Proses Pengujian Spesimen Uji

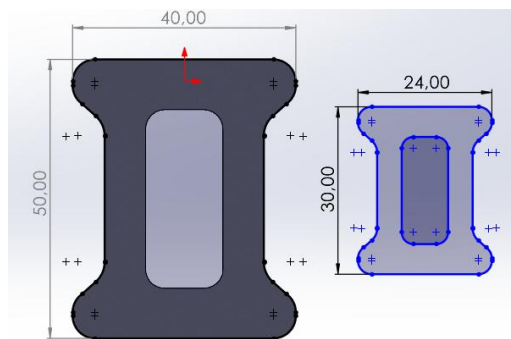
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Desain

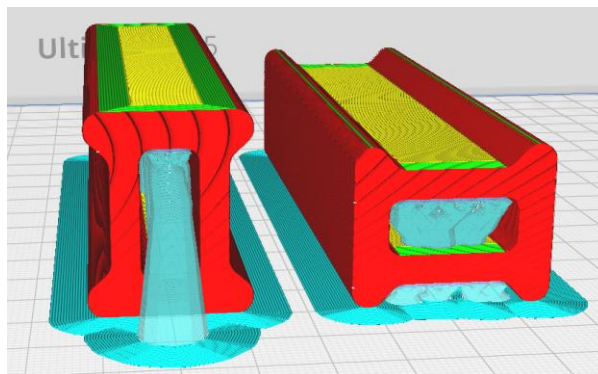
Proses pembuatan alternatif desain dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* 2022. Beberapa variasi desain dirancang untuk memberikan pilihan dalam mencapai desain terbaik yang memenuhi kriteria teknis, seperti momen inersia penampang yang tinggi dan kemudahan pencetakan. Proses pengecekan kebutuhan *support* dilakukan menggunakan aplikasi *Ultimaker Cura*.

Pada proses paling awal dilakukan *scaling* pada aplikasi *Solidworks* seperti pada gambar 4- 1, proses dilakukan terhadap desain yang didapatkan dari penelitian sebelumnya.



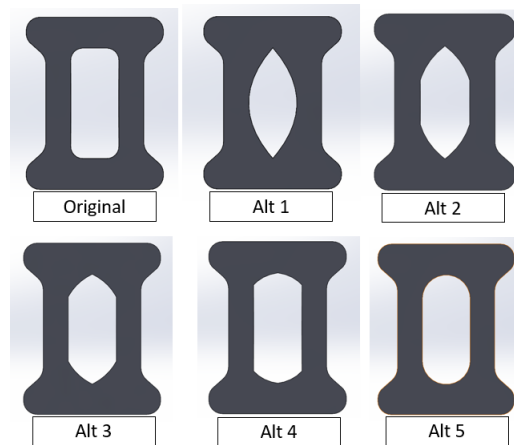
Gambar 4- 1 *Original Design Scaling*

Selanjutnya dilakukan pengecekan kebutuhan *support* di aplikasi *Ultimaker Cura* pada desain *original* yang sudah dilakukan *scaling* dan diekspor menjadi file STL dengan berbagai orientasi *printing* atau sesuai dengan kriteria desain.

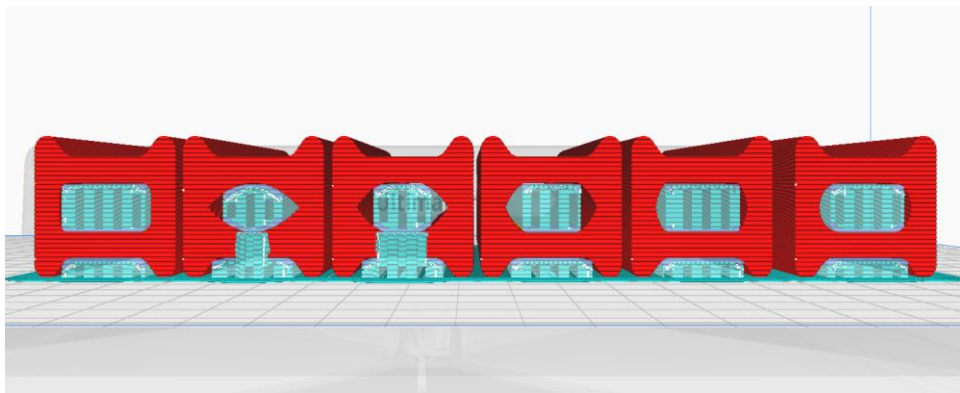


Gambar 4- 2 Kebutuhan *Support* Desain *Original*

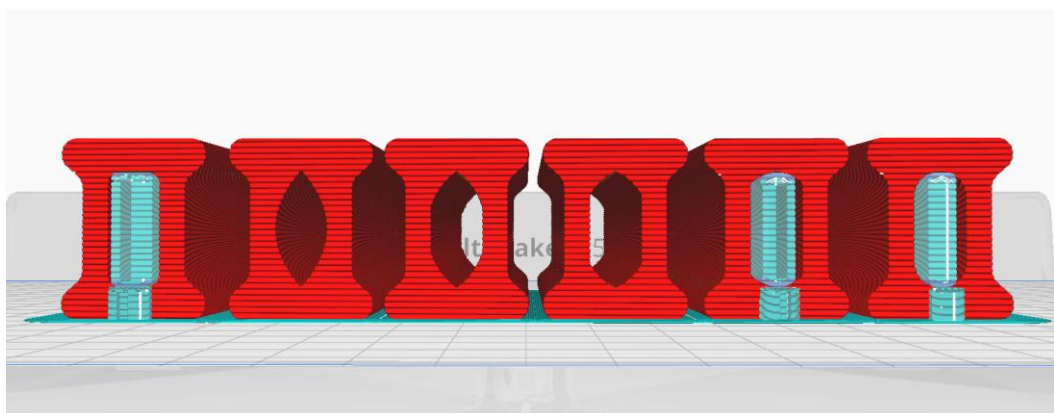
Setelah diketahui titik atau bagian mana saja pada desain yang membutuhkan *support* tambahan seperti yang terlihat pada gambar 4- 2, dilakukan perubahan pada desain agar dapat mencapai hasil yang diinginkan.



Gambar 4- 3 Perubahan Desain



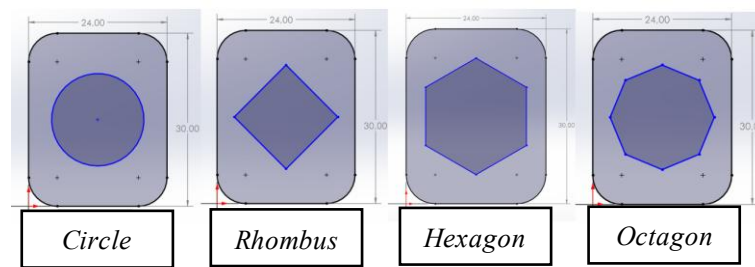
Gambar 4- 4 Kebutuhan Support Orientasi Rebah Desain Alt



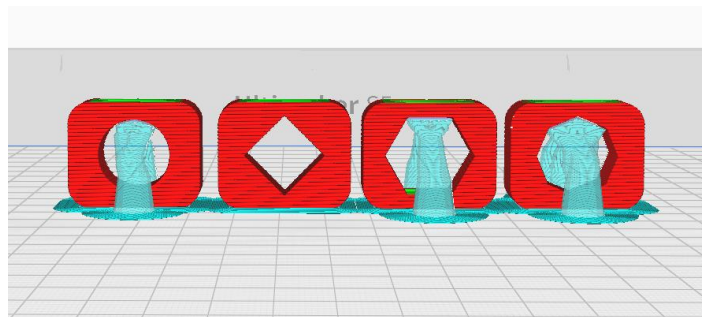
Gambar 4- 5 Kebutuhan *Support* Orientasi Berdiri Desain Alt

Dari percobaan beberapa alternatif desain yang ditampilkan pada gambar 4- 3 yang sudah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa faktor utama kebutuhan

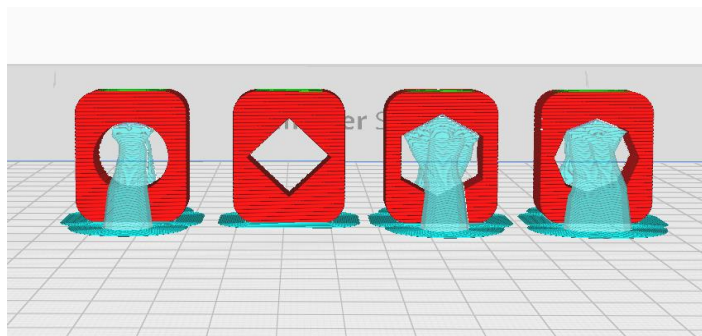
support pada desain yaitu *overhang* yang ada pada bentuk desain, bisa dilihat dari gambar 4- 4 untuk orientasi rebah dan juga gambar 4- 5 untuk orientasi berdiri. Berdasarkan fakta tersebut, dilakukan pendekatan berbeda untuk merubah desain, dengan mencari bentuk geometri yang paling cocok agar tidak terjadi *overhang*, ada empat bentuk geometri yang dilakukan percobaan atas kebutuhan *support* terdapat pada gambar 4- 6.



Gambar 4- 6 Percobaan Beberapa Desain Bentuk Geometri Berbeda



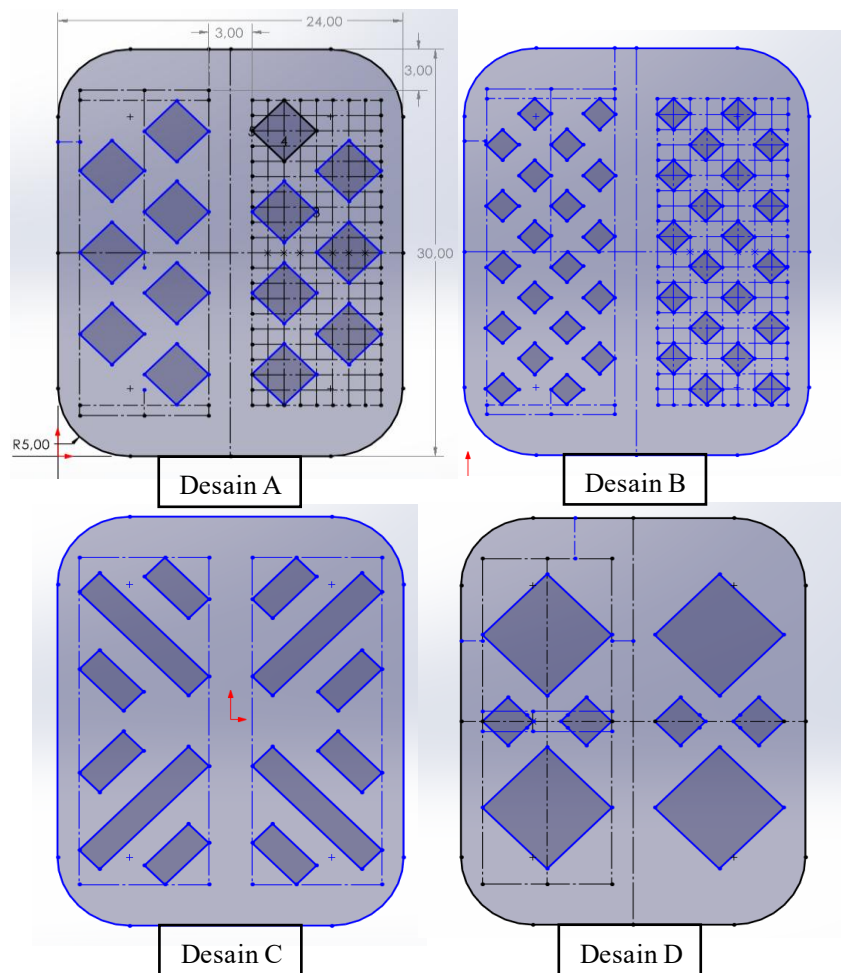
Gambar 4- 7 Kebutuhan Support Orientasi Rebah Variasi Geometri



Gambar 4- 8 Kebutuhan *Support* Orientasi Berdiri Variasi Geometri

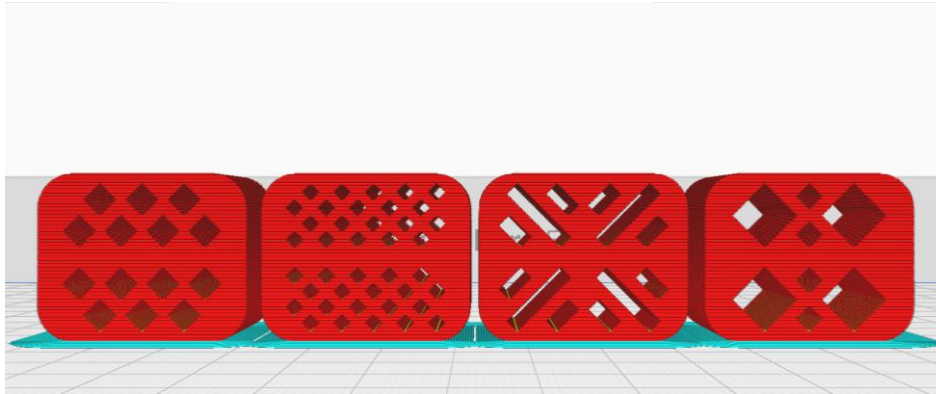
Dari proses sebelumnya dan dari pengecekan kebutuhan support yang terdapat pada gambar 4- 7 dan gambar 4- 8, dapat disimpulkan bahwa bentuk belah ketupat adalah bentuk yang dapat mengatasi masalah *overhang* pada desain

sehingga bentuk belah ketupat akan menjadi tumpuan atau *pivot point* dari alternatif desain yang akan dibuat selanjutnya.

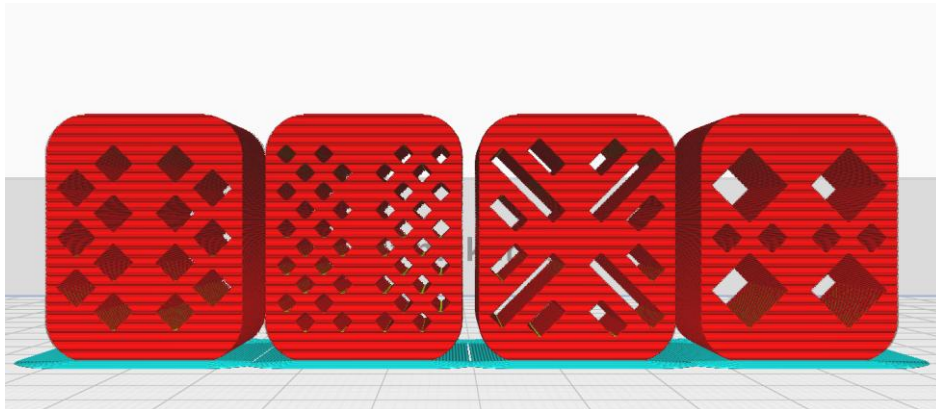


Gambar 4- 9 Desain Akhir pada *Solidworks*

Dari empat desain yang telah dibuat yang bisa dilihat pada gambar 4- 9, selanjutnya akan dilakukan pengecekan kembali untuk kebutuhan *support* pada desain di aplikasi *Ultimaker Cura* untuk orientasi rebah dan berdiri seperti pada gambar 4- 10 dan 4- 11.

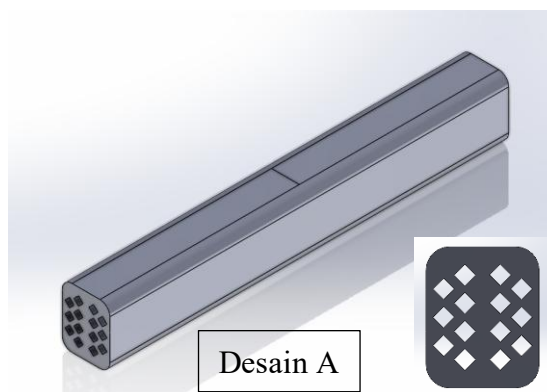


Gambar 4- 10 Kebutuhan *Support* Orientasi Rebah Hasil Desain

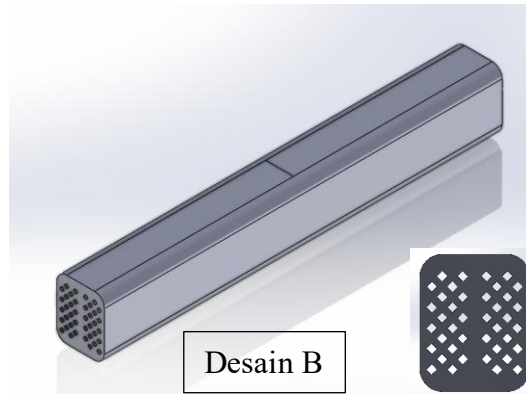


Gambar 4- 11 Kebutuhan *Support* Orientasi Berdiri Hasil Desain

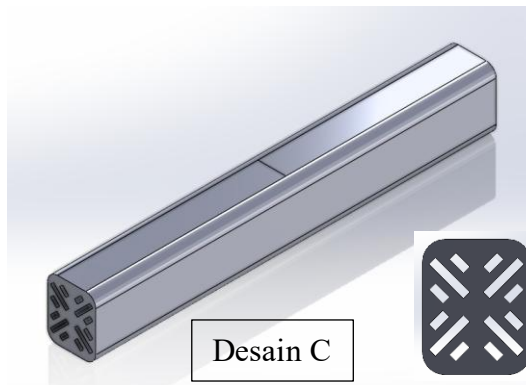
Pada tahap ini, proses perancangan desain menghasilkan empat alternatif desain yang dibuat berdasarkan kriteria desain yang telah ditentukan. Keempat desain ini telah melalui proses evaluasi pengecekan kebutuhan *support* yang menjadi dasar utama. hasil dari proses desain yang telah dilakukan ditampilkan secara visual bisa dilihat pada gambar 4- 12, 4- 13, 4- 14, dan 4- 15.



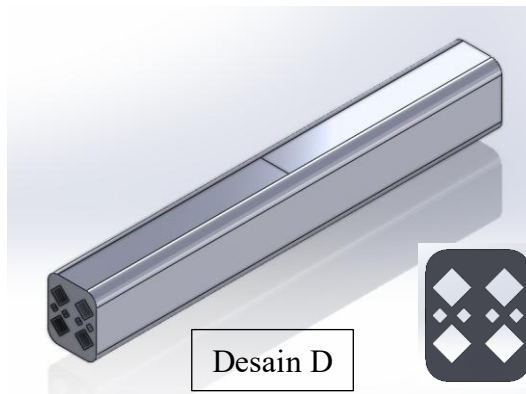
Gambar 4- 12 Desain A



Gambar 4- 13 Desain B



Gambar 4- 14 Desain C



Gambar 4- 15 Desain D

4.2 Pemilihan Desain Untuk Spesimen

Dari Keempat desain yang sudah dibuat, dipilih untuk dilakukan proses fabrikasi spesimen. Desain terpilih berjumlah dua desain berbeda.

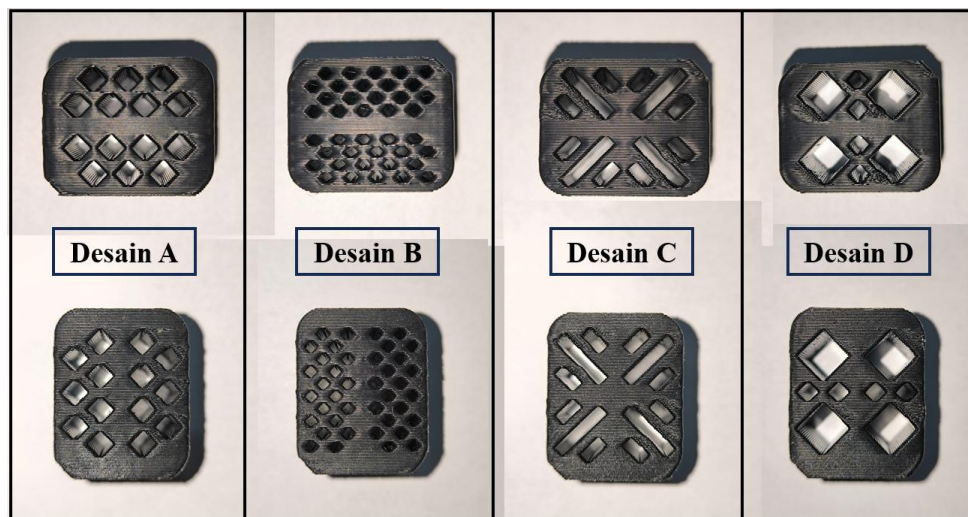
Data numerik yang digunakan untuk menentukan desain yang dipakai didapatkan dari *software Solidworks 2022* yaitu nilai momen inersia penampang yang didapatkan dari *section properties* dan juga *finite element* yaitu nilai defleksi

maksimal yang terjadi ketika diasumsikan untuk pemberian beban sebesar 100 N dengan konfigurasi *Three-point bending test*. Data yang didapatkan dari proses tersebut dapat dilihat pada tabel 4- 1.

Tabel 4- 1 Tabel Nilai Momen Inersia Penampang dan Defleksi hasil FEA

No.	Desain	I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	Defleksi (mm)
1	Desain Original	18.676,78	44.164,72	0,0657
2	Desain A	26.605,86	44.640,07	0,0567
3	Desain B	27.721,20	45.562,57	0,0516
4	Desain C	25.576,11	42.262,92	0,0642
5	Desain D	24.514,73	42.701,14	0,0611

Proses selanjutnya adalah pembuatan sampel dari masing-masing desain untuk mengevaluasi kemampuan desain untuk diproduksi menggunakan mesin *3D print*.



Gambar 4- 16 Hasil sampel produk mesin *3D print*

Setelah proses pencetakan selesai hasil cetak dapat dilihat pada gambar 4- 16 hasil cetakan dievaluasi secara visual dan dimensional untuk memastikan tidak terdapat cacat atau deformasi yang signifikan.

Berdasarkan data dan proses yang sudah dilakukan desain rangka yang dipilih adalah desain A dan desain B. karena memiliki nilai momen inersia penampang yang paling tinggi, dan defleksi yang lebih rendah dari desain yang

lainnya. Sedangkan untuk kemampuan cetak untuk masing-masing desain sudah dapat mencapai kriteria.

4.3 Hasil Produk

Hasil desain yang terpilih kemudian diwujudkan dalam bentuk produk fisik berupa spesimen uji. Total enam spesimen telah diproduksi, yang terdiri dari tiga spesimen untuk masing-masing desain. Proses fabrikasi dilakukan dengan metode *3D printing*, dilanjutkan dengan pelapisan fiber karbon menggunakan *vacuum bagging* dan *curing*. Adapun data berat dari masing-masing spesimen yang sudah diproduksi, dapat dilihat pada tabel 4- 2 sebagai berikut.

Tabel 4- 2 Berat Masing-masing Spesimen Sebelum dan Sesudah Proses *Skinning*

No.	Variasi Spesimen	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)
1	A_1	94,5	107,3
2	A_2	93,6	105,6
3	A_3	96,3	109,6
4	B_1	105,4	116,5
5	B_2	105,0	120,1
6	B_3	107,1	121,2

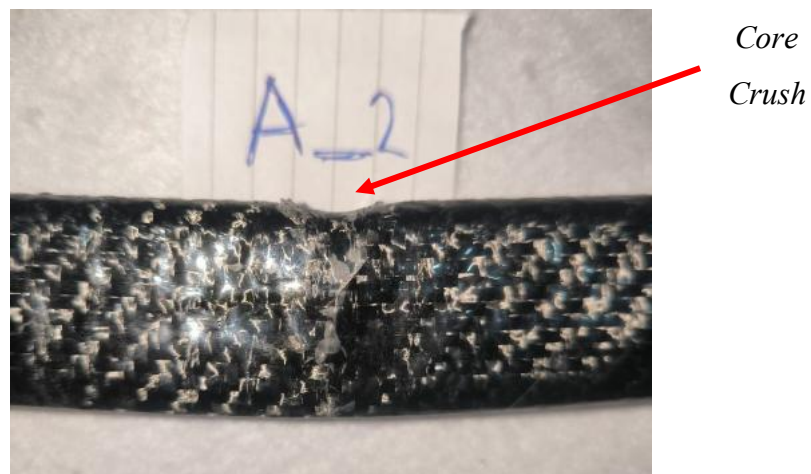
Berat awal setiap spesimen menunjukkan adanya variasi meskipun seluruhnya dicetak dengan pengaturan printer, kepadatan infill, di waktu pencetakan yang sama, dan permukaan yang relatif sama. Sebagai contoh, spesimen A_3 memiliki berat awal tertinggi (96,3 g), sedangkan A_2 memiliki berat awal terendah (93,6 g). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi kecil pada material filamen, seperti perbedaan densitas atau diameter filamen yang tidak sepenuhnya konsisten. Namun, perbedaan berat akhir antar desain juga mencerminkan tingkat penyerapan resin dan distribusi lapisan karbon, yang dapat dipengaruhi oleh ketepatan proses pelapisan (*skinning*). Variasi berat awal dan akhir ini penting untuk dicatat karena dapat mempengaruhi perhitungan kekakuan spesifik dan perlu diperhatikan dalam analisis performa material.

4.4 Hasil Pengujian

Spesimen uji yang telah dibuat kemudian diuji menggunakan metode *bending* untuk mengevaluasi performa mekanisnya. Pengujian ini dilakukan sesuai standar ASTM C393 untuk mengetahui sifat-sifat mekanik utama dari kedua desain spesimen. Bab ini akan membahas hasil pengujian *bending* yang diperoleh dan data yang dihasilkan selama pengujian berlangsung. Adapun tampak visual dari titik dimana pembebanan dilakukan pada masing-masing spesimen pada gambar 4- 17, 4- 18, dan 4- 19 untuk variasi desain A, lalu untuk spesimen variasi desain B ada pada gambar 4- 20, 4- 21, dan 4- 22.



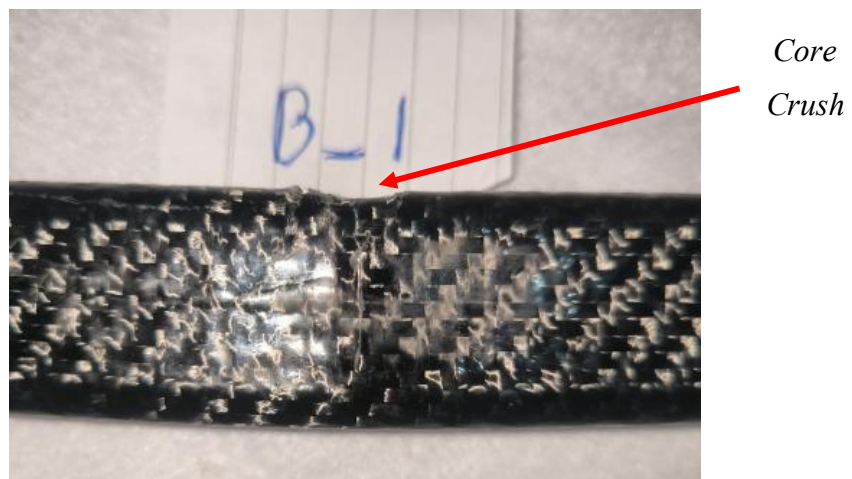
Gambar 4- 17 Hasil Pengujian Spesimen A_1



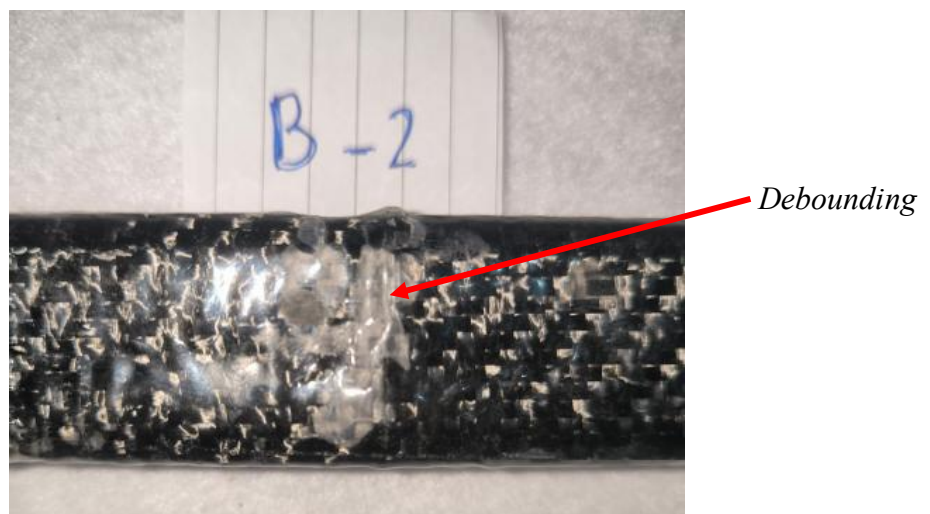
Gambar 4- 18 Hasil Pengujian Spesimen A_2



Gambar 4- 19 Hasil Pengujian Spesimen A_3



Gambar 4- 20 Hasil Pengujian Spesimen B_1



Gambar 4- 21 Hasil Pengujian Spesimen B_2



Gambar 4- 22 Hasil Pengujian Spesimen B_3

Berdasarkan gambar diatas pada variasi desain A terjadi *severe crushed core* untuk masing-masing variannya. Sedangkan untuk desain B terjadi *crushed core* hanya pada variasi B_1. Pada Spesimen B_2 mengalami *debonding* antara serat karbon dengan resin, hal ini menandakan bahwa desain B lebih berkemampuan untuk mengatasi kegagalan core crush.

Dari pengujian yang dilakukan didapatkan hasil data numerik antara lain P_{max} , Defleksi dan juga Tegangan *Bending* dari masing-masing spesimen. Adapun tabel 4- 3 yang menampilkan nilai hasil dari pengujian yang telah dilakukan sebagai berikut.

Tabel 4- 3 Data Hasil Pengujian Three-point *Bending*

No.	Spesimen	P_{max} (kN)	Defleksi (mm)	Teg. <i>Bending</i> (MPa)
1	A_1	4,76	8,63	59,98
2	A_2	4,25	9,25	53,55
3	A_3	5,27	9,94	66,41
4	B_1	5,83	7,75	71,98
5	B_2	5,35	6,34	66,05
6	B_3	5,41	6,14	66,79

Dari data hasil pengujian didapati bahwa spesimen B_1 memiliki nilai P_{max} dan nilai Tegangan *bending* paling besar dibandingkan 5 spesimen lainnya yaitu 5,83 kN dan tegangan *bending* sebesar 71,98 MPa. Adapun untuk defleksi spesimen yang memiliki nilai terbesar yaitu spesimen A_3 yaitu 9,94 mm.

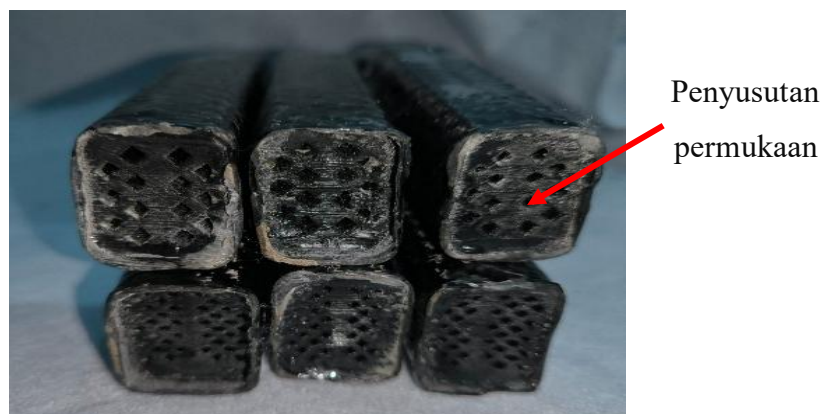
4.5 Analisis dan Pembahasan

Hasil pengujian *bending* yang telah diperoleh lalu dianalisis lebih lanjut untuk mengevaluasi kinerja masing-masing desain berdasarkan kriteria yang ditetapkan. Analisis ini mencakup pembahasan mengenai perbandingan performa kedua desain, efisiensi material, serta kemungkinan faktor-faktor yang mempengaruhi hasil uji.

4.5.1 Identifikasi Cacat Spesimen

Selama proses fabrikasi, ditemukan beberapa ketidaksempurnaan pada spesimen uji yang utamanya terjadi selama tahap *curing*. Ketidaksempurnaan ini berupa deformasi pada spesimen akibat suhu *oven* yang melebihi ambang batas yang dapat ditoleransi oleh material. Suhu yang terlalu tinggi menyebabkan sebagian material spesimen meleleh, sehingga bentuk spesimen mengalami perubahan yang tidak sesuai dengan desain awal.

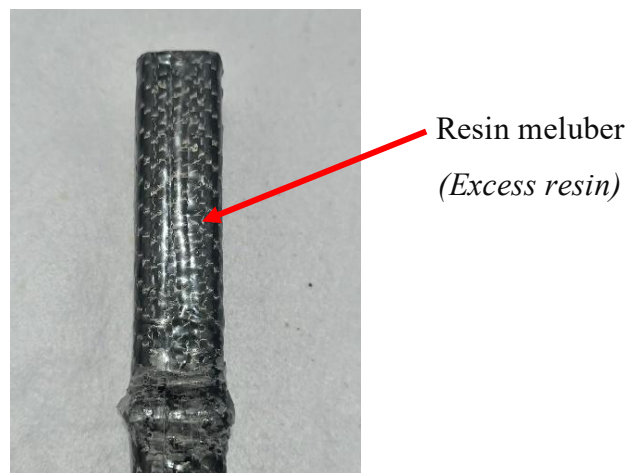
Deformasi ini terutama terlihat pada area spesimen yang mengalami paparan langsung terhadap suhu tinggi dalam waktu yang lama terlihat pada gambar 4- 23 dibawah ini. Perubahan bentuk meliputi penurunan ketebalan pada beberapa bagian serta penyimpangan kecil pada dimensi keseluruhan.



Gambar 4- 23 Kecacatan Spesimen Uji pada Proses *Curing*

Faktor utama penyebab deformasi ini diidentifikasi sebagai pengaturan suhu *oven* yang tidak konsisten atau kurang sesuai dengan spesifikasi material,

terutama untuk material dasar seperti ABS yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap suhu. Kedepannya, proses *curing* dapat ditingkatkan dengan melakukan kontrol suhu yang lebih presisi, seperti menggunakan *oven* dengan sistem pengaturan suhu bertahap atau menambahkan lapisan insulasi pada spesimen untuk mencegah deformasi lebih lanjut. Meski demikian, deformasi yang terjadi masih berada dalam batas toleransi, sehingga spesimen tetap dapat diuji. Oleh karena itu, spesimen yang mengalami deformasi tetap dapat digunakan untuk proses pengujian, meskipun hasilnya mungkin mempengaruhi sifat mekanis tertentu yang diukur.



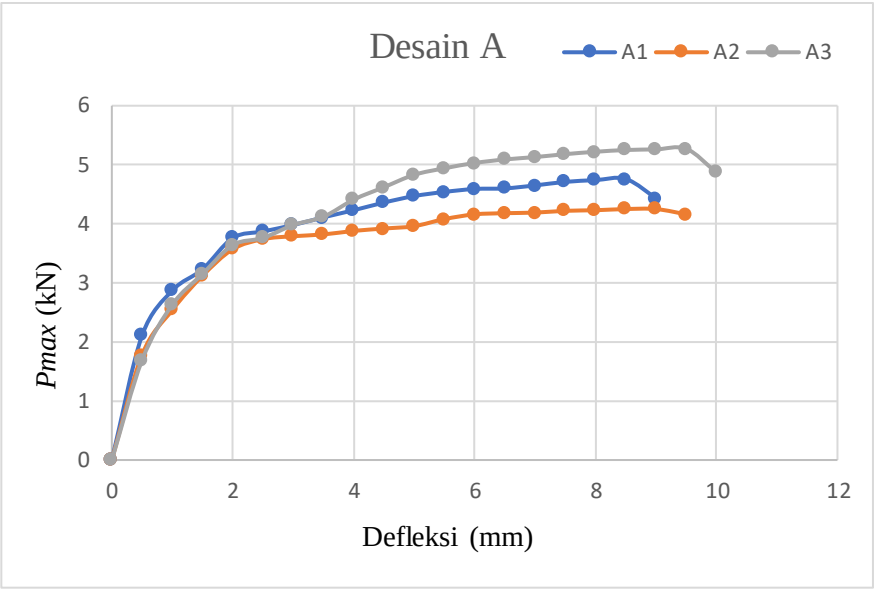
Gambar 4- 24 Kecacatan Spesimen A_1 pada Proses *Finishing*

Adapun hasil inspeksi visual terhadap semua spesimen, ditemukan adanya resin yang meluber pada spesimen A_1 selama proses fabrikasi terlihat pada gambar 4- 24. Resin ini tampak mengalir secara berlebih pada beberapa area spesimen sebelum akhirnya mengeras, sehingga menyebabkan ketebalan yang tidak merata di permukaan spesimen. Kondisi ini dapat terjadi akibat kelebihan resin yang digunakan atau distribusi resin yang tidak terkendali selama proses *finishing*.

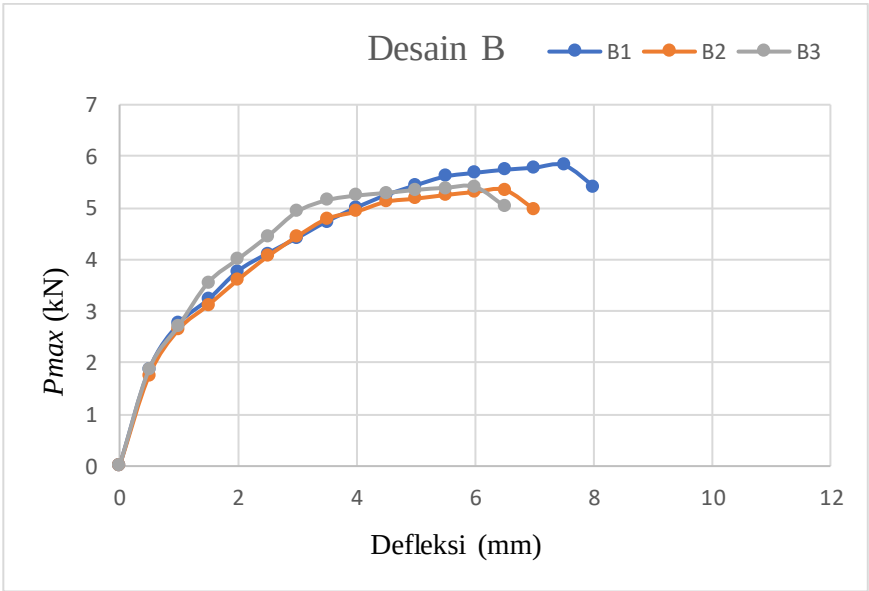
4.5.2 Analisis Data Pengujian *Bending*

Data hasil dari pengujian sebelumnya selanjutnya diolah kembali untuk menentukan titik yield dari masing-masing spesimen, data yang dihasilkan yaitu P_{yield} dan juga Defleksi pada titik yield. Berikut adalah data sebelumnya dalam

bentuk grafik disajikan pada gambar 4- 25 untuk desain A dan gambar 4- 26 untuk desain B.



Gambar 4- 25 Grafik P_{max} terhadap defleksi Desain A

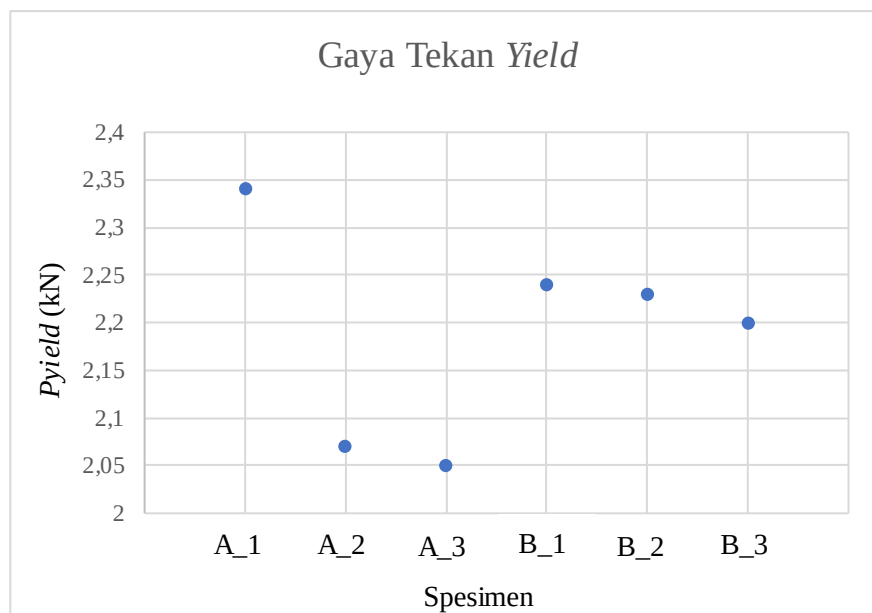


Gambar 4- 26 Grafik P_{max} terhadap defleksi Desain B

Dari hasil pengujian *bending* yang sudah dilakukan sebelumnya dapat dicari untuk nilai P_{yield} dan nilai δ_{yield} . Berikut disajikan dengan tabel 4- 4 dari nilai-nilai tersebut:

Tabel 4- 4 Data *yield* Spesimen Uji

No.	Spesimen	P_{yield} (kN)	δ_{yield} (mm)
1	A_1	2,34	0,59
2	A_2	2,07	0,66
3	A_3	2,05	0,68
4	B_1	2,24	0,68
5	B_2	2,23	0,69
6	B_3	2,20	0,67



Gambar 4- 27 Grafik *Scatter* P_{yield}

Pada gambar 4- 27 Grafik persebaran data nilai P_{yield} menunjukkan bahwa spesimen A_1 memiliki nilai yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen A_2 dan A_3, yang menunjukkan tren nilai yang lebih konsisten. Ketidaksesuaian ini dapat dihubungkan dengan kecacatan yang sebelumnya telah diidentifikasi pada spesimen A_1, yaitu adanya resin yang meluber selama proses fabrikasi seperti yang terlihat pada gambar 4- 24. Kondisi ini kemungkinan besar menyebabkan distribusi material yang tidak merata, sehingga mempengaruhi kekakuan lokal dan meningkatkan nilai P_{yield} . Oleh karena itu, spesimen A_1

dianggap sebagai anomali dan tidak digunakan sebagai representasi performa desain A dalam analisis lebih lanjut.

Berdasarkan data yang telah diperoleh sebelumnya, dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik. Hasil perhitungan disajikan dalam bentuk tabel 4- 5 untuk masing-masing varian spesimen sebagai berikut.

Tabel 4- 5 Data Hasil Perhitungan Kekakuan *Bending* dan Kekakuan *Bending* Spesifik

No.	Spesimen	D (N.mm ²)	$D_{Spesifik}$ (N.mm ² /g)
1	A_1	278.866.525,42	2.598.942,46
2	A_2	220.525.568,18	2.088.310,30
3	A_3	211.971.507,35	1.934.046,60
4	B_1	231.617.647,06	1.988.134,31
5	B_2	227.241.847,83	1.892.105,31
6	B_3	230.876.865,67	1.904.924,63

Untuk menjaga validitas dan konsistensi data, analisis difokuskan pada spesimen A_2 dan A_3 untuk desain A, serta B_1, B_2, dan B_3 untuk desain B. Nilai rata-rata kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik dari kedua desain ini digunakan sebagai basis pembandingan. Penelitian ini juga menggunakan data penelitian sebelumnya, yaitu spesimen dengan inti berbahan PLA dan ABS, yang dilapisi *carbon fiber*. Perbandingan dilakukan antara rata-rata hasil desain A dan B dengan data penelitian terdahulu untuk mengevaluasi performa.

4.5.3 Perbandingan dengan Penelitian Sebelum

Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh (Putra, 2023) dengan judul “Pengaruh Pelapisan Serat Karbon pada Komposit *Sandwich* Batang Profil H Menggunakan Material Inti *Polylactic Acid* (PLA) Terhadap Sifat Rigiditas *Bending*” didapati data kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik dari beberapa spesimen dengan kode Komposit *sandwich* yang akan diganti untuk

mempermudah penulisan menjadi variasi Penelitian A, yang mana spesimen ini menyerupai spesimen uji pada penelitian ini dengan beberapa perbedaan spesifikasi seperti besar geometri penampang, parameter cetak 3D yaitu *infill* 100%, penggunaan material PLA pada proses cetak 3D, dan spesimen penelitian ini tidak dilakukan perlakuan *curing*. Dengan menggunakan metode operasi aritmatika, didapatkan data lanjutan hasil pengujian disajikan pada tabel 4- 6 sebagai berikut.

Tabel 4- 6 Spesimen Penelitian A

No.	Spesimen	D (N.mm ²)	$D_{Spesifik}$ (N.mm ² /g)
1	Penelitian A_1	786.552.784,97	2.665.377,11
2	Penelitian A_2	1.032.031.250,00	3.497.225,52
3	Penelitian A_3	1.099.095.394,74	3.724.484,56

Adapun hasil dari penelitian sebelumnya oleh (Pradana, 2024) didapati data hasil pengujian dari beberapa spesimen dengan kode ABS Prepreg_30 mm yang akan diganti untuk mempermudah penulisan menjadi variasi Penelitian B, dengan spesifikasi spesimen berbeda pada bagian *infill* yaitu 20% dibandingkan dengan penelitian ini yang memiliki *infill* 60%. Berikut disajikan dalam tabel 4- 7 data hasil pengujian dari penelitian sebelumnya .

Tabel 4- 7 Spesimen Penelitian B

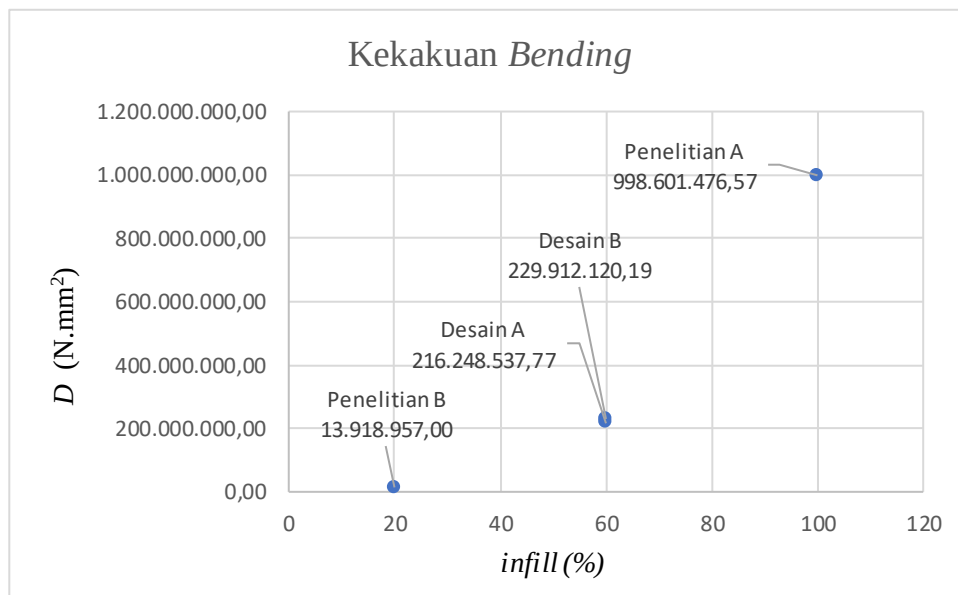
No.	Spesimen	D (N.mm ²)	$D_{Spesifik}$ (N.mm ² /g)
1	Penelitian B_1	15.625.000,00	258.264,00
2	Penelitian B_2	12.212.914,00	201.866,00

Kemudian dilakukan perbandingan rata-rata hasil uji dari desain A, desain B pada penelitian ini, dan variasi spesimen Penelitian A dan Penelitian B dari penelitian sebelumnya disatukan dalam bentuk tabel 4- 8 dibawah ini.

Tabel 4- 8 Data Rerata Varian Spesimen

No.	Spesimen	D (N.mm ²)	$D_{Spesifik}$ (N.mm ² /g)
1	Desain A	216.248.537,77	2.011.178,45
2	Desain B	229.912.120,19	1.928.388,08
3	Penelitian A	998.601.476,57	3.295.695,73
4	Penelitian B	13.918.957,00	230.065,00

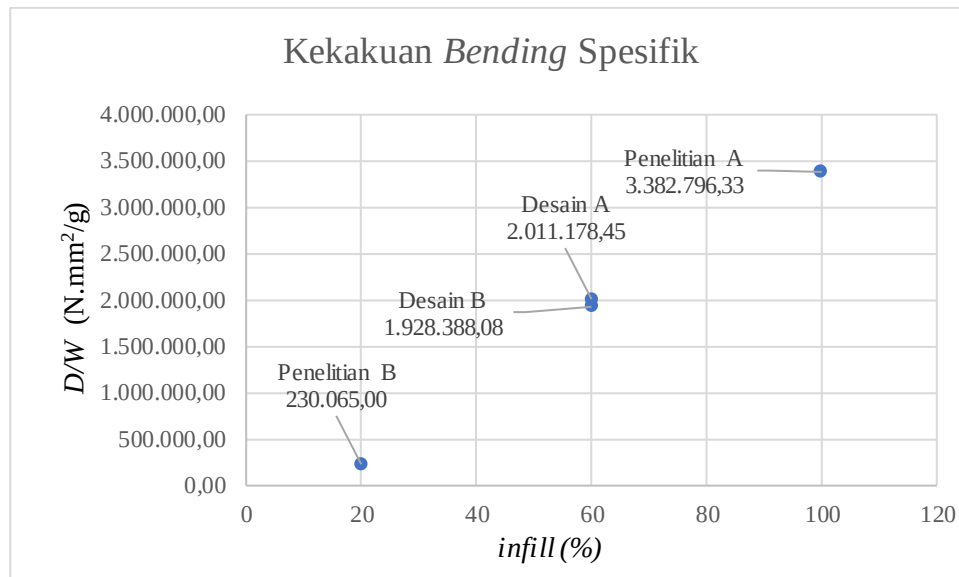
Setelah semua data didapatkan lalu ditampilkan pada grafik agar memudahkan pembacaan, data akan diurutkan dari persentase infill spesimen terendah ke yang paling tinggi. Yaitu dengan urutan Penelitian B diurutan pertama dengan nilai *infill* 20%, lalu desain A dan desain B dengan nilai *infill* 60%, terakhir yaitu Penelitian A dengan nilai *infill* 100%. Berikut adalah grafik kekakuan bending disajikan pada gambar 4- 28.

Gambar 4- 28 Grafik Perbandingan Kekakuan *Bending*

Menurut gambar grafik 4-28 yang mengkaji nilai kekakuan *bending* untuk spesimen Penelitian A memiliki nilai paling tinggi yaitu 998.601.476,57 N.mm², nilai tersebut masih 3,5 kali lipat lebih tinggi dibanding nilai desain A yang hanya 216.248.537,77 N.mm² dan untuk desain B masih 3,2 kali lipat lebih tinggi dengan nilai kekakuan 229.912.120,19 N.mm². Sedangkan untuk nilai dari Penelitian B

jauh lebih rendah dari desain A, dengan perbedaan 15,5 kali lipat lebih kecil dibanding desain A.

Berdasarkan grafik diatas performa spesimen pada penelitian ini yaitu desain A dan desain B, memiliki selisih nilai kekakuan *bending* sebanyak 13.663.582,42 N.mm². Desain B memiliki performa kekakuan *bending* yang lebih baik secara struktural.



Gambar 4- 29 Grafik Perbandingan Kekakuan *Bending* Spesifik

Berdasarkan gambar grafik 4- 29 diatas dapat dilihat terjadi penyusutan selisih antar spesimen menjadi 1,64 kali lipat antara nilai kekakuan *bending* spesifik desain A (2.011.178,45 N.mm²) dengan nilai Penelitian A (3.382.796,33 N.mm²). Untuk desain B (1.928.388,08 N.mm²) selisih nilai kekakuan *bending* spesifik dengan nilai dari Penelitian A mencapai 1,71 kali lipat. Penyusutan selisih ini mengindikasikan efisiensi material yang lebih baik, dengan penyesuaian dan optimasi dari segi fabrikasi memungkinkan untuk didapatkan spesimen dengan nilai kekakuan yang lebih tinggi. Sedangkan untuk variasi Penelitian B memiliki nilai 8,4 kali lipat lebih kecil dibandingkan dengan desain B.

Menurut grafik diatas untuk performa spesimen pada penelitian ini yaitu desain A dan desain B, memiliki selisih perbedaan nilai kekakuan *bending* spesifik sebesar 82.790,37 N.mm²/g. Dimana desain A unggul dalam hal kekakuan *bending* spesifik.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pembuatan rangka dari material ABS dan *prepreg carbon fiber* menggunakan metode *vacuum bagging* sedikit terkendala pada temperatur (terlalu tinggi dan tidak stabil) di tahap *curing prepreg carbon fiber*.
2. Hasil desain rangka dapat dicetak tanpa support dengan berbagai orientasi, meminimalisir material terbuang.
3. Desain B lebih kuat secara struktural, sedangkan dari nilai kekakuan *bending* spesifik dapat dilihat bahwa desain A lebih efisien dalam distribusi kekakuan terhadap berat.
4. Parameter *infill* menjadi faktor utama yang berpengaruh besar dalam sifat kekakuan spesimen.

5.2 Saran Untuk Penelitian Selanjutnya

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Untuk peningkatan kekuatan struktural, dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan *infill* pada pencetakan 3D, atau menggunakan material dengan sifat mekanik yang lebih baik pada bagian inti (*core*) dan kulit (*skin*).
2. Perancangan desain yang lebih efisien, terutama dalam hal distribusi kekuatan dan penggunaan material, dapat mengurangi berat tanpa mengorbankan kekuatan.
3. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan variasi lain dalam proses fabrikasi dan material terkhusus fiber karbon yang digunakan, untuk meningkatkan performa dan daya tahan produk komposit *sandwich* yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, F., Zamheri, A., & Yusuf, H. D. (2021). OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS IN 3D PRINTING FDM BY USING THE TAGUCHI AND GREY RELATIONAL ANALYSIS METHODS. *Sintek Jurnal Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*.
- Astuti, F. F. (2024). Pengaruh Temperatur Nozel Dan Arah Orientasi Posisi Obyek Hasil Additive Manufacturing Terhadap Kekuatan Impak. *macha*.
- Banowati, L. (2023). Impact Properties of Hemp Natural – Glass Fibers Hybrid Polypropylene Sandwich Composites. *IJAR*.
- Chen, Z. F., & Zhao, L. (2010). Reliability Analysis of H-Beam Transfer Truss Under Construction Loads. *AMR*.
- Easy Composites Ltd. (n.d). PREPREG CARBON FIBRE EVALUATION KIT.
- Guimarães, A. (2019). Prepreg aging effects on its properties, curing process and final composite behavior characterized by dynamic mechanical analysis. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- Harper, J. F., Miller, N., & Yap, S. (1993). The Influence of Temperature and Pressure During the Curing of Prepreg Carbon Fiber Epoxy Resin. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*.
- Hastuti, S., Pramono, C., & Paryono, P. (2022). Peningkatan Kekuatan Mekanik Komposit Sandwich Serat Kenaf dengan Core Kayu Albizzia Falcataria untuk Material Dinding Komposit. *Jurnal Rekayasa Mesin*.
- Joshi, N. (2023). Computer-Aided Design and Engineering for Product Design and Manufacturing. *Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry*.
- Junaedi, H., El-baky, M. A., Allah, M. M., & Sebaey, T. A. (2024). Mechanical Characteristics of Sandwich Structures with 3D-Printed Bio-Inspired Gyroid Structure Core and Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminate Face-Sheet. *Polymers*.
- Lee, D., & Wu, Y. (2020). Parameters Affecting the Mechanical Properties of Three-Dimensional (3D) Printed Carbon Fiber-Reinforced Polylactide Composites. *Polymers*, 12(11).

- Ma, X., Yang, Z., & Gu, Y. (2014). Manufacture and characterization of carbon fiber composite stiffened skin by resin film infusion/prepreg co-curing process. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.
- 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*.
- Olivianides, F. (2022). Analisis Pengaruh Jumlah Skin Pada Komposit Sandwich Terhadap Uji Bending Menggunakan Metode Vacuum Infusion. *Universitas Islam Indonesia*.
- Pasha, S., Saleem, A., & Bilal, M. (2023). Evaluation of Internal Adaptation and Marginal Fit of Onlays Fabricated Using Computer-Aided Design (CAD)-Computer-Aided Manufacturing (CAM) and Three-Dimensional Printing Techniques: An In Vitro Study. *Cureus*.
- Pradana, M. N. (2024). KEKUATAN BENDING RANGKA PRODUK KOMPOSIT MENGGUNAKAN MATERIAL KOMPOSIT SANDWICH DENGAN INTI POLIMER PRODUK 3D PRINTING DAN LAPISAN PENGUAT SERAT KARBON. *Universitas Islam Indonesia*.
- Prasad, B. D., & Reddy, R. (2016). Design and Analysis of Sandwich Composite Beam. *IJERT*.
- Pratama, A. H. (2022). Pengaruh Ketebalan Dan Jenis 3d Printed Core Terhadap Kekakuan Bending Komposit Sandwich Skin Serat Karbon. *Universitas Islam Indonesia*.
- Putra, M. A. (2023). Pengaruh Pelapisan Serat Karbon pada Komposit Sandwich Batang Profil H Menggunakan. *Universitas Islam Indonesia*, 6.
- Shi, W., & Liu, X. (2011). Application on H-Beam with Trapezoidally Corrugated Webs. *AMM*.
- Swennen, G., Pottel, L., & Haers, P. (2020). Custom-made 3D-printed face masks in case of pandemic crisis situations with a lack of commercially available FFP2/3 masks. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*.
- Zhao, G., & Chen, K. (2023). Cure Kinetics of a Carbon Fiber/Epoxy Prepreg by Dynamic Differential Scanning Calorimetry. *International Journal of Polymer Science*.

LAMPIRAN





4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

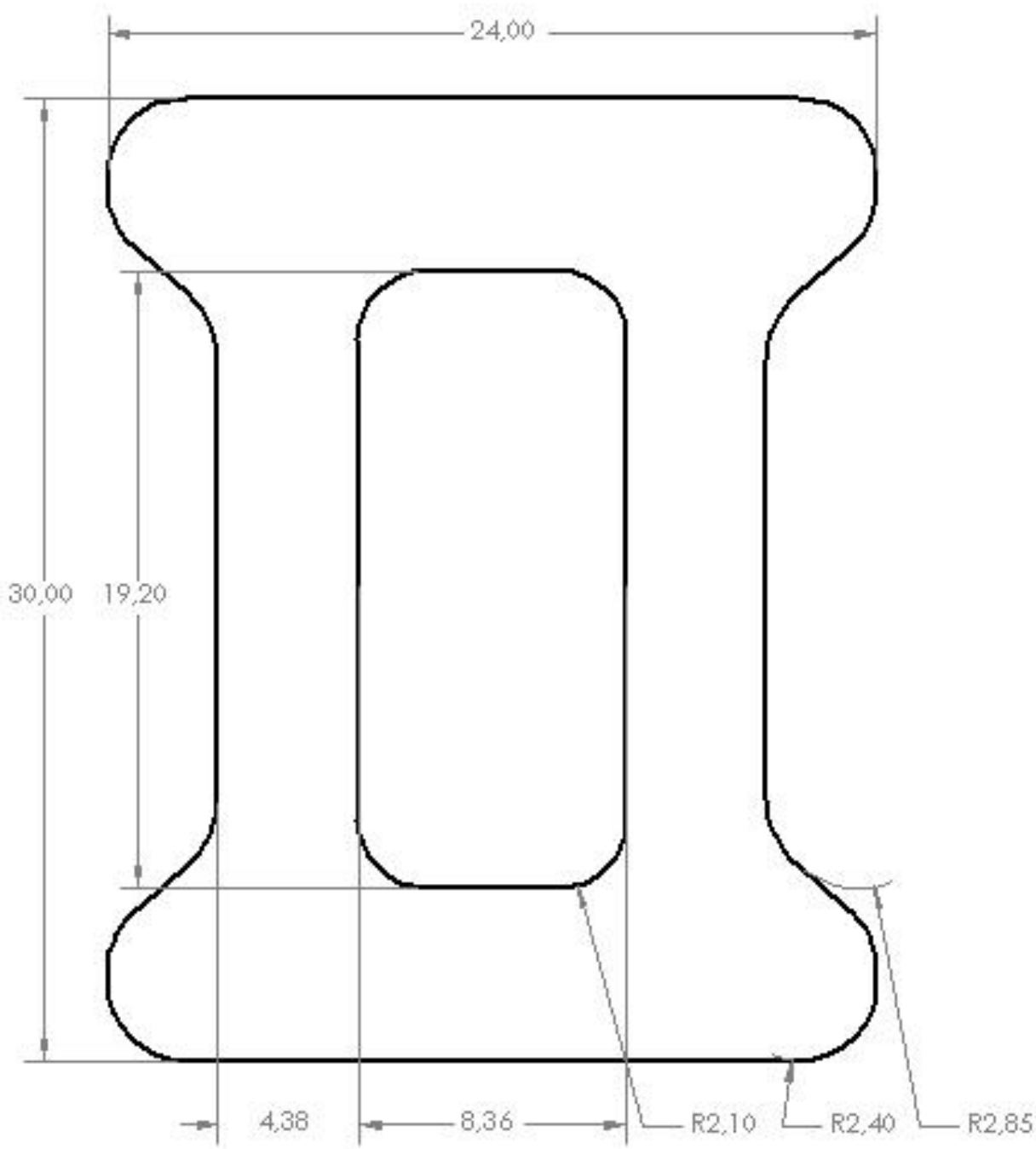
C

B

B

A

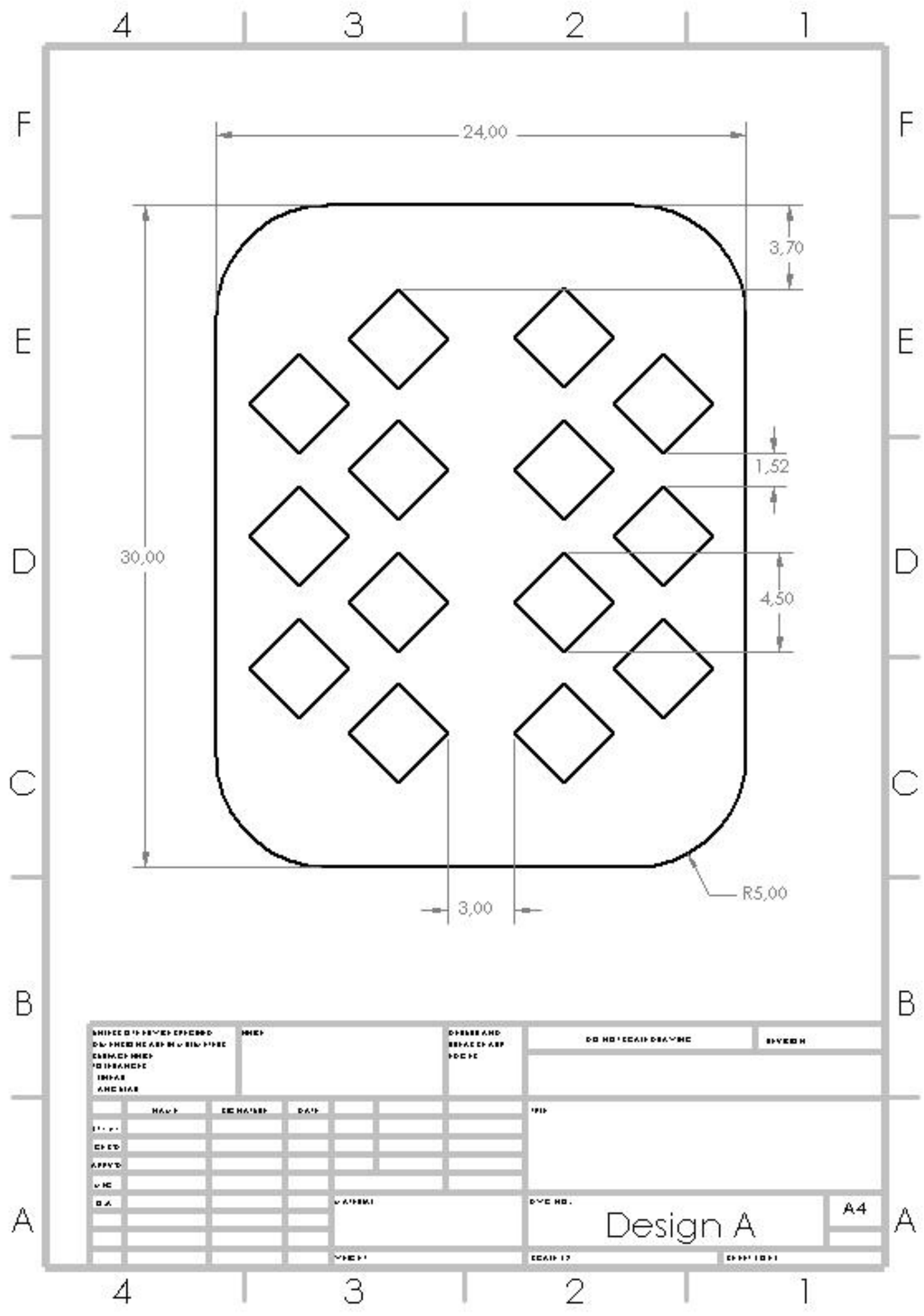
A



UNICEF D'INFORMAZIONE DEI PROGETTI E DEI LAVORI ESEGUITI IN UNO DEI CANTIERI DEI TRAMVIE INFERIORI E SUPERIORI				PROGETTO E ESECUZIONE DEI LAVORI		DEI PROGETTI E DEI LAVORI ESEGUITI IN UNO DEI CANTIERI DEI TRAMVIE INFERIORI E SUPERIORI		DEI PROGETTI E DEI LAVORI ESEGUITI IN UNO DEI CANTIERI DEI TRAMVIE INFERIORI E SUPERIORI	
DATA	DEI LAVORI	DEI LAVORI	DEI LAVORI	DEI LAVORI	DEI LAVORI	DEI LAVORI	DEI LAVORI	DEI LAVORI	DEI LAVORI
1910									
1911									
1912									
1913									
1914									
1915									
1916									
1917									
1918									
1919									
1920									
1921									
1922									
1923									
1924									
1925									
1926									
1927									
1928									
1929									
1930									
1931									
1932									
1933									
1934									
1935									
1936									
1937									
1938									
1939									
1940									
1941									
1942									
1943									
1944									
1945									
1946									
1947									
1948									
1949									
1950									
1951									
1952									
1953									
1954									
1955									
1956									
1957									
1958									
1959									
1960									
1961									
1962									
1963									
1964									
1965									
1966									
1967									
1968									
1969									
1970									
1971									
1972									
1973									
1974									
1975									
1976									
1977									
1978									
1979									
1980									
1981									
1982									
1983									
1984									
1985									
1986									
1987									
1988									
1989									
1990									
1991									
1992									
1993									
1994									
1995									
1996									
1997									
1998									
1999									
2000									
2001									
2002									
2003									
2004									
2005									
2006									
2007									
2008									
2009									
2010									
2011									
2012									
2013									
2014									
2015									
2016									
2017									
2018									
2019									
2020									
2021									
2022									
2023									
2024									
2025									
2026									
2027									
2028									
2029									
2030									
2031									
2032									
2033									
2034									
2035									
2036									
2037									
2038									
2039									
2040									
2041									
2042									
2043									
2044									
2045									
2046									
2047									
2048									
2049									
2050									
2051									
2052									
2053									
2054									
2055									
2056									
2057									
2058									
2059									
2060									
2061									
2062									
2063									
2064									
2065									
2066									
2067									
2068									
2069									
2070									
2071									
2072									
2073									
2074									
2075									
2076									
2077									
2078									
2079									
2080									
2081									
2082									
2083									
2084									
2085									
2086									
2087									
2088									
2089									
2090									
2091									
2092									
2093									
2094									
2095									
2096									
2097									
2098									
2099									
2100									

Design Original (SKALA 0.6) A4

4 3 2 1



4

3

2

1

F

F

24,00

3,70

E

E

2,25

30,00

2,25

D

D

C

C

R5,00

3,00

B

B

UNIQUE TO BEYOND OFFERED
ON THE HEART OF THE FINE
CERAMIC WHEN
TO BEHOLD THE
IMPER
AND THE

NAME

OFFER AND
BEHOLD THE
FINE

DO NOT SCALE DRAWING

BY THE

	NAME	DATE			
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

100

DYE NO.

Design B

A4

A

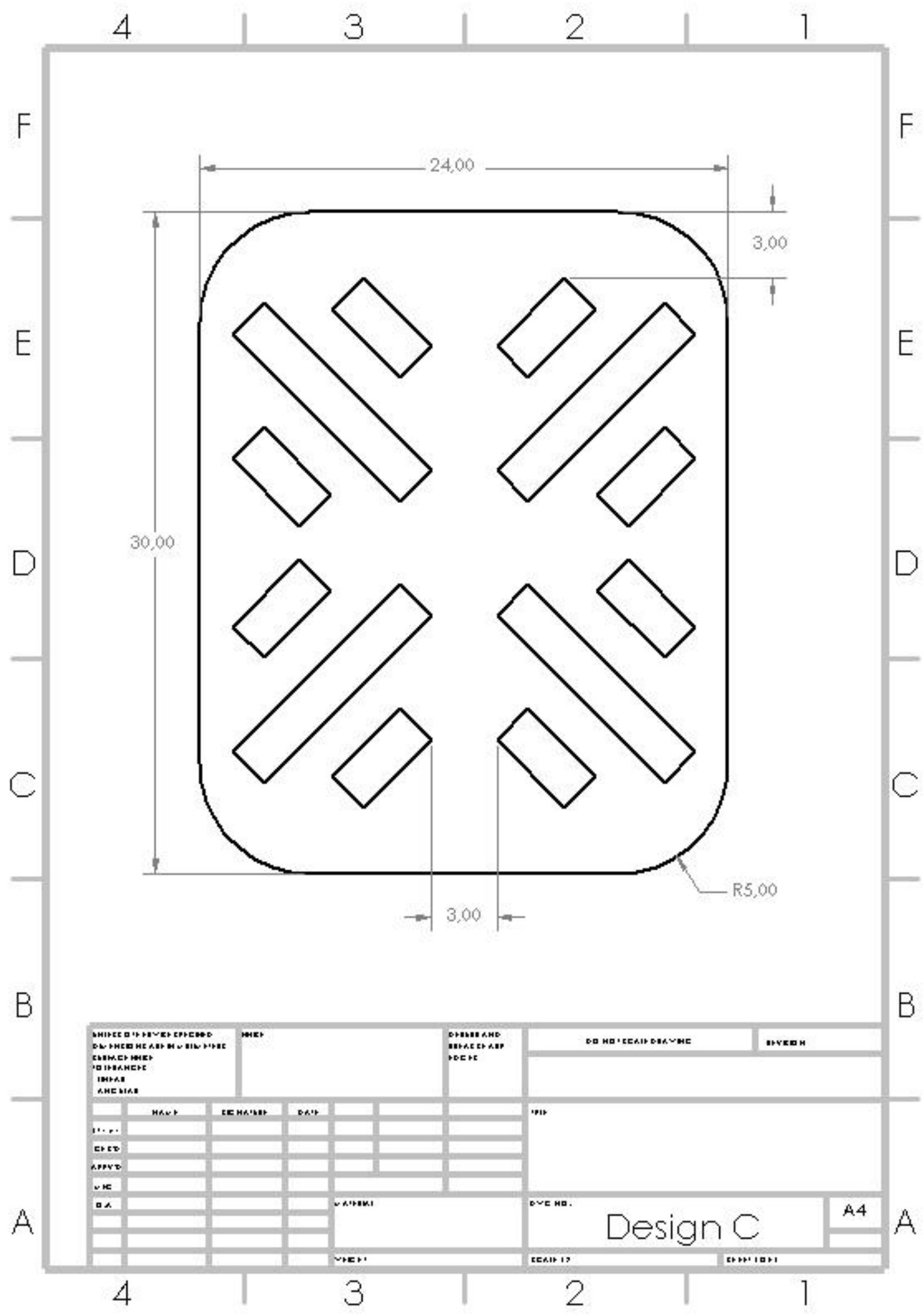
A

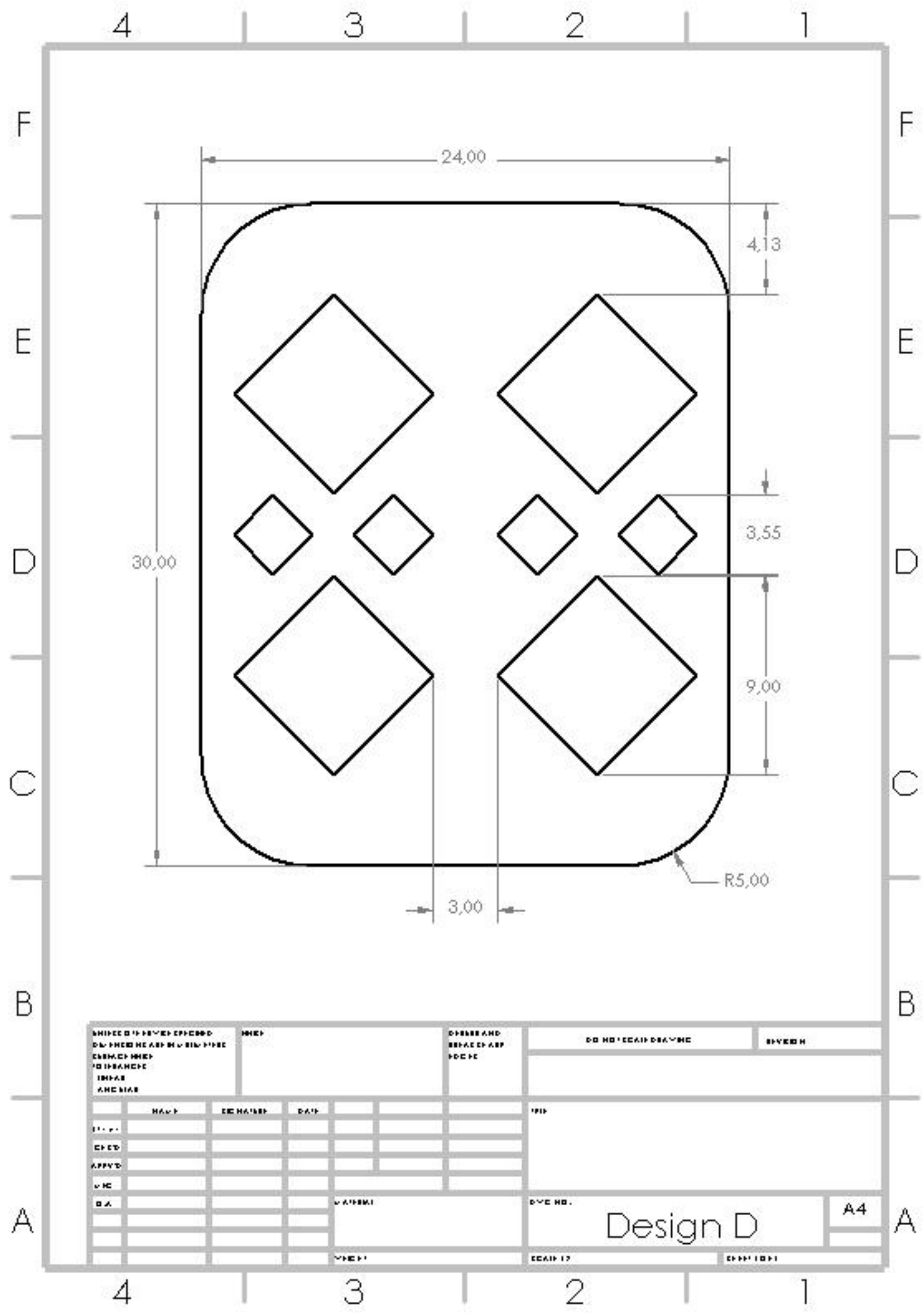
4

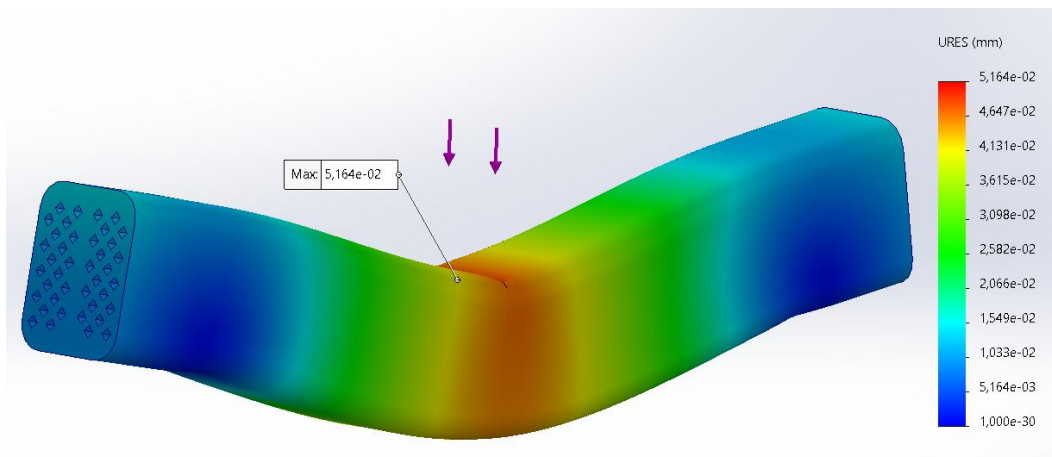
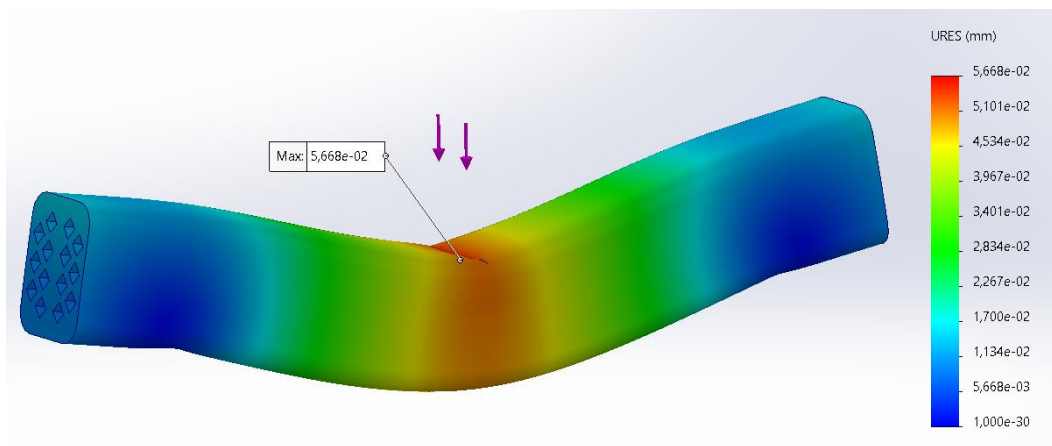
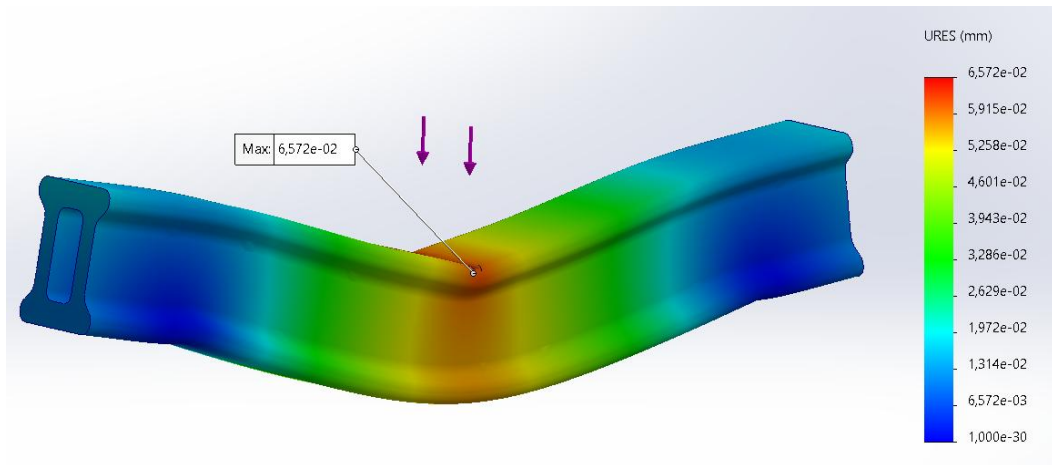
3

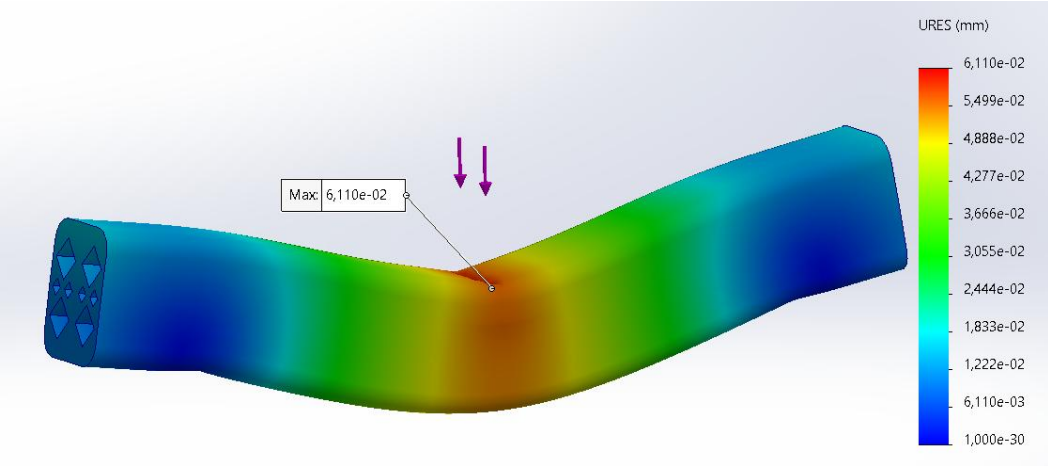
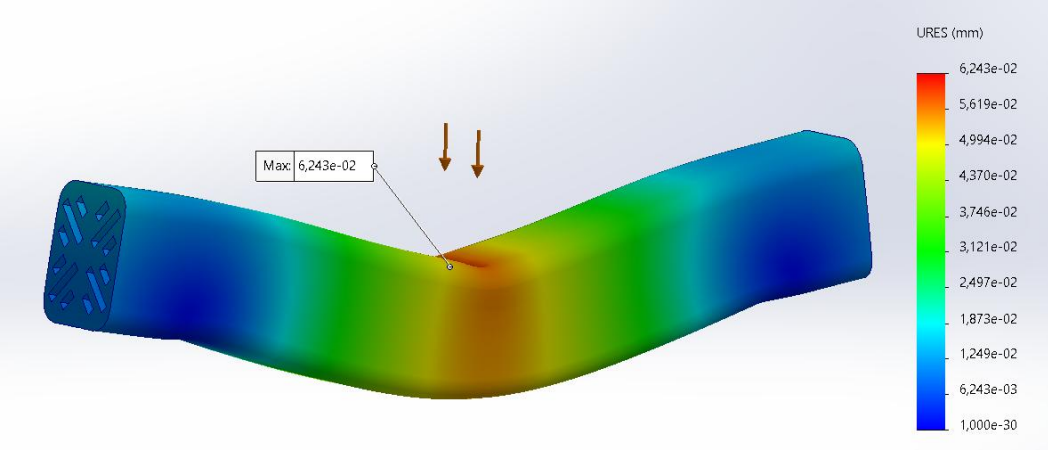
2

1











LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN BENDING

No.	Variasi Spesimen	Pmax (KN)	Defleksi (mm)	Tegangan Bending (MPa)
1	A_1	4.76	8.63	59.98
2	A_2	4.25	9.25	53.55
3	A_3	5.27	9.94	66.41
4	B_1	5.83	7.75	71.98
5	B_2	5.35	6.34	66.05
6	B_3	5.41	6.14	66.79

Keterangan:

1. Pengujian dilakukan tanggal 2 November 2024
2. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine

Identitas Penguji :

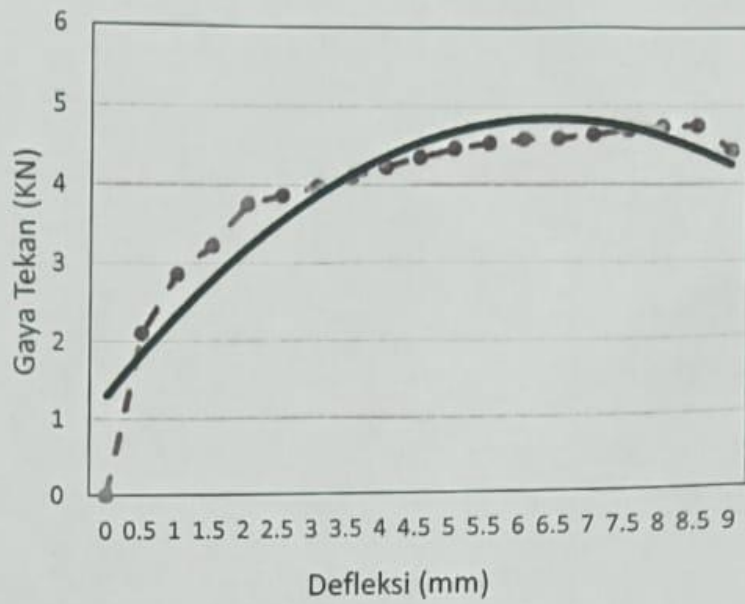
Nama : Faris Iza Mahendra
NIM : 18525114
Institusi : Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 2 November 2024
Staf Laboratorium Bahan Teknik

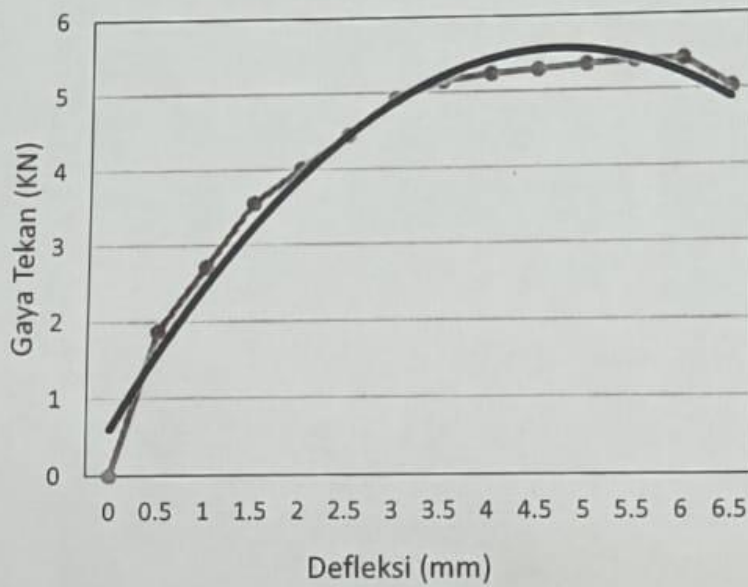
Pengujian & Analisa Material
Dr. Lilik Dwi Setyana, S.T., M.T.
NIP. 197708312002121002

Lembar asli, tidak untuk digandakan

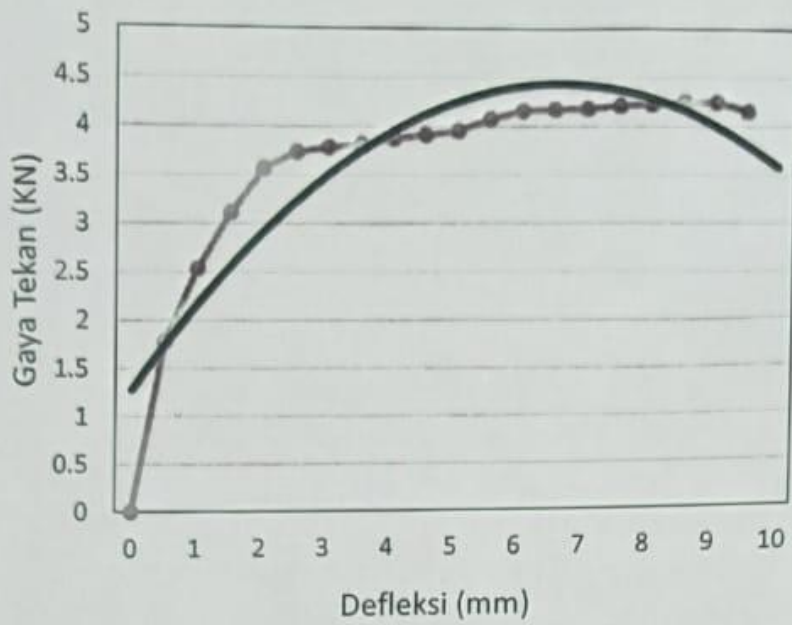
Spesimen A1



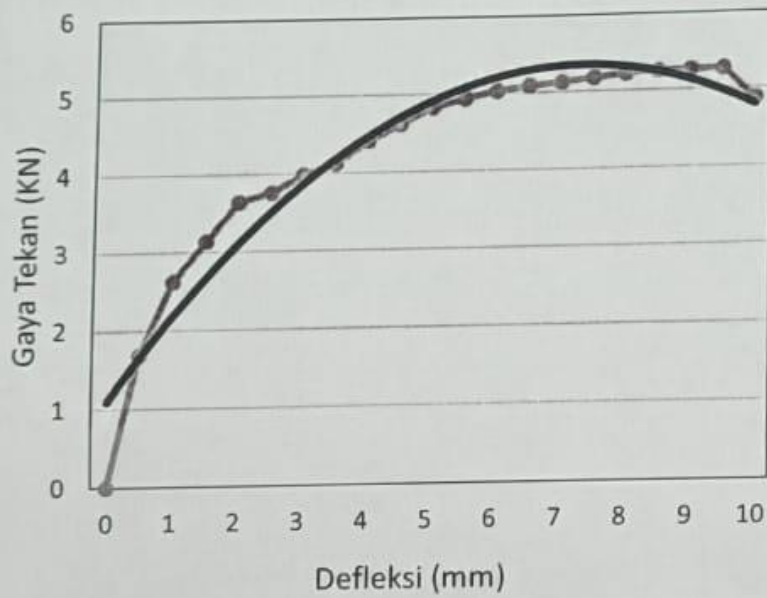
Spesimen B3



Spesimen A2



Spesimen A3

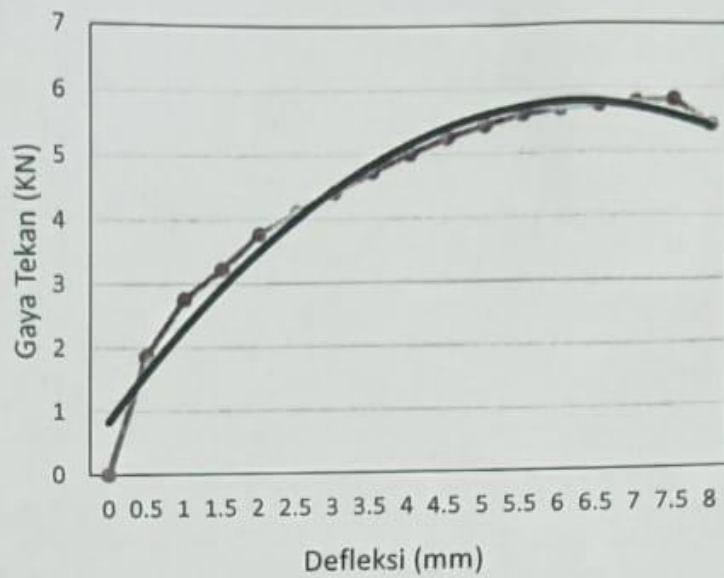


Pengujian & Analisa
Material



Lab. Bina Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM

Spesimen B1



Spesimen B2

