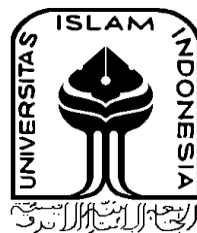


**PENGARUH KETEBALAN STRUKTUR BERTINGKAT
DISKONTINU *HONEYCOMB CORE* TERHADAP KEKAKUAN
BENDING MATERIAL KOMPOSIT SERAT KARBON
SANDWICH DAN ABS**

TUGAS AKHIR

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



Disusun Oleh :

**Nama : Muhammad Yasykur Raif
No. Mahasiswa : 19525139
NIRM : 1908010304**

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

2025

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya bertanda tangan dibawah ini, Muhammad Yasykur Raif selaku penulis Tugas Akhir yang berjudul “PENGARUH KETEBALAN STRUKTUR BERTINGKAT DISKONTINU *HONEYCOMB CORE* TERHADAP KEKAKUAN *BENDING* MATERIAL KOMPOSIT SERAT KARBON *SANDWICH* DAN ABS” menyatakan bahwa karya tulis ilmiah yang saya buat merupakan karya sendiri dan bukan dari plagiasi karya tulis orang lain. Seluruh kutipan atau gambar yang ada pada karya tulis ini telah saya sertakan sitasi dan sumber pustakanya. Apabila dikemudian hari saya dianggap melakukan pelanggaran hak cipta atau yang saya tulis pada karya ilmiah ini tidak benar, maka saya siap menerima sanksi dan hukuman dengan ketentuan yang berlaku.

Yogyakarta, 9 Mei 2025



Muhammad Yasykur Raif

(19525139)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**PENGARUH KETEBALAN STRUKTUR BERTINGKAT
DISKONTINU *HONEYCOMB CORE* TERHADAP KEKAKUAN
BENDING MATERIAL KOMPOSIT SERAT KARBON
SANDWICH DAN ABS**

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Yasykur Raif
No. Mahasiswa : 19525139
NIRM : 1908010304

Yogyakarta, 9 Mei 2025

Pembimbing I



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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**PENGARUH KETEBALAN STRUKTUR BERTINGKAT
DISKONTINU *HONEYCOMB CORE* TERHADAP KEKAKUAN
BENDING MATERIAL KOMPOSIT SERAT KARBON
SANDWICH DAN ABS**

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Muhammad Yasykur Raif
No. Mahasiswa : 19525139
NIRM : 1908010304

Tim Penguji

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

IPP

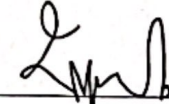
Ketua



Tanggal : 11/06/25

Yustiasih Purwaningrum, S.T., M.T.

Anggota I



Tanggal : 10/6 25

Ir.Donny Suryawan, S.T., M.Eng.,

IPP

Anggota II



Tanggal : 11/6 25

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur yang mendalam dan atas ijinnya, laporan tugas akhir ini penulis persembahkan dan ucapkan banyak terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua saya bapak Suyoto dan Ibu Sodimah yang selalu berperan besar dalam setiap langkah dikehidupan dengan bentuk dukungan moral dan semangat yang tiada henti diberikan melalui do'a dan nasehat tanpa henti agar penulisan dan pelaksanaan tugas akhir ini dapat dilaksanakan atas ijin Allah Swt.
2. Bapak Dosen pembimbing Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T. yang selalu memberikan ilmu, arahan serta saran dalam penelitian ini hingga dapat berjalan dengan lancar. Serta para dosen Teknik Mesin UII yang memberikan banyak ilmu dan kebaikan selama penulis menjalani perkuliahan di prodi Teknik Mesin FTI UII.

HALAMAN MOTTO

“Allah tidak akan pernah membebani hambanya melainkan sesuai dengan
kesanggupannya”

(Q.S Al-Baqarah 2:256)

“It's not necessary to beat the ordinary”

(Elephant Kind)

Merapal do'a, GAS sekencangnya

(FSTVLST)

Belantara masa depan, pikiran dan perjalanan biar kami yang tentukan

(Barasuara)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH



Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kita panjatkan kepada tuhan semesta alam Allah Swt yang hanya kepada-Nya penulis memohon pertolongan. Alhamdulillah atas segala pertolongan, rahmat, dan kasih sayang-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir, yang berjudul “PENGARUH KETEBALAN STRUKTUR BERTINGKAT DISKONTINU *HONEYCOMB CORE* TERHADAP KEKAKUAN *BENDING* MATERIAL KOMPOSIT SERAT KARBON *SANDWICH* DAN ABS”. Shalawat dan salam tidak lupa penulis haturkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad Saw yang telah membawa zaman ini dari zaman kegelapan menuju zaman yang terang benderang seperti saat ini dan memberikan pedoman agar kita selamat dunia akhirat.

Penyusunan Tugas Akhir diajukan sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S1) pada jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.

Penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada berbagai pihak yang turut andil berbagi ilmu, saran, pengalaman, dan kebaikan. Oleh sebab itu penulis ingin berterimakasih dan apresiasi kepada:

1. Allah Swt. Tuhan semesta alam dan pemilik jiwa-jiwa dimuka bumi. Berkat Rahmat serta karunia-Nya penulis dimudahkan dalam proses penelitian sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.
2. Keluarga tercinta, bapak Suyoto, Ibu Sodimah, serta para saudara yang senantiasa memberikan do'a, motivasi, dan membimbing penulis dalam setiap langkah.
3. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T.IPP., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin FTI UII.
4. Bapak Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing dalam menempuh tugas akhir yang selalu memberikan bimbingan dan arahan.

5. Seluruh staf pengajar, staf administratif, dan seluruh karyawan di Program Studi Teknik Mesin UII.
6. Rekan-rekan kos pondok sawojajar Iyung, Atong, boge, Asu, Kentung, Pandu, Irsyad, Ocay, Arul, Udin, Yuda, Luther, Apri, Jembar, Rojo, Vito, Gana.
7. Rekan-rekan Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia Angkatan 2019 Abdullah Faqih, Asriadi Anwar, Fachrozy Aprizal, Muhammad Ilham, Haqi Muhammad Nur Pamungkas, serta seluruh rekan-rekan Teknik Mesin UII 2019 yang berjuang bersama menjalani masa perkuliahan di kampus.
8. Semua pihak yang sudah membantu dan mendoakan penulis yang tidak dapat ditulis semua dalam kata pengantar atau ucapan terima kasih ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan Laporan Tuga Akhir ini masih jauh dari kata sempurna karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga laporan ini dapat bermanfaat buat penulis dan semua orang yang membacanya. Akhir kata penulis ucapkan terimakasih. Semoga Allah SWT selalu merahmati dan meridhoi setiap langkah kita dalam menuntut ilmu, Aamiin Ya Robbal'Alamiin.
Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 9 Mei 2025



Muhammad Yasykur Raif

19525139

ABSTRACT

The advancement of composite-based manufacturing technology has driven the need for research on the mechanical performance of sandwich composite materials. This study aims to investigate the effect of varying thickness in discontinuous stepped honeycomb core structures on the bending stiffness of sandwich composites made from ABS material and carbon prepreg skin. Three specimen thickness variations were tested: 4 mm, 7 mm, and 10 mm. The core was fabricated using 3D printing technology with 100% infill ABS material, while the skin layer was applied using the vacuum bagging method. Bending tests were conducted according to ASTM C393 standards using a Universal Testing Machine. The results showed that the 10 mm specimen achieved the highest bending stiffness of 15,283,361.03 N.mm², while the highest specific bending stiffness was obtained by the 4 mm specimen at 357,996.45 N.mm²/gram. Failure modes observed during testing included debonding, face wrinkling, core crush, and core tearing. Additionally, a comparison between direct tests and Computer Aided Engineering (CAE) simulations showed similar trends, with deviations remaining within acceptable technical tolerances. Overall, increasing the specimen thickness improved bending stiffness but reduced specific bending stiffness.

Keywords: Bending, Sandwich Composite, Honeycomb Core, Carbon Prepreg, 3D Printing,

ABSTRAK

Perkembangan teknologi manufaktur berbasis komposit mendorong kebutuhan penelitian terkait performa mekanik material komposit *sandwich*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan pada struktur bertingkat diskontinu *honeycomb core* terhadap kekakuan *bending* material komposit *sandwich* berbahan ABS dan serat karbon *prepreg*. Tiga variasi ketebalan spesimen yang diuji yaitu 4 mm, 7 mm, dan 10 mm. Pembuatan *core* dilakukan menggunakan teknologi *3D printing* dengan material ABS dan *infill* 100%, sementara pelapisan *skin* dilakukan dengan metode *vacuum bagging*. Pengujian *bending* mengacu pada standar ASTM C393 dan dilakukan menggunakan mesin *Universal Testing Machine*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen dengan ketebalan 10 mm memiliki nilai kekakuan *bending* tertinggi sebesar 15.283.361,03 N.mm², sedangkan nilai kekakuan *bending* spesifik tertinggi diperoleh pada spesimen 4 mm sebesar 357.996,45 N.mm²/gram. Jenis kegagalan yang terjadi selama pengujian meliputi *debonding*, *face wrinkling*, *core crush*, dan *core tearing*. Selain itu, perbandingan hasil uji langsung dengan simulasi *Computer Aided Engineering (CAE)* menunjukkan tren serupa, meskipun terdapat deviasi yang masih dalam batas toleransi teknis. Secara umum, peningkatan ketebalan spesimen meningkatkan kekakuan *bending* namun menurunkan kekakuan *bending* spesifik.

Kata kunci: *Bending*, Komposit *sandwich*, *Honeycomb Core*, Karbon *Prepreg*, *3D Printing*

DAFTAR ISI

Lembar Pernyataan Keaslian	ii
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	iii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih	vii
Abstract	ix
Abstrak	x
Daftar Isi	xi
Daftar Tabel	xiii
Daftar Gambar	xiv
Daftar Notasi	xvi
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan	2
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
Bab 2 Tinjauan Pustaka	4
2.1 Kajian Pustaka	4
2.2 Dasar Teori	5
2.2.1 Komposit	5
2.2.2 Komposit <i>Sandwich</i>	6
2.2.3 Karbon <i>prepreg</i>	7
2.2.4 <i>3D print</i>	7
2.2.5 <i>Vacuum bagging</i>	8
2.2.6 Pengujian <i>Bending</i>	8
2.2.7 Modus Kegagalan Pengujian <i>Bending</i> Komposit <i>Sandwich</i>	10

Bab 3 Metode Penelitian	12
3.1 Alur Penelitian.....	12
3.2 Peralatan dan Bahan	13
3.3 Perancangan.....	19
3.3.1 Dimensi Spesimen	19
3.3.2 Susunan Lapisan Komposit <i>Sandwich</i>	21
3.3.3 Proses Pembuatan Spesimen	21
3.3.4 Pembuatan <i>Core</i> dengan <i>3D Printing</i>	21
3.3.5 Proses Vacuum Bagging.....	22
3.3.6 Proses <i>curing</i>	25
3.4 Proses Pengujian <i>Bending</i>	26
Bab 4 Hasil dan Pembahasan	27
4.1 Hasil Pengerjaan	27
4.2 Hasil Pengujian.....	28
4.3 Analisis Kegagalan Spesimen	29
4.4 Perhitungan.....	34
4.5 Pembahasan	35
4.5.1 Tegangan <i>Bending</i>	36
4.5.2 Kekakuan <i>Bending</i>	37
4.5.3 Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik.....	38
Bab 5 Penutup.....	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya.....	40
Daftar Pustaka	41

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1 Parameter Pencetakan 3D <i>Print</i>	22
Tabel 4- 1 Hasil Pengukuran Spesimen.....	27
Tabel 4-2 Hasil Pengujian <i>Bending</i>	29
Tabel 4-3 Hasil Perhitungan Spesimen	34
Tabel 4-4 Data Spesimen Penelitian Sebelumnya.....	35
Tabel 4-5 Hasil Pengujian <i>CAE</i>	36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Struktur Komposit <i>Sandwich</i>	6
Gambar 2-2 Karbon <i>Prepreg</i>	7
Gambar 2-3 Metode <i>vacuum bagging</i>	8
Gambar 2-4 Pengujian <i>bending</i>	9
Gambar 2-5 Modus kegagalan <i>skin</i>	10
Gambar 2-6 Modus kegagalan <i>core</i>	11
Gambar 3-1 Alur Penelitian.....	12
Gambar 3-2 Mesin <i>3D Print Flashforge Creator Pro</i>	13
Gambar 3-3 Filamen ABS.....	13
Gambar 3-4 <i>Vacuum Pump</i>	14
Gambar 3-5 <i>Reservoir Pot</i>	14
Gambar 3-6 <i>Vacuum Bag</i>	15
Gambar 3-7 Selang.....	15
Gambar 3-8 <i>Valve</i>	16
Gambar 3-9 <i>Sealant Tape</i>	16
Gambar 3-10 Serat Karbon.....	17
Gambar 3-11 Timbangan.....	17
Gambar 3-12 Jangka Sorong.....	18
Gambar 3-13 Gunting.....	18
Gambar 3-14 <i>Microwave</i>	19
Gambar 3-15 Mistar.....	19
Gambar 3-16 Dimensi Spesimen Tebal 4 mm.....	20
Gambar 3-17 Dimensi Spesimen Tebal 7 mm.....	20
Gambar 3-18 Dimensi Spesimen Tebal 10 mm.....	20
Gambar 3-19 Susunan Komposit.....	21
Gambar 3-20 Proses Pembuatan <i>Core</i>	21
Gambar 3-21 Skema Lapisan <i>Vacuum Bagging</i>	22
Gambar 3-22 Persiapan Alat dan Bahan.....	23
Gambar 3-23 Persiapan <i>Vacuum bag</i>	23
Gambar 3-24 Penempelan <i>Sealant Tape</i>	24

Gambar 3-25 Penempelan Serat Karbon <i>Prepreg</i>	24
Gambar 3-26 Penutupan Spesimen dengan <i>Vacuum Bag</i>	25
Gambar 3-27 Proses <i>Vacuum</i>	25
Gambar 3-28 Proses <i>Curing</i>	26
Gambar 4-1 Hasil Setelah <i>Vacuum Bagging</i>	27
Gambar 4-2 <i>Universal Testing Machine</i>	28
Gambar 4-3 Modus Kegagalan Spesimen B2.....	30
Gambar 4-4 Modus Kegagalan Spesimen E2.....	30
Gambar 4-5 Modus Kegagalan Spesimen E3.....	31
Gambar 4-6 Modus Kegagalan Spesimen D1	31
Gambar 4-7 Modus Kegagalan Spesimen D2	32
Gambar 4-8 Modus Kegagalan Spesimen D3	32
Gambar 4-9 Modus Kegagalan Spesimen B1.....	33
Gambar 4-10 Modus Kegagalan Spesimen B2	33
Gambar 4-11 Modus Kegagalan Spesimen B3	34
Gambar 4-12 Grafik Tegangan <i>Bending</i>	36
Gambar 4-13 Grafik Kekakuan <i>Bending</i>	37
Gambar 4-14 Grafik Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik.....	38

DAFTAR NOTASI

E = Modulus elastisitas *bending* (N/mm^2)

P = Beban yang diberikan (N)

h = Tebal spesimen (mm)

b = lebar spesimen (mm)

W = Berat spesimen (gram)

L = Jarak antar titik tumpu (mm)

D = Kekakuan *bending* (Nmm^2)

I = Momen inersia (kgm)

δ = Defleksi (mm)

σ = Tegangan *bending* (Mpa)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya zaman, teknologi khususnya dalam bidang manufaktur mengalami perkembangan yang sangat pesat dan kompleks. Salah satu teknologi manufaktur yang sedang berkembang saat ini adalah teknologi *3D printer* dimana untuk pembuatan produk yang sederhana, cepat, dan detail. Sebagian besar metode *3D printer* Menggunakan *3D print filament* atau biasa disebut dengan *Fused Deposition Method (FDM)*, dimana material yang sering digunakan adalah *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)* dan *Polylactic Acid (PLA)*. Hal ini dipengaruhi oleh kebutuhan manusia yang semakin luas terhadap bidang manufaktur.

Salah satu yang diperhatikan dalam bidang manufaktur yaitu material yang digunakan, material sendiri merupakan salah satu komponen utama dalam pembuatan suatu produk. Material dengan keunggulan sifat mekanik yang kuat, kaku, dan ringan sangat dibutuhkan pada saat ini, terlebih pada bidang otomotif, konstruksi, dan teknologi. Oleh karena itu untuk mendapatkan material dengan kriteria tersebut, salah satunya memerlukan material komposit.

Komposit dibuat dengan menggabungkan dua atau lebih material untuk memberikan sifat yang berbeda. Manfaat material komposit adalah daya tahan, kekakuan, dan bobotnya yang ringan (Rodiawan, 2016). Meskipun komposit seharusnya merupakan material berkualitas lebih baik, namun tetap saja memiliki beberapa kekurangan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi kelemahan ini dan mempertahankan tingkat kualitas material yang sudah ada.

Komposit *sandwich* merupakan salah satu kemajuan paling signifikan dalam inovasi pengembangan struktur untuk sektor material komposit. Sistem transportasi ringan, seperti pada satelit, pesawat terbang, dan kereta cepat, dirancang dan dibangun dengan menggunakan struktur komposit *sandwich*. Ketika

menggunakan struktur *sandwich* ini, pengurangan bobot menjadi pertimbangan utama (Marsono, 2019)

Pada penelitian kali ini akan memvariasikan ketebalan spesimen dengan menggunakan struktur komposit *sandwich* menggunakan material ABS dengan skin karbon *prepreg*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, maka masalah yang dapat diidentifikasi sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan pada spesimen komposit *sandwich* terhadap kekakuan *bending*?
2. Apa saja jenis kegagalan yang terjadi pada spesimen komposit *sandwich* dengan variasi ketebalan selama pengujian *bending*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Bagian *core* menggunakan material ABS dengan pelapisan *skin* menggunakan karbon *prepreg* dengan penempelan menggunakan metode *vacuum bagging*.
2. Dalam pengujian mekanik dilakukan dengan menggunakan standar ASTM C393.
3. Pengujian mekanik yang dilakukan hanya menggunakan pengujian *bending*.
4. Pembuatan spesimen menggunakan mesin FDM *3D print* dengan *infill* 100%.
5. *Core* berbentuk *honeycomb*.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan penelitian ini adalah, sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik tertinggi dari setiap spesimen uji.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan dengan struktur *sandwich* terhadap nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat dari penelitian ini adalah, sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui sifat mekanik yang dimiliki spesimen.
2. Untuk mengetahui cara pelapisan karbon *prepreg* menggunakan metode *vacuum bagging*.
3. Untuk mengetahui perbedaan nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik spesimen dengan variasi ketebalan yang berbeda.
4. Untuk mengetahui perbandingan hasil pengujian *bending* dari metode pengujian langsung dengan hasil melalui *Computer Aided Engineering CAE*.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini, menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

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

BAB III Metode penelitian

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

BAB IV Hasil dan pembahasan

Pada bab ini, terdapat pembahasan yang didalamnya membahas terkait analisa data, hasil pengujian, dan penampilan daripada grafik hasil pengujian.

BAB V Penutup

Pada bab ini, berisikan tentang kesimpulan dan saran terkait penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Kajian pustaka pertama yang dijadikan landasan dalam penelitian ini berjudul “pengaruh struktur zig-zag *honeycomb ribs* terhadap kekuatan *bending* spesimen komposit *polylactic acid* (PLA) – *carbon fiber*”. Penulis meneliti kekuatan *bending* spesimen komposit *non sandwich* struktur *honeycomb* yang di zig-zag sebagai ribs menggunakan material PLA dengan dilapisi karbon fiber dua lapisan pada setiap spesimen, setiap spesimen memiliki tebal *core* 10 mm. Terdapat tiga variasi spesimen dari penelitian ini sebagai pembanding yaitu, lantai dasar dengan tebal 2 mm sebagai *core* dan *honeycomb* dengan tebal 8 mm sebagai ribs (2.8), dibandingkan dengan susunan struktur *honeycomb* zig-zag dengan susunan struktur lantai dasar memiliki tebal 2 mm sebagai *core* dan tumpukan *honeycomb* zig-zag masing-masing memiliki tebal 4 mm sebagai ribs (2.4.4), dan dengan susunan struktur lantai dasar memiliki tebal 1 mm sebagai *core* dan *honeycomb* memiliki tebal 4 mm kemudian lapisan lantai memiliki tebal 1 mm dan *honeycomb* memiliki tebal 4 mm (1.4.1.4) yang tersusun secara zig-zag. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa spesimen 1.4.1.4 memiliki nilai tegangan *bending*, kekakuan *bending*, dan kekakuan *bending* spesifik tertinggi (Anwar, 2024).

Kajian pustaka berikutnya yang dijadikan landasan dalam penelitian ini berjudul “Pengaruh variasi ketebalan *core* terhadap karakteristik *bending* komposit *sandwich* serat *cantula* dengan *core honeycomb* kardus tipe *A-flute*”. Pada penelitian tersebut diadakan untuk mengetahui pengaruh variasi ketebalan *core honeycomb BC-Flute* terhadap karakteristik komposit *sandwich* serat *cantula* (nanas sabrang). Variasi spesimen dari pengujian tersebut yaitu spesimen dengan tebal 10 mm, 20 mm, 30 mm, dan 40 mm. Kemudian spesimen yang telah dilapisi komposit tersebut dilakukan uji *bending* yang mengacu pada ASTM C 393. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketebalan mempengaruhi tegangan *bending*, tegangan geser *core*, dan tegangan *bending* pada permukaan. Nilai tertinggi

tegangan *bending* komposit terdapat pada spesimen dengan tebal 10 mm sebesar 17,47 MPa. Nilai tertinggi tegangan *bending* pada permukaan terdapat pada spesimen dengan tebal 10 mm sebesar 16,84 MPa. Nilai tertinggi tegangan geser *core* terdapat pada spesimen dengan tebal 10 mm sebesar 0,75 MPa (Mustiana. & Rida, 2014).

Kajian pustaka berikutnya berasal dari penelitian yang berjudul “Analisa kekuatan *bending* filamen ABS dan PLA pada hasil *3D printer* dengan variasi suhu *nozzle*”. Terdapat dua macam filamen yang digunakan untuk membuat spesimen pada penelitian tersebut yaitu, PLA dan ABS. Spesimen yang dibuat memiliki ukuran yang mengacu pada standar ASTM D955. Masing masing spesimen dibuat dengan suhu *nozzle* yang bervariasi yaitu, 230°C, 237°C dan 244°C. Spesimen dilakukan uji *bending* untuk mengetahui tingkat kekuatan spesimen terhadap suatu beban. Pada pengujian *bending* yang dilakukan menggunakan parameter *displacement* 3 mm, sehingga pada setiap spesimen akan diberikan beban hingga mencapai *displacement* 3 mm, kemudian didapat gaya yang berkerja pada masing-masing spesimen. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa filamen ABS lebih kuat menahan beban dibandingkan filamen PLA, tetapi filamen PLA lebih lentur dibandingkan dengan filamen ABS. Selainitu berdasarkan pengujian *bending* yang dilakukan menunjukkan bahwa, hasil *3D printing* dengan suhu *nozzle* semakin tinggi maka beban yang ditahan semakin besar (Ikhsanto & Zainuddin, 2020).

2.2 Dasar Teori

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan beberapa dasar teori yang terkait dengan topik sebagai dasar pemikiran atau pernyataan. Berikut adalah dasar teori yang digunakan penulis

2.2.1 Komposit

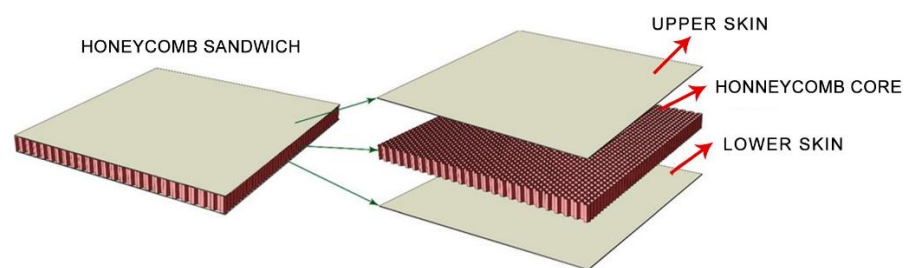
Material komposit pada dasarnya terdiri dari dua atau lebih material berbeda yang digabungkan menjadi suatu bentuk unit mikroskopik. Ada banyak cara untuk menggabungkan bahan pengisi dan matriks. Pengisi dapat berupa serat atau partikel kecil. Material ini dibuat untuk menggabungkan kelebihan dari setiap

komponen penyusunnya, seperti daya tahan, kekuatan mekanik, dan memiliki bobot yang ringan. Secara umum, material komposit terdiri dari dua komponen yaitu matriks, yang merupakan bahan pengikat serat, dan serat, yang berfungsi sebagai bahan pengisi. Dalam komposit, serat merupakan komponen utama, sedangkan pengikatnya terbuat dari bahan polimer yang memiliki daya ikat yang kuat dan mudah dibentuk (Yani. & lubis, 2018).

Komposit dapat dibagi menjadi tiga kategori utama berdasarkan matriksnya yaitu, *Ceramic matrix composite* (CMC) dimana keramik sebagai matriks, *Metal matrix composite* (MMC) dimana logam sebagai matriks, *Polimer matrix composite* (PMC) dimana polimer sebagai matriks (Nayiroh, 2013)

2.2.2 Komposit *Sandwich*

Komposit *sandwich* yang dikenal sebagai panel *sandwich*, terdiri dari panel *skin* yang kokoh di sisi atas dan bawah, yang di pisahkan oleh lapisan dalam material dengan kepadatan rendah yang dikenal dengan *core* (Prayoga, Eryawanto, & Hadi, 2018). Tebal dan sifat mekanis *skin* dan *core* serta kekuatan ikatan antara *skin* dan *core* dapat mempengaruhi kekuatan struktur *sandwich* itu sendiri. Tergantung pada kebutuhan tertentu. *skin* komposit *sandwich* dapat di buat dari beberapa jenis material dan variasi ketebalan (Diharjo, 2011).



Gambar 2-1 Struktur Komposit *Sandwich*

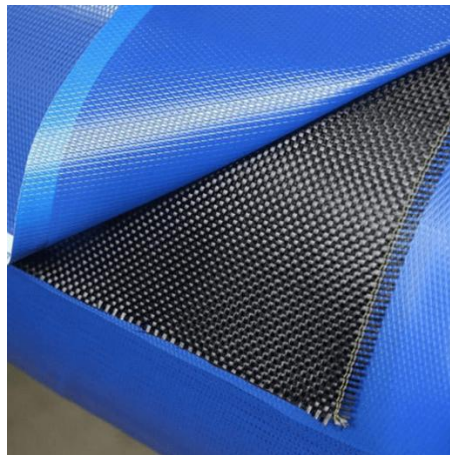
Core merupakan komponen utama dari komposit *sandwich*, pada bagian ini harus cukup kaku untuk mempertahankan jarak antara permukaan. *Core* harus kuat menahan geseran untuk mencegah terjadi *slide* antar permukaan. Material yang memiliki tingkat kekakuan yang rendah tidak baik digunakan untuk *core*, karena

akan menyebabkan kekakuan pada lapisan *sandwich* berkurang atau bahkan hilang. (Hidayat, Yudo, & Manik, 2016)

Skin merupakan komponen yang melapisi *core*. *Skin* berfungsi untuk menahan tegangan tekan dan tegangan tarik dalam struktur komposit *sandwich*. Biasanya *skin* memiliki tingkat kekakuan yang lebih rendah (Hidayat, Yudo, & Manik, 2016).

2.2.3 Karbon *prepreg*

Karbon *prepreg* merupakan bahan komposit yang terdiri dari serat karbon yang telah diresapi sebelumnya dengan resin *thermosetting* atau *thermoplastic*. Proses peresapan pada serat karbon *prepreg* memastikan resin meresap dengan merata dan presisi, sehingga membuat kekuatan mekanik yang tinggi dan stabilitas termal. Jenis resin yang sering digunakan mencakup *epoxy*, *poliester*, dan *fenolik*. Karbon *prepreg* banyak digunakan pada industri penerbangan, otomotif, dan olahraga karena ringan dan kuat (Lengsfeld & Fabris, 2016).



Gambar 2-2 Karbon *Prepreg*

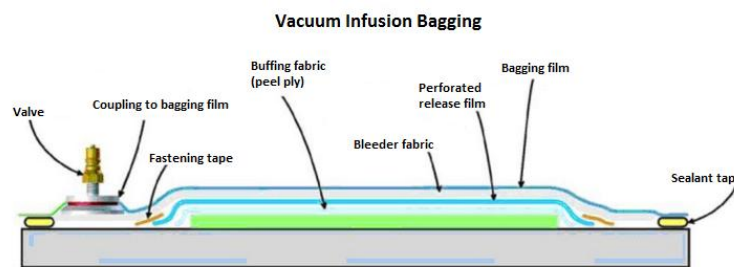
2.2.4 3D *print*

3D Printing atau disebut juga sebagai *additive manufacturing* merupakan proses untuk membuat objek dalam bentuk 3 dimensi atau bervolume yang dapat dilihat dan di sentuh dalam bentuk apapun dari model digital. Dimana dalam prosesnya lapisan demi lapisan dicetak diatas setiap lapisan lainnya dan dibawah kendali komputer. Langkah awal untuk menggunakan *3D print* yaitu dengan

merancang model objek 3 dimensi dengan menggunakan aplikasi *CAD* yang disimpan dalam format *.STL*. Kebanyakan teknologi *3D printing* berjalan dengan format file *.STL* (Mislán. & Mulyono, 2022).

2.2.5 *Vacuum bagging*

Vacuum bagging merupakan metode manufaktur komposit yang menggunakan tekanan *vacuum* untuk meningkatkan kualitas dan keseragaman produk komposit. Metode ini melibatkan penggunaan kantong *vacuum* untuk menekan material komposit sehingga resin dapat menyebar dan mengikat serat secara optimal. Salah satu keunggulan dari *vacuum bagging* yaitu dapat digunakan untuk memproduksi komponen dengan geometri kompleks (Abdurohman & Satrio, 2018).



Gambar 2-3 Metode *vacuum bagging*

2.2.6 Pengujian *Bending*

Pengujian *bending* adalah salah satu cara untuk menilai kualitas material secara visual. Selain itu, pengujian *bending* digunakan untuk mengukur kekuatan material dari pembebanan dan elastisitas spesimen. Pengujian *bending* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menguji sifat mekanik material dan struktur suatu spesimen dengan cara pemberian beban pada bagian tengah dari spesimen dan spesimen diletakkan pada dua tumpuan. Selama pengujian *bending* spesimen mengalami gaya tekan dan pada bagian bawah mengalami gaya tarik. (Maulana & Fernandes, 2024).



Gambar 2-4 Pengujian *bending*

Hasil dari pengujian akan berupa nilai tegangan *bending*, defleksi (perpindahan relatif pada ujung spesimen yang di tekuk) dan nilai beban maksimum. Dari data yang didapatkan kemudian diolah menggunakan perhitungan untuk mencari nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik, dengan persamaan rumus berikut :

- Tegangan maksimal

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

- Kekakuan *bending*

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

- Kekakuan *bending* spesifik

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

Keterangan :

E = Modulus elastisitas *bending* (N/mm²)

P = Beban yang diberikan (N)

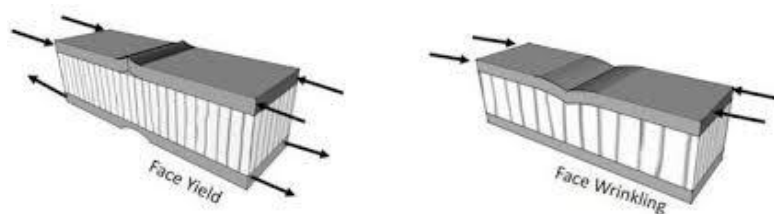
h = Tebal spesimen (mm)

b = lebar spesimen (mm)
W = Berat spesimen (gram)
L = Jarak antar titik tumpu (mm)
D = Kekauan *bending* (Nmm²)
I = Momen inersia (kgm)
 δ = Defleksi (mm)
 σ = Tegangan *bending* (Mpa)

2.2.7 Modus Kegagalan Pengujian *Bending* Komposit *Sandwich*

Menurut (Petras, 1998) terdapat beberapa mekanisme kegagalan yang berkaitan dengan struktur *honeycomb sandwich* komposit yaitu kegagalan yang terjadi pada *skin* dan *core*. Dimana kegagalan pada *skin* antara lain :

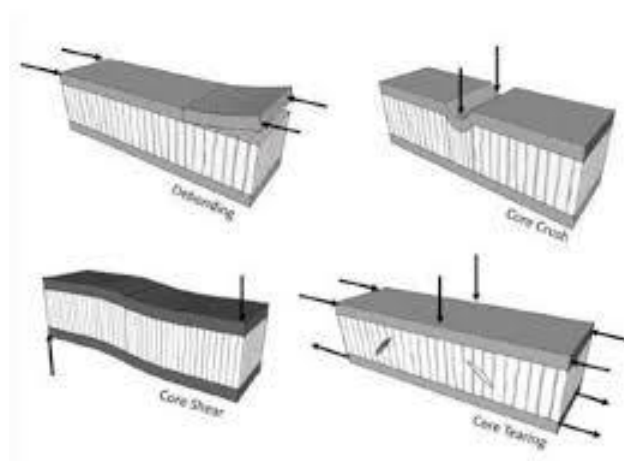
1. *Face yield* terjadi ketika tegangan normal memiliki nilai yang lebih besar dari tegangan luluh dan apabila material dari *skin* memiliki sifat getas. Kegagalan *face yield* dapat terjadi dibagian atas yang disebabkan bagian atas lebih rentan terhadap tegangan tekan.
2. *Face wrinkling* merupakan kegagalan pada *skin* yang akan dapat terjadi akibat adanya lekukan pada *skin* bagian atas akibat regangan tekan dan kurangnya dukungan dari *core* yang memiliki dimensi struktur atau densitas yang rendah. Lekukan pada *skin* dapat terjadi kearah inti maupun keluar tergantung dengan kekakuan inti dalam kompresi dan kekuatan perekat.



Gambar 2-5 Modus kegagalan *skin*

Selanjutnya, untuk modus kegagalan yang terjadi pada *core* terdapat 4 jenis diantaranya :

1. *Debonding* merupakan kegagalan yang terjadi akibat terlepasnya bagian *skin* dengan *core*.
2. *Core crush* merupakan kegagalan yang terjadi terhadap *core* karena deformasi pada bagian tengah *core* akibat tekanan dari pembebanan. Kegagalan ini dapat dilihat ketika bentuk spesimen pada *core* berubah bentuk berupa lekukan pada bagian yang diberi tegangan normal.
3. *Core shear* merupakan kegagalan pada *core* yang terjadi deformasi kearah vertikal disebabkan beban geser.
4. *Core tearing* merupakan salah satu bentuk kegagalan terhadap *core* pada komposit *sandwich* saat *core* patah akibat gabungan tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi.

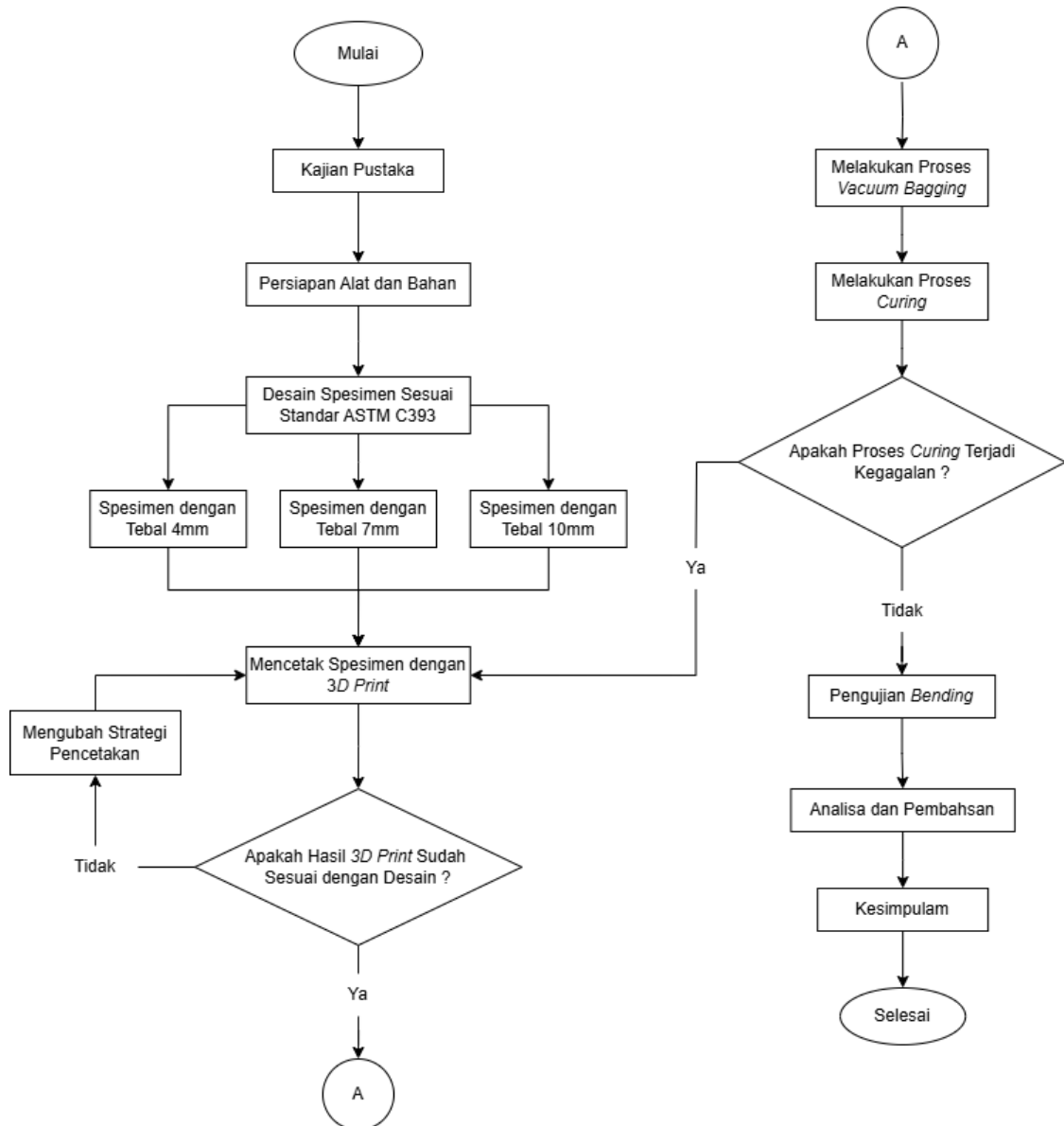


Gambar 2-6 Modus kegagalan *core*

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3-1 Alur Penelitian

3.2 Peralatan dan Bahan

1. 3D Printing

Alat yang digunakan untuk mencetak spesimen adalah mesin *3D Print* dengan merek *Flashforge* seri *Creator Pro* sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar 3-2.



Gambar 3-2 Mesin 3D Print *Flashforge Creator Pro*

2. Filamen ABS

Material yang digunakan untuk membuat bagian *core* pada spesimen menggunakan material *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) sesuai pada gambar 3-3.



Gambar 3-3 Filamen ABS

3. Vacuum pump

Vacuum pump seperti pada gambar 3-4 digunakan untuk menyedot udara pada bagian *vacuum bag* dan memberikan tekanan agar *vacuum bag* dapat menyusut mengikuti bentuk benda.



Gambar 3-4 *Vacuum Pump*

4. *Reservoir pot*

Alat *reservoir pot* seperti pada gambar 3-5 merupakan alat yang digunakan untuk menampung sisa resin dari cetakan agar sisa dari resin tidak tersedot langsung kedalam pompa yang dapat mengakibatkan kerusakan, selain itu alat ini berfungsi sebagai barometer pengukur tekanan yang terjadi dalam *vacuum bag*.



Gambar 3-5 *Reservoir Pot*

5. *Vacuum bag*

Vacuum bag seperti pada gambar 3-6 berfungsi sebagai peletakan dan penutup spesimen komposit pada saat proses *vacuum*. *Vacuum bag* juga berfungsi untuk mencegah adanya udara yang masuk pada saat proses *vacuum*.



Gambar 3-6 *Vacuum Bag*

6. Selang

Selang digunakan sebagai jalur keluar udara yang terdapat pada *vacuum bag* sehingga tidak tersisa udara didalam *vacuum bag*. Selang yang digunakan seperti pada gambar 3-7.



Gambar 3-7 Selang

7. Valve

Valve seperti pada gambar 3-8 berfungsi untuk menutup dan membuka jalur udara, *valve* juga digunakan untuk menjaga penyusutan *vacuum bag* agar mengikuti bentuk spesimen.



Gambar 3-8 Valve

8. *Sealant tape*

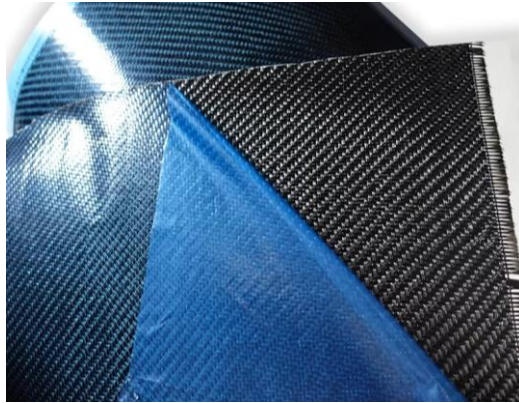
Sealant tape seperti pada gambar 3-9 merupakan perekat yang digunakan sebagai perekat pada *vacuum bag* agar tidak terjadi kebocoran udara yang dapat mengurangi tekanan didalam *vacuum bag*.



Gambar 3-9 Sealant Tape

9. Serat karbon *prepreg*

Skin yang digunakan pada spesimen menggunakan karbon *prepreg* 2x2 3k 200 gsm seperti pada gambar 3-10.



Gambar 3-10 Serat Karbon

10. Timbangan

Timbangan digunakan untuk mengukur berat setiap spesimen sebelum dan sesudah pelapisan serat karbon. Timbangan yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3-11.



Gambar 3-11 Timbangan

11. Jangka sorong

Jangka sorong seperti pada gambar 3-12 berfungsi untuk mengukur dimensi spesimen sebelum dan sesudah pelapisan serat karbon.



Gambar 3-12 Jangka Sorong

12. Gunting

Gunting seperti pada gambar 3-13 digunakan untuk memotong serat karbon, *vacuum bag*, selang, dan *sealant tape*.



Gambar 3-13 Gunting

13. Microwave

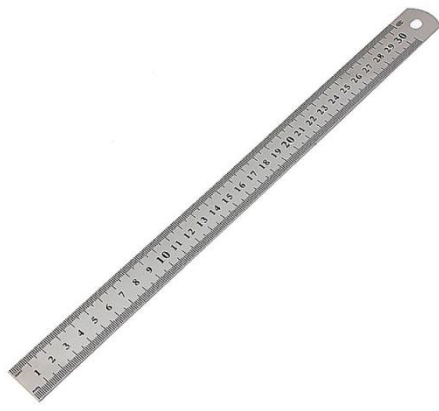
Microwave digunakan untuk memanaskan spesimen pada proses *curing*. *Microwave* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3-14.



Gambar 3-14 Microwave

14. Mistar

Mistar atau penggaris seperti pada gambar 3-15 berfungsi untuk mengukur dimensi panjang spesimen apabila jangka sorong tidak mencapai dimensi panjang spesimen sebelum dan sesudah pelapisan serat karbon.



Gambar 3-15 Mistar

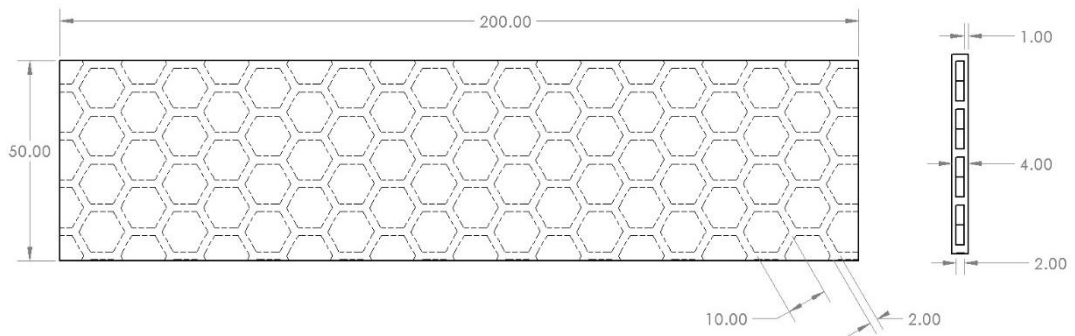
3.3 Perancangan

Pengujian *bending* dilakukan pada spesimen dengan struktur komposit *sandwich* menggunakan standar pengujian ASTM C393. Material yang digunakan pada *core* adalah ABS dengan infill 100% serta dengan *fill pattern hexagon*.

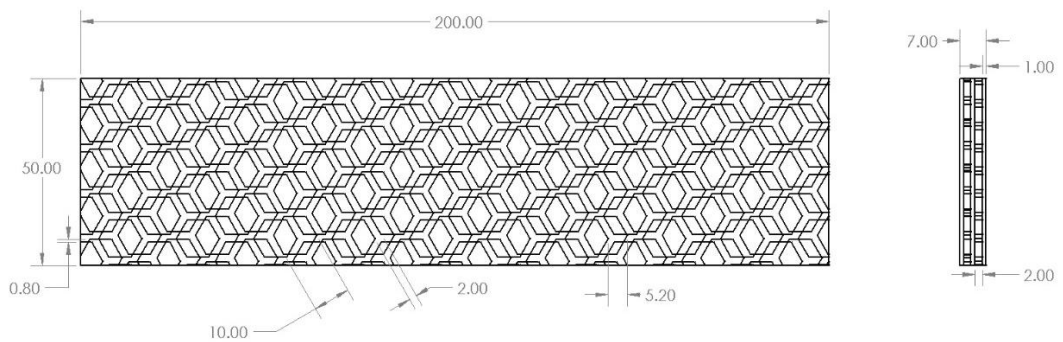
3.3.1 Dimensi Spesimen

Spesimen yang akan dibuat pada penelitian ini memiliki panjang 200 mm dan lebar 50 mm dengan tiga variasi ketebalan yang berbeda yaitu; spesimen

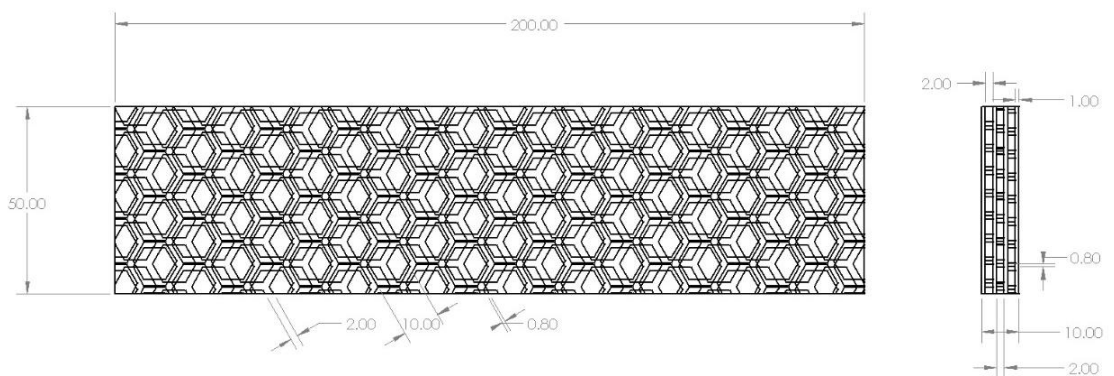
dengan tebal 4mm, spesimen dengan tebal 7 mm, dan spesimen dengan tebal 10 mm.



Gambar 3-16 Dimensi Spesimen Tebal 4 mm

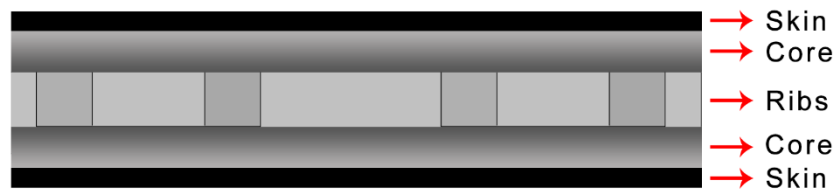


Gambar 3-17 Dimensi Spesimen Tebal 7 mm



Gambar 3-18 Dimensi Spesimen Tebal 10 mm

3.3.2 Susunan Lapisan Komposit *Sandwich*



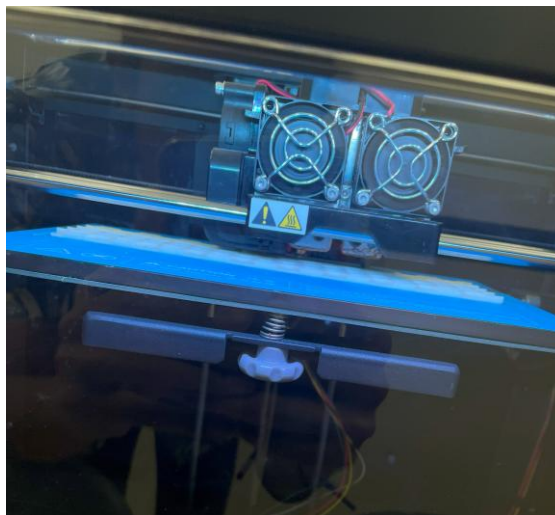
Gambar 3-19 Susunan Komposit

Susunan spesimen komposit *sandwich* yang akan dibuat terdiri dari tiga bagian yaitu *skin*, *core*, dan *ribs*. Pada bagian *skin* menggunakan karbon *prepreg* 1 *layer*. Pada bagian *ribs* dan *core* menggunakan material ABS dan dicetak dengan proses 3D *printing*. *Core* memiliki bentuk *honeycomb* yang memiliki enam sisi dalam bentuk *core* nya. *Ribs* dapat disebut dengan *core* karena menjadi satu kesatuan.

3.3.3 Proses Pembuatan Spesimen

Proses pembuatan spesimen terdiri dari beberapa langkah-langkah yang diawali dengan pembuatan spesimen *core* menggunakan mesin 3D *print*, kemudian dilanjutkan dengan proses pelapisan *skin* menggunakan serat karbon *prepreg* pada *core* dengan metode *vacuum bagging*, kemudian dilanjutkan dengan proses *curing*.

3.3.4 Pembuatan *Core* dengan 3D *Printing*



Gambar 3-20 Proses Pembuatan *Core*

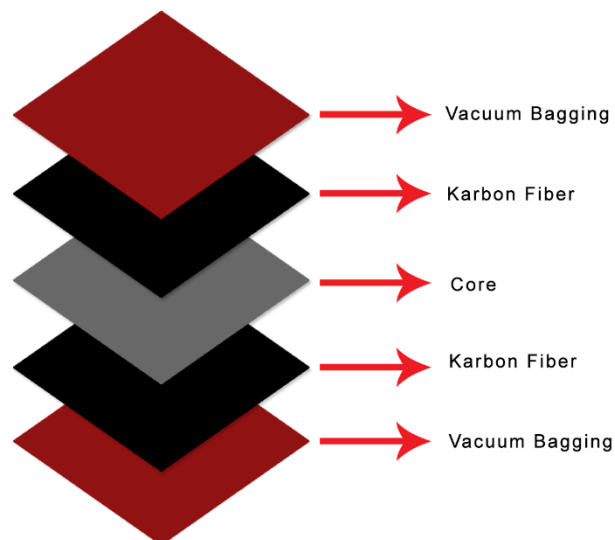
Proses pembuatan spesimen menggunakan mesin 3D *print* dengan material yang digunakan adalah ABS. Spesimen dibuat menggunakan dimensi sesuai standar pengujian *bending* ASTM C393. Dengan variasi ketebalan 4 mm, 7 mm, dan 10 mm.

Tabel 3-1 Parameter Pencetakan 3D *Print*

Bahan	ABS
Presentase <i>Infill</i>	100%
Suhu <i>bed</i>	80°
Suhu <i>nozzle</i>	240°
<i>Print speed</i>	100 mm/s

Parameter proses pencetakan 3D *Printing* seperti pada tabel 3-1, dimana material yang digunakan menggunakan ABS dengan *infill* 100%, dengan suhu *bed* 80°, suhu *nozzle* 240°, dan dengan *print speed* 100 mm/s.

3.3.5 Proses Vacuum Bagging



Gambar 3-21 Skema Lapisan *Vacuum Bagging*

Dapat dilihat pada gambar 3-21 skema lapisan *vacuum bagging* menunjukkan urutan lapisan-lapisan yang digunakan dalam proses *vacuum bagging*, dimana *vacuum bag* merupakan lapisan terluar kemudian dilanjutkan dengan

lapisan *skin* berupa serat karbon *prepreg* sebanyak satu lapis yang telah menempel dengan *core*. Dan selanjutnya akan dilakukan proses *vacuum bagging*.

Adapun langkah-langkah dalam pengerjaan proses *vacuum bagging*, sebagai berikut :

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan pada proses *vacuum bagging*.



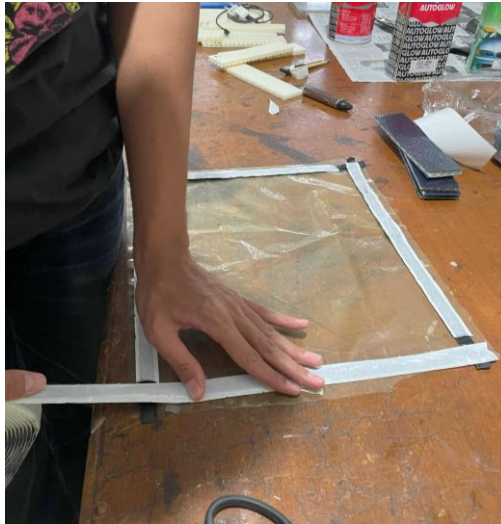
Gambar 3-22 Persiapan Alat dan Bahan

2. Menyiapkan *vacuum bag* sebagai alas dan penutup sesuai ukuran yang dibuat dapat diletakan empat spesimen secara bersamaan.



Gambar 3-23 Persiapan Vacuum bag

3. Menempelkan *sealant tape* pada *vacuum bag* dan memastikan tidak ada kebocoran saat penempelan *sealant tape*.



Gambar 3-24 Penempelan *Sealant Tape*

4. Menempelkan serat karbon *prepreg* pada *core*.



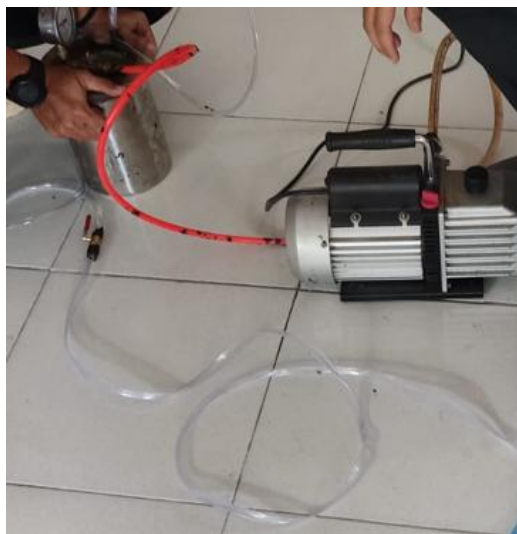
Gambar 3-25 Penempelan Serat Karbon *Prepreg*

5. Meletakkan spesimen diatas *vacuum bag* dan pada bagian dalam *sealant tape*
6. Menutup seluruh area spesimen dengan menggunakan *vacuum bag* dan menempelkan *vacuum bag* penutup dengan *vacuum bag* alas serta memastikan tidak ada kebocoran pada saat penempelan *vacuum bag* bagian alas dan *vacuum bag* bagian penutup.



Gambar 3-26 Penutupan Spesimen dengan *Vacuum Bag*

7. Melakukan proses *vacuum* dan memastikan udara didalam *vacuum bag* tidak ada serta memastikan *vacuum bag* menekan spesimen dengan sempurna dan kemudian didiamkan selama 24 jam.



Gambar 3-27 Proses *Vacuum*

3.3.6 Proses *curing*

Seperti pada gambar 3-25 merupakan proses *curing* spesimen, dimana setiap spesimen dipanaskan dengan suhu 80° dengan waktu 8 jam. Titik leleh material ABS yaitu 90°C-120°C dan suhu ideal untuk karbon *prepreg* yaitu 130°C dijadikan perbandingan untuk menentukan suhu dan waktu *curing* pada penelitian ini. Sehingga pada penelitian ini menggunakan suhu 80° dengan penambahan waktu 8 jam *curing*.



Gambar 3-28 Proses *Curing*

3.4 Proses Pengujian *Bending*

Pengujian *bending* dilakukan sesuai dengan standar ASTM C393 menggunakan mesin uji *bending*. Adapun langkah-langkah dalam melakukan proses pengujian *bending*, sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen yang ingin di uji.
2. Mengukur kembali dimensi panjang, lebar, dan tebal dari setiap spesimen menggunakan jangka sorong.
3. Menyiapkan mesin uji *bending* dengan mengatur jarak antar titik tumpuan berjarak 100 mm dan mengatur pengambilan grafik.
4. Meletakkan spesimen uji pada tumpuan tepat pada titik tengah serta sesuai dengan jarak antara titik tumpuan.
5. Memulai pengujian *bending* dengan memberikan beban maksimal pada bagian tengah spesimen secara perlahan hingga spesimen mengalami kegagalan.
6. Mesin akan mencatat hasil nilai beban maksimal yang diberikan dan membuat grafik beban terhadap defleksi yang terjadi.
7. Periksa modus kegagalan yang terjadi pada spesimen.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengerjaan



Gambar 4-1 Hasil Setelah *Vacuum Bagging*

Dapat dilihat pada gambar 4-1 merupakan hasil spesimen setelah dilapisi *skin* karbon *prepreg* dan telah melewati proses *vacuum bagging*. Setelah itu spesimen diukur lebar, berat, dan ketebalan menggunakan jangka sorong.

Tabel 4- 1 Hasil Pengukuran Spesimen

No	Variasi spesimen	Tebal awal	Tebal akhir	Lebar awal	Lebar akhir	Berat awal	Berat akhir
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(gram)	(gram)
1	E1 (4 mm)	4,18	4,72	50,8	50,51	28	36
2	E2 (4 mm)	4,20	4,63	50,34	50,75	28	36
3	E3 (4 mm)	4,18	4,56	50,5	50,90	28	36
4	D1 (7 mm)	7,18	7,72	50,4	52,47	45	53
5	D2 (7 mm)	7,10	7,46	50,4	51,23	45	53
6	D3 (7 mm)	7,18	7,75	50,5	53,82	45	53
7	B1 (10 mm)	10,14	10,53	50,4	51,54	62	69
8	B2 (10 mm)	10,00	10,55	50,8	51,02	62	69
9	B3 (10 mm)	10,10	10,61	50,5	51,76	62	69

Sesuai pada tabel 4-1 merupakan hasil pengukuran spesimen, Data yang didapatkan digunakan untuk mencari nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik.

4.2 Hasil Pengujian

Pengujian *bending* yang dilakukan pada spesimen uji merupakan pengujian *bending* untuk mengetahui nilai kekakuan *bending* dari total 9 spesimen yang dibagi menjadi 3 jenis ketebalan. Pengujian dilakukan di laboratorium Bahan Teknik UGM sesuai standar ASTM C393 dengan menggunakan *threepoint bending* pada mesin *universal testing machine* yang dapat dilihat pada gambar 4-2.



Gambar 4-2 *Universal Testing Machine*

Berdasarkan hasil pengujian *bending* yang dilakukan pada spesimen uji didapatkan hasil data berupa nilai beban maksimal, nilai defleksi, dan nilai tegangan *bending* dapat dilihat pada tabel 4-2 serta grafik beban berbanding defleksi dari setiap spesimen.

Tabel 4-2 Hasil Pengujian *Bending*

No.	Variasi Spesimen	Tebal	Lebar	Pmax	Defleksi	Tegangan <i>Bending</i>
		(mm)	(mm)	(KN)	(mm)	(MPa)
7	E1	4,72	50,51	0,77	4,30	102,64
8	E2	4,63	53,75	0,71	3,35	92,43
9	E3	4,56	52,90	0,52	9,52	70,91
4	D1	7,72	52,47	2,40	6,49	115,12
5	D2	7,46	51,23	1,31	9,14	68,92
6	D3	7,75	53,82	1,16	6,14	53,83
1	B1	10,53	51,54	1,70	2,31	44,62
2	B2	10,55	51,02	2,18	7,96	57,58
3	B3	10,61	51,76	1,79	6,30	46,08

Berdasarkan data sesuai pada tabel 4-2 dapat dilihat bahwa spesimen dengan kode E yang memiliki ketebalan 4 mm memiliki rata-rata tegangan *bending* tertinggi, dan pada spesimen dengan kode B yang memiliki ketebalan 10 mm memiliki rata-rata beban maksimal tertinggi. Nilai tegangan *bending* terbesar terdapat pada material dengan kode D1 yang memiliki ketebalan 7 mm sebesar 115,12 Mpa. Nilai beban maksimal tertinggi terdapat pada spesimen dengan kode D1 yang memiliki ketebalan 7 mm sebesar 2,40 KN.

4.3 Analisis Kegagalan Spesimen

Berikut ini adalah hasil analisis kegagalan yang terjadi pada setiap spesimen berdasarkan pengamatan langsung.

1. Spesimen E1 (4 mm)

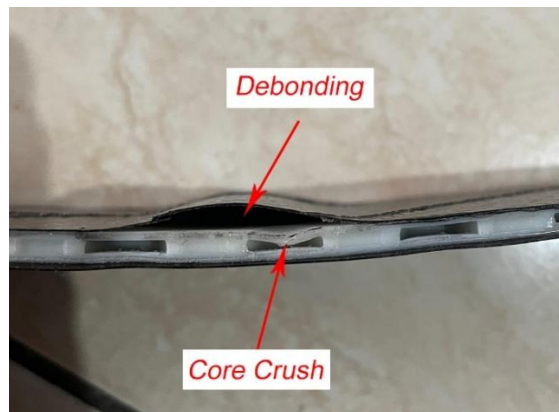
Spesimen E1 seperti pada gambar 4-1 terlihat mengalami kegagalan *debonding* pada bagian *skin* yang menyebabkan bagian *skin* terangkat, lalu terjadi kegagalan *face wrinkling* dimana terjadi kerutan pada bagian *skin* akibat fenomena tekukan yang terjadi pada spesimen



Gambar 4-3 Modus Kegagalan Spesimen B2

2. Spesimen E2 (4 mm)

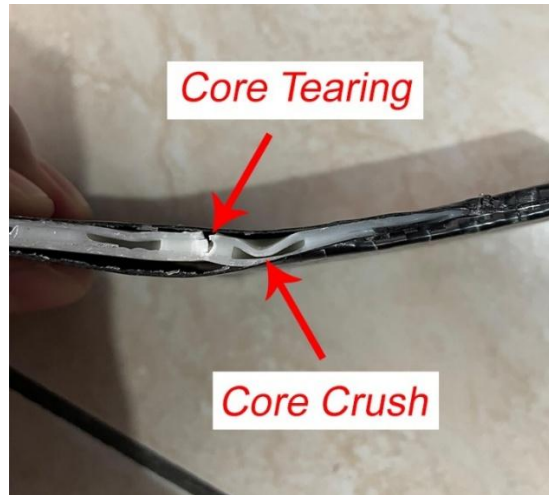
Seperti pada gambar 4-4 sepesimen E2 mengalami kegagalan *debonding* dan *core crush* dimana spesimen berubah bentuk berupa lekukan akibat tekanan dari pembebanan.



Gambar 4-4 Modus Kegagalan Spesimen E2

3. Spesimen E3 (4 mm)

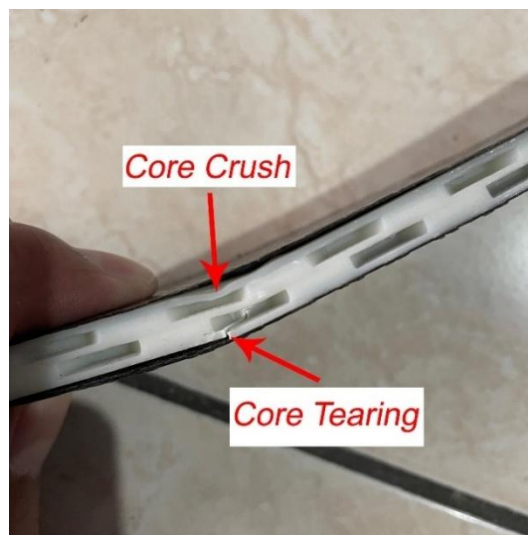
Spesimen E3 seperti pada gambar 4-5 mengalami kegagalan *core tearing* akibat beban tekan pada bagian atas spesimen yang menyebabkan patahan pada *core*. Lalu terjadi *core crush* akibat tekanan dari pembebanan yang diberikan pada spesimen yang menyebabkan *core* berubah bentuk berupa lekukan.



Gambar 4-5 Modus Kegagalan Spesimen E3

4. Spesimen D1 (7 mm)

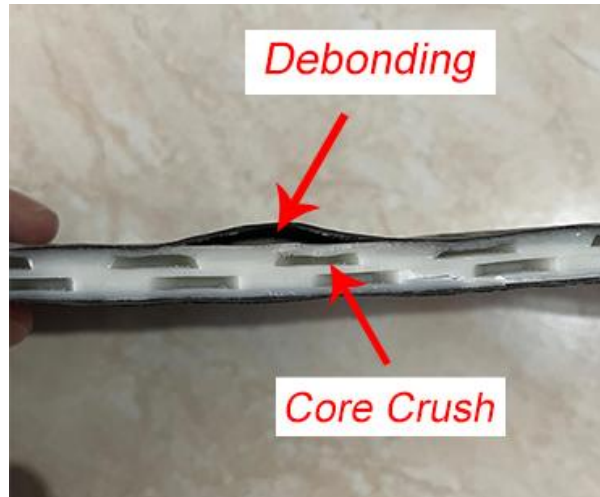
Seperti pada gambar 4-6 spesimen D1 mengalami kegagalan *core tearing* pada bagian bawah *core* akibat beban tekan pada bagian atas spesimen yang menyebabkan bagian bawah pada *core* mengalami tegangan tarik sehingga terjadi patahan pada bagian bawah *core*. Lalu terjadi *core crush* akibat tekanan dari pembebanan yang diberikan pada spesimen yang menyebabkan *core* berubah bentuk berupa lekukan.



Gambar 4-6 Modus Kegagalan Spesimen D1

5. Spesimen D2 (7 mm)

Seperti pada gambar 4-7 spesimen D2 mengalami kegagalan *debonding* dimana *skin* terlepas dengan *core*. Lalu terjadi *core crush* dimana *core* berubah bentuk berupa lekukan akibat tekanan dari pembebanan.



Gambar 4-7 Modus Kegagalan Spesimen D2

6. Spesimen D3(7 mm)

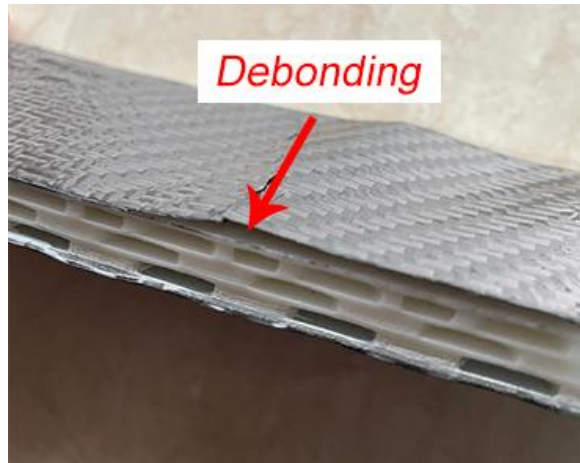
Sepesimen D3 seperti pada gambar 4-8 mengalami kegagalan *debonding* dimana *skin* terlepas dengan *core*.



Gambar 4-8 Modus Kegagalan Spesimen D3

7. Spesimen B1(10 mm)

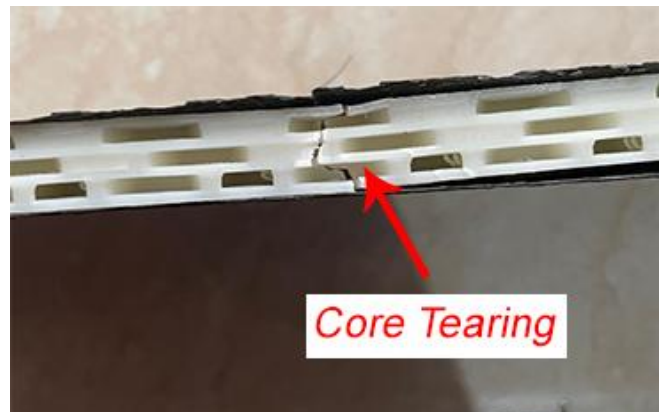
Sepesimen B1 seperti pada gambar 4-9 mengalami kegagalan *debonding* dimana *skin* terlepas dengan *core*.



Gambar 4-9 Modus Kegagalan Spesimen B1

8. Spesimen B2 (10mm)

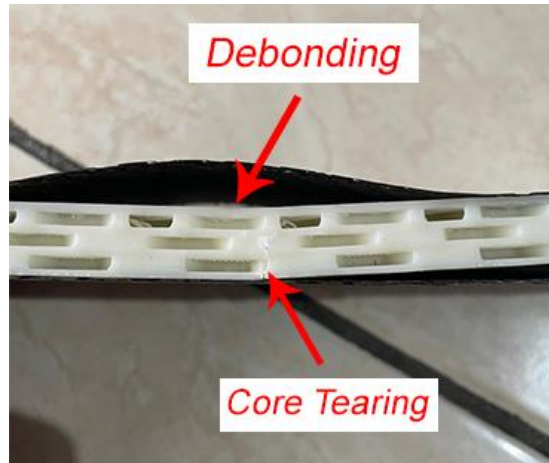
Spesimen B2 seperti pada gambar 4-10 mengalami kegagalan *core tearing* akibat beban tekan pada bagian atas spesimen yang menyebabkan patahan pada *core*.



Gambar 4-10 Modus Kegagalan Spesimen B2

9. Spesimen B3 (10 mm)

Spesimen B2 seperti pada gambar 4-11 mengalami kegagalan *core tearing* akibat beban tekan pada bagian atas spesimen yang menyebabkan patahan pada *core*. Lalu terjadi *debonding* dimana *skin* terlepas dengan *core*.



Gambar 4-11 Modus Kegagalan Spesimen B3

4.4 Perhitungan

Berdasarkan data yang didapatkan dari hasil pengujian *bending*, kemudian data dapat diolah untuk mencari nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik dari setiap spesimen menggunakan persamaan 2.1, 2.2, dan 2.3 yang terdapat pada bab 2.

Tabel 4-3 Hasil Perhitungan Spesimen

Kode Spesimen	Berat (Gram)	Defleksi (mm)	Tegangan Bending (MPa)	Kekakuan Bending ($N. mm^2$)	Rerata Kekakuan Bending ($N. mm^2$)	Kekakuan Bending Spesifik ($N. mm^2 / gram$)	Rerata Kekakuan Bending Spesifik ($N. mm^2 / gram$)
E1 (4 mm)	28	4,30	102,64	10.168.651	10.023.900,54	363.166,10	357.996,45
E2 (4 mm)	28	3,35	92,43	13.008.721		464.597,18	
E3 (4 mm)	28	9,52	70,91	6.894.330		246.226,07	
D1 (7 mm)	45	6,49	115,12	16.767.473	12.424.682,99	372.610,51	276.104,07
D2 (7mm)	45	9,14	68,92	9.245.315		205.451,44	
D3 (7 mm)	45	6,14	53,83	11.261.261		250.250,25	
B1 (10 mm)	69	2,31	44,62	17.192.557	15.283.361,03	249.167,49	221.497,99
B2 (10 mm)	69	7,96	57,58	17.397.837		252.142,56	
B3 (10 mm)	69	6,30	46,08	11.259.690		163.183,91	

Hasil perhitungan yang telah diolah dapat dilihat seperti pada tabel 4-3 diatas dan didapatkan bahwa spesimen dengan tebal 10 mm memiliki nilai rata-rata kekakuan *bending* tertinggi sebesar 15.283.361,03 N.mm² dan spesimen dengan tebal 4 mm memiliki rata-rata kekakuan *bending* spesifik tertinggi sebesar 357.996,45 N.mm²/gram

4.5 Pembahasan

Dari hasil data yang telah didapatkan pada pengujian *bending* yang telah dilakukan kemudian diolah untuk mendapatkan nilai kekakuan *bending* dan *bending* spesifik. Dari hasil pengolahan tersebut, data-data yang didapat kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya yang berjudul “pengaruh struktur zig-zag *honeycomb ribs* terhadap kekuatan *bending* spesimen komposit *polylactic acid (PLA) – carbon fiber*”

Pada penelitian sebelumnya, spesimen menggunakan struktur *non sandwich* dengan tebal 10 mm menggunakan material PLA dan hanya memiliki dua tingkat *ribs honeycomb*. Oleh karena itu pada penelitian ini menggunakan struktur *sandwich* dengan material ABS serta memvariasikan ketebalan spesimen yaitu, 10 mm, 7 mm, dan 4 mm.

Tabel 4-4 Data Spesimen Penelitian Sebelumnya

Kode Spesimen	Tegangan <i>Bending</i> (MPa)	Kekakuan <i>Bending</i> (N.mm ²)	Rerata Kekakuan <i>Bending</i> (N.mm ²)	Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik (N.mm ² /gram)	Rerata Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik (N.mm ² /gram)
C1	16,74	9.791.667	9.560.185	153.474	153.377
C2	20,08	8.611.111		143.519	
C3	18,07	10.277.778		163.139	

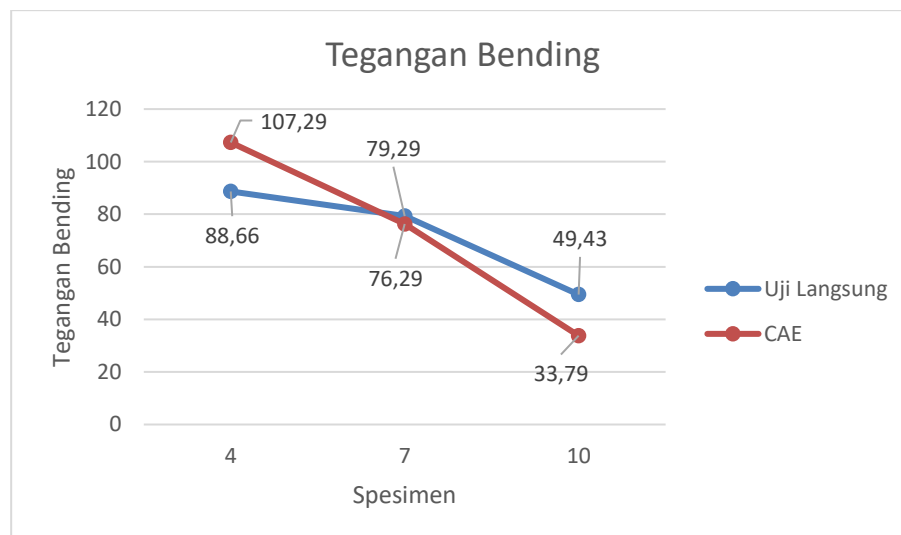
Pada tabel 4-4 diatas menunjukkan data spesimen dari penelitian sebelumnya dimana spesimen memiliki rata-rata kekakuan *bending* sebesar 9.560.185 N.mm² dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 153.377 N.mm²/gram.

Sebagai pembandingan pada penelitian ini juga melakukan pengujian *bending* melalui *CAE* pada setiap spesimen, hasil pengujian *bending* melalui *CAE* dapat dilihat pada tabel 4-5 dibawah ini.

Tabel 4-5 Hasil Pengujian *CAE*

Kode spesimen	Defleksi	Tegangan <i>Bending</i> (MPa)	Kekakuan <i>Bending</i> (N.mm ²)	Kekakuan <i>Bending</i> spesifik (N.mm ² /gram)
E (4 mm)	148	107,29	8.711.522,12	311.125,79
D (7 mm)	7,73	76,29	11.820.120,70	262.669,35
B (10 mm)	4,04	33,79	17.200.301,74	249.279,74

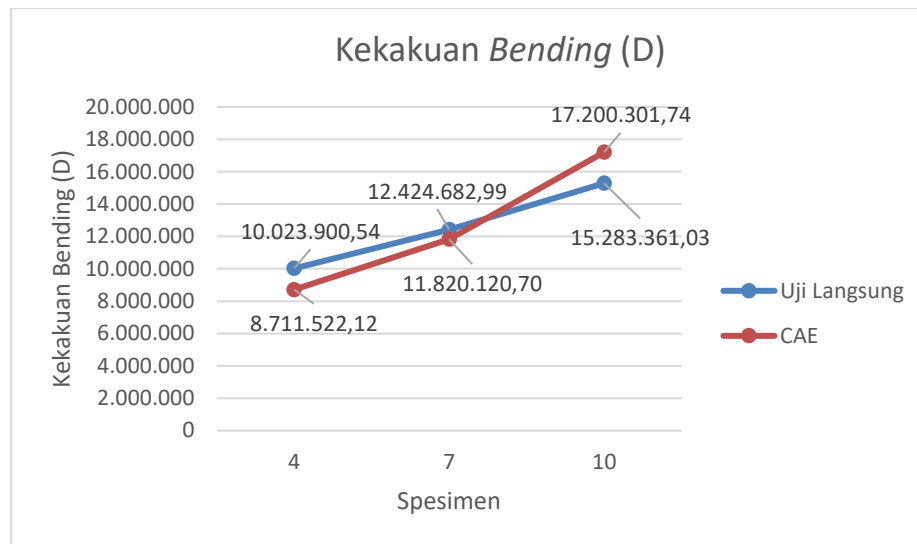
4.5.1 Tegangan *Bending*



Gambar 4-12 Grafik Tegangan *Bending*

Sesuai pada gambar 4-12 menunjukkan grafik perbandingan nilai tegangan *bending* antara pengujian langsung dan *CAE* dari tiga jenis variasi spesimen. Pada grafik dapat diketahui pada pengujian langsung terjadi penurunan nilai tegangan *bending* setiap bertambahnya tebal spesimen. Hal ini sejalan dengan grafik yang ditunjukkan pada nilai tegangan *bending* yang di dapat dari hasil pengujian *CAE* . Nilai tegangan *bending* tertinggi dari pengujian langsung terdapat pada spesimen dengan tebal 4 mm sebesar 88,66 MPa dan pada *CAE* terdapat pada spesimen dengan tebal 4 mm sebesar 107,29 MPa.

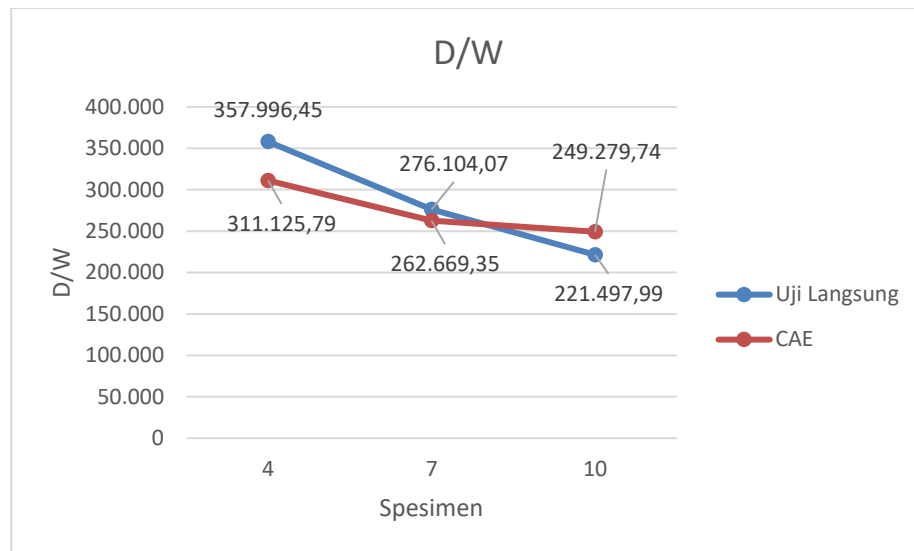
4.5.2 Kekakuan *Bending*



Gambar 4-13 Grafik Kekakuan *Bending*

Sesuai pada gambar 4-13 menunjukkan grafik perbandingan nilai kekakuan *bending* antara pengujian langsung dan *CAE* dari tiga jenis variasi spesimen. Pada grafik dapat diketahui pada pengujian langsung dan pengujian *CAE* terjadi peningkatan nilai kekakuan *bending* setiap bertambahnya tebal spesimen. Nilai kekakuan *bending* tertinggi dari pengujian langsung terdapat pada spesimen dengan tebal 10 mm sebesar 15.283.361.03 N.mm² dan pada *CAE* terdapat pada spesimen dengan tebal 10 mm sebesar 17.200.301,74 N.mm².

4.5.3 Kekakuan *Bending* Spesifik



Gambar 4-14 Grafik Kekakuan *Bending* Spesifik

Sesuai pada gambar 4-14 menunjukkan grafik perbandingan nilai kekakuan *bending* spesifik antara pengujian langsung dan *CAE* dari tiga jenis variasi spesimen. Pada grafik dapat diketahui pada pengujian langsung terjadi penurunan nilai kekakuan *bending* spesifik setiap bertambahnya tebal spesimen. Hal ini sejalan dengan grafik yang ditunjukkan pada nilai kekakuan *bending* spesifik yang di dapat dari hasil pengujian *CAE*. Nilai kekakuan *bending* spesifik tertinggi dari pengujian langsung terdapat pada spesimen dengan tebal 4 mm sebesar 357.996.45 N.mm²/gram dan pada *CAE* terdapat pada spesimen dengan tebal 4 mm sebesar 311.125.79 N.mm²/gram.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai “Pengaruh Ketebalan Struktur Bertingkat Diskontinu *Honeycomb Core* Terhadap Kekakuan *Bending* Material Komposit Serat Karbon *Sandwich* dan ABS” dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

- Spesimen dengan ketebalan 10 mm menunjukkan nilai rata-rata kekakuan *bending* tertinggi sebesar 15.283.361,03 N.mm², diikuti oleh spesimen dengan ketebalan 7 mm dan 4 mm. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan spesimen berpengaruh terhadap peningkatan kekakuan *bending*.
- Spesimen dengan ketebalan 4 mm memiliki kekakuan *bending* spesifik tertinggi sebesar 357.996,45 N.mm²/gram. Spesimen ini menunjukkan keunggulan struktur yang lebih baik untuk pengaplikasian yang membutuhkan kekuatan tinggi dengan bobot ringan.
- Selama pengujian *bending*, ditemukan beberapa jenis kegagalan pada spesimen, antara lain *debonding*, *face wrinkling*, *core crush*, dan *core tearing*. Jenis kegagalan ini bervariasi tergantung ketebalan spesimen, di mana spesimen tipis lebih banyak mengalami *core crush*, disebabkan karena gaya tekan dibagian atas lebih cepat menyebar ke seluruh area *core* karena jarak antar *skin* dekat. Sedangkan spesimen tebal cenderung mengalami *core tearing*, disebabkan karena bagian atas *core* menahan gaya tekan sementara bagian bawah *core* mengalami gaya tarik maksimum.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, yaitu :

1. Karbon prepreg harus tetap menggunakan lem ALF untuk perekatannya.
2. Setiap proses pembuatan spesimen perlu memperhatikan prosedur keamanan dan penggunaan sesuai dengan K3.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurohman, K., & Satrio, T. (2018). A Comparison Process Between Hand lay-up, Vacuum Infusion and Vacuum Bagging Method Toward e-glass EW 185/lycal Composites. *Journal Of Physics*, 3.
- Anwar, A. (2024). *Pengaruh Struktur Zig-zag Honeycomb Ribs Terhadap Kekuatan Bending Spesimen Komposit Polylactic Acid (PLA) - Carbon Fiber*. Tugas akhir.
- Diharjo, K. (2011). Kekuatan Bending Komposit Sandwich Serat Gelas dengan Core Divinycell-pvc h-60 (Pengaruh Orientasi Serat, Jumlah Laminat dan Tebal Core Terhadap Kekuatan Bending). *Mekanika*, 314.
- Hidayat, A., Yudo, H., & Manik, P. (2016). Analisa Teknis Komposit Sandwich Berpenguat Serat Daun Nanas Core Serbuk Gergaji Kayu Sengon Laut Ditinjau Dari Kekuatan Tekuk dan Impak. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 266.
- Ikhsanto, N. L., & Zainuddin. (2020). Analisa Kekuatan Bending Filamen ABS dan PLA pada Hasil 3D Printer dengan variasi Suhu Nozzle. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*.
- Jones, R. M. (1998). *Mechanics Of Composite Materials Second Edition*. Blacksburg: CRC Press.
- Lengsfeld, H., & Fabris, F. W. (2016). *Composite Technology (Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies)*. Cincinnati: Hanser Publication.
- Marsono, A. N. (2019). Karakteristik Mekanik Panel Honeycomb Sandwich berbahan Komposit Fiberglass dengan Dimensi Cell-Pitch 40mm dan Cell-Height 30mm. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 108.
- Maulana, F., & Fernandes, D. (2024). Perbandingan Kekuatan Bending Material Komposit Penguat Carbon Fiber Dengan Hasil Metode Pembuatan Vacuum Infusion Dan Manual Hand Lay-Up. *MSI Transaction on Education*.
- Mislan., & Mulyono, S. (2022). Potensi 3d Printing Sebagai Media Edukasi Dalam Pendidikan Keperawatan. *Journal Cakrawala Ilmiah*, 903.

- Mustiana., & Rida, H. (2014). Pengaruh Variasi Ketebalan Core Terhadap Karakteristik Bending Komposit Sandwich Serat Cantula dengan Core Honeycomb Kardus Tipe A-flute. *Jurnal Nosel*.
- Nayiroh, N. (2013). Teknologi Material Komposit. *Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim*.
- Petras, A. (1998). Design of Sandwich Structures. *Cambridge University Engineering Department*, 13.
- Prayoga, A., Eryawanto, B., & Hadi, Q. (2018). Pengaruh Ketebalan Skin Terhadap Kekuatan Bending Dan Tarik Komposit Sandwich Dengan Honeycomb Polypropylene Sebagai Core. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 24.
- Rodiawan, S. F. (2016). Analisa Sifat-Sifat Serat Alam Sebagai Penguat Komposit Ditinjau dari kekuatan mekanik. *Jurnal Teknik Mesin Univ. Muhammadiyah Metro*, 39.
- Yani., & lubis, F. (2018). Pembuatan dan Penyelidikan Perilaku Mekanik Komposit Diperkuat Serat Limbah Plastik Akibat Beban Lendutan. *Mekanik*, 77.

LAMPIRAN



LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN BENDING

No.	Variasi Spesimen	Tebal	Lebar	Pmax	Defleksi	Tegangan
		(mm)	(mm)	(KN)	(mm)	Bending (MPa)
1	A_1	10.18	50.80	0.80	5.86	22.79
2	A_2	10.07	50.58	0.83	5.27	24.27
3	A_3	10.26	50.52	0.79	5.51	22.28
4	B_1	10.53	51.54	1.70	2.31	44.62
5	B_2	10.55	51.02	2.18	7.96	57.58
6	B_3	10.61	51.76	1.79	6.30	46.08
7	C_1	10.23	51.36	1.55	2.51	43.26
8	C_2	10.48	52.81	2.30	8.56	59.48
9	C_3	10.51	51.11	2.34	8.62	62.17
10	D_1	7.72	52.47	2.40	6.49	115.12
11	D_2	7.46	51.23	1.31	9.14	68.92
12	D_3	7.75	53.82	1.16	6.14	53.83
13	E_1	4.72	50.51	0.77	4.30	102.64
14	E_2	4.63	53.75	0.71	3.35	92.43
15	E_3	4.56	52.90	0.52	9.52	70.91

Lembar asli, tidak untuk digandakan

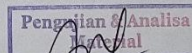
Keterangan:

1. Pengujian dilakukan tanggal 11 Oktober 2023
2. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine
3. Standar spesimen menggunakan ASTM C393

Identitas Penguji :

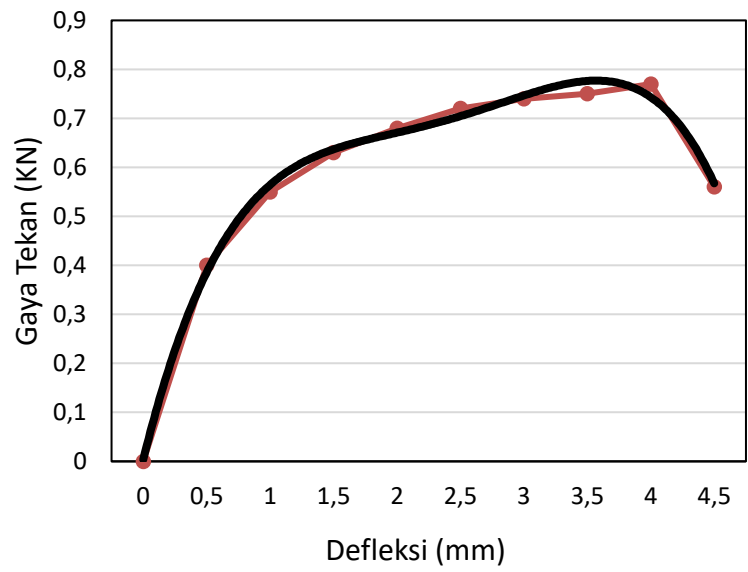
Nama : Abdullah Faqih
NIM : 19525148
Institusi : Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 11 Oktober 2023
Staf Laboratorium Bahan Teknik

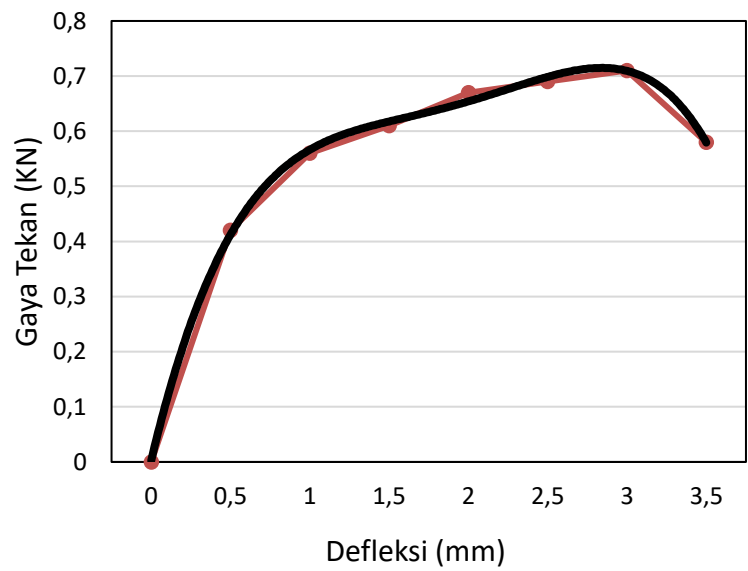


Dr. Lilik Dwi Saryana, S.T., M.T.
NIP. 197703312002121002

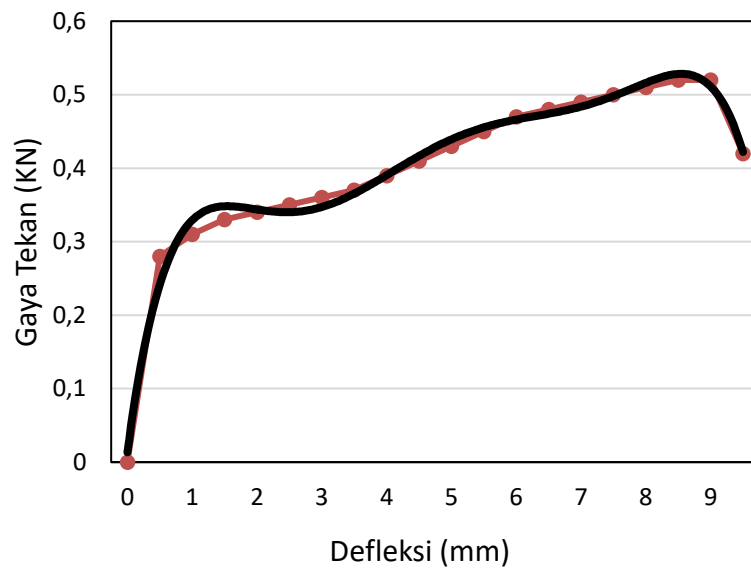
Spesimen E1



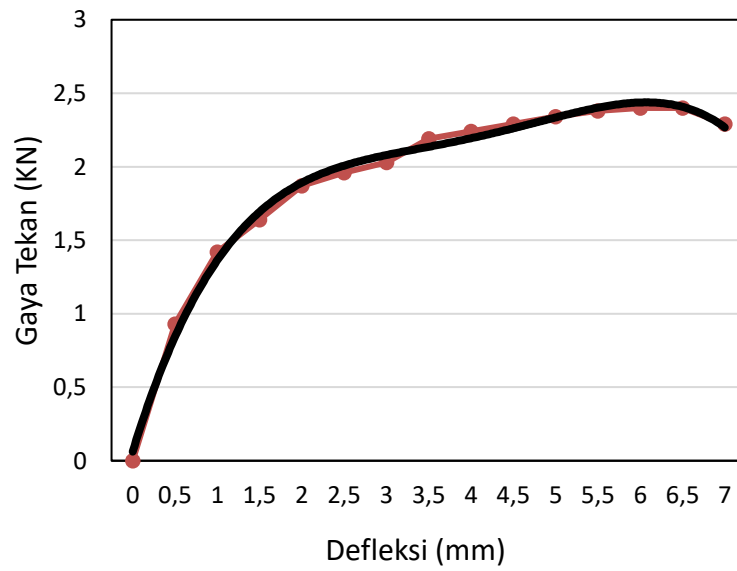
Spesimen E2



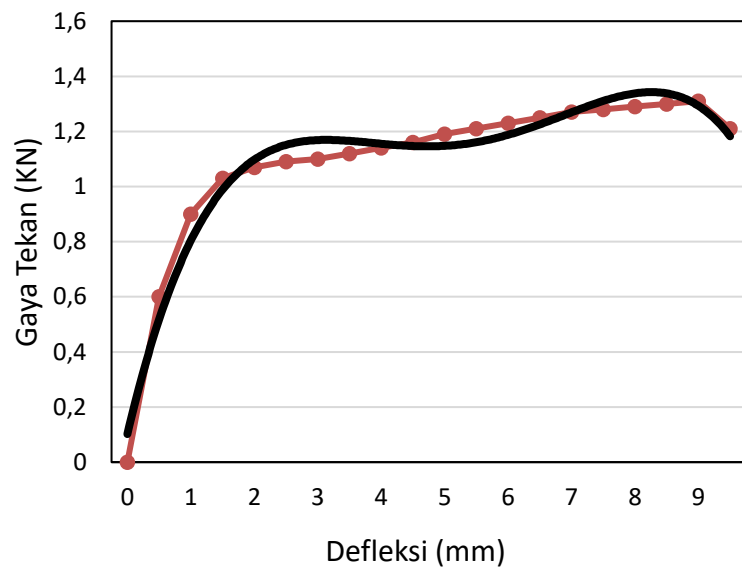
Spesimen E3



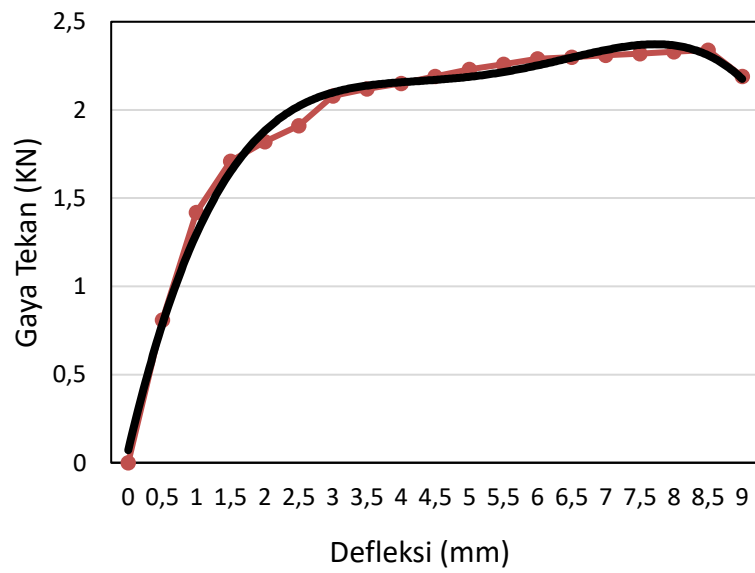
Spesimen D1



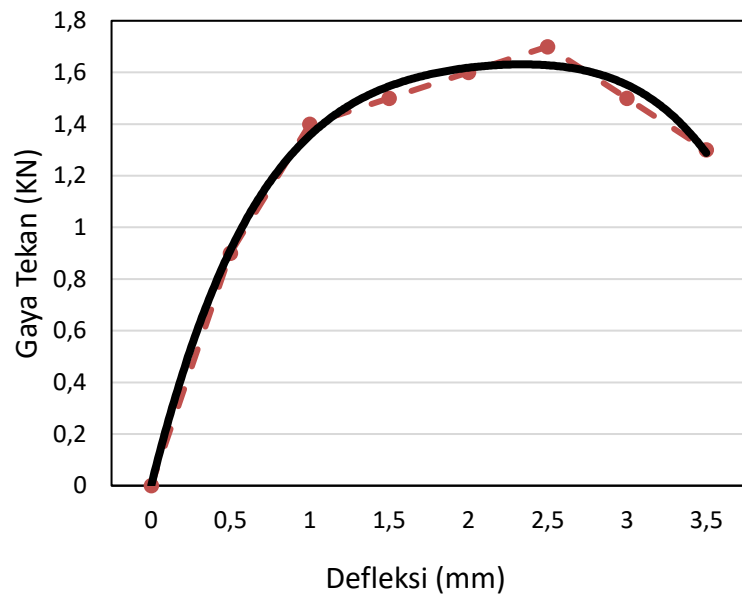
Spesimen D2



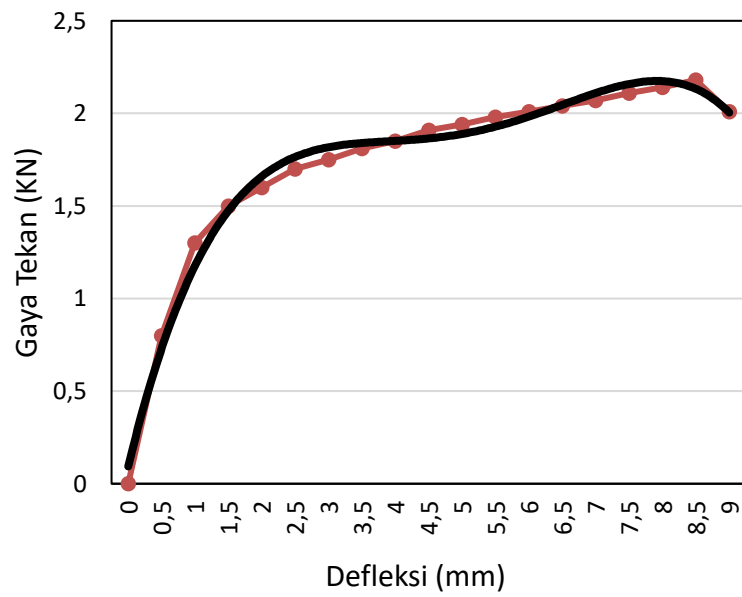
Spesimen D3



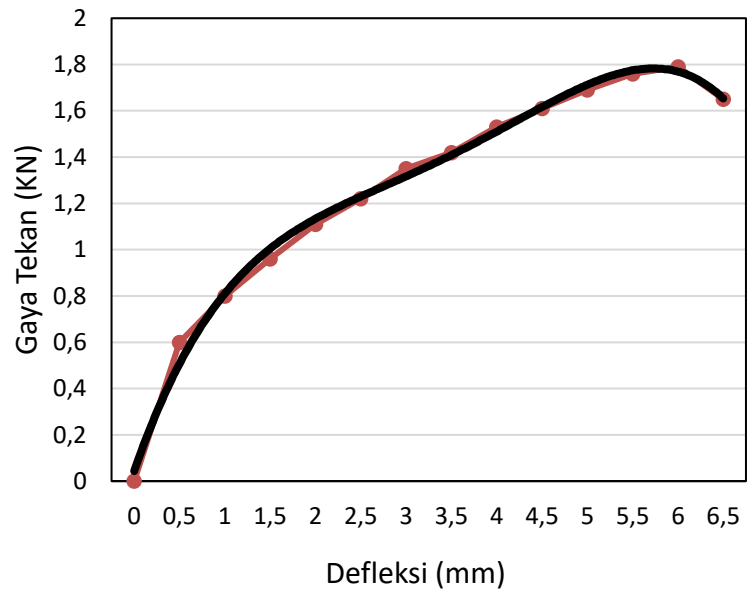
Spesimen B1

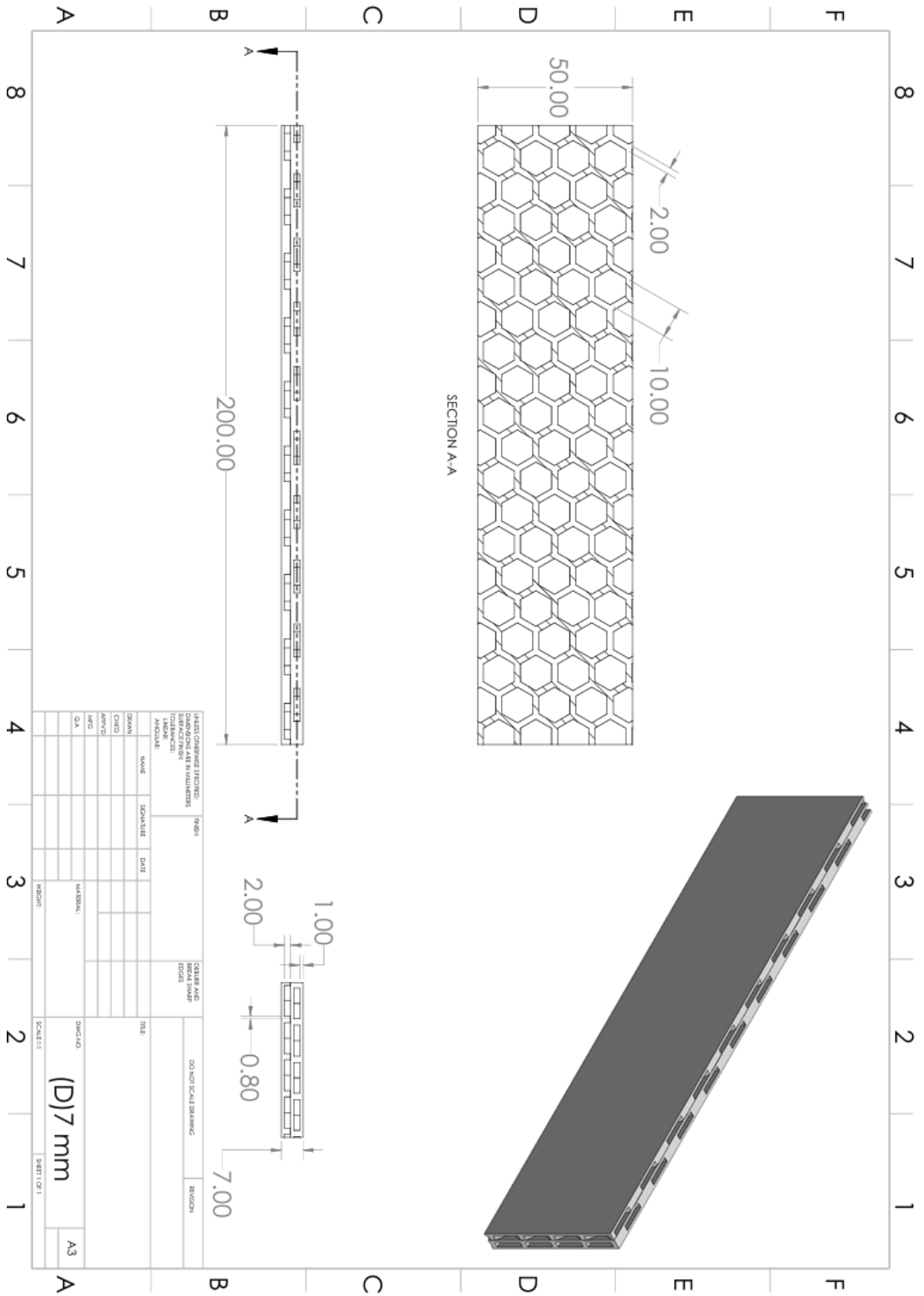


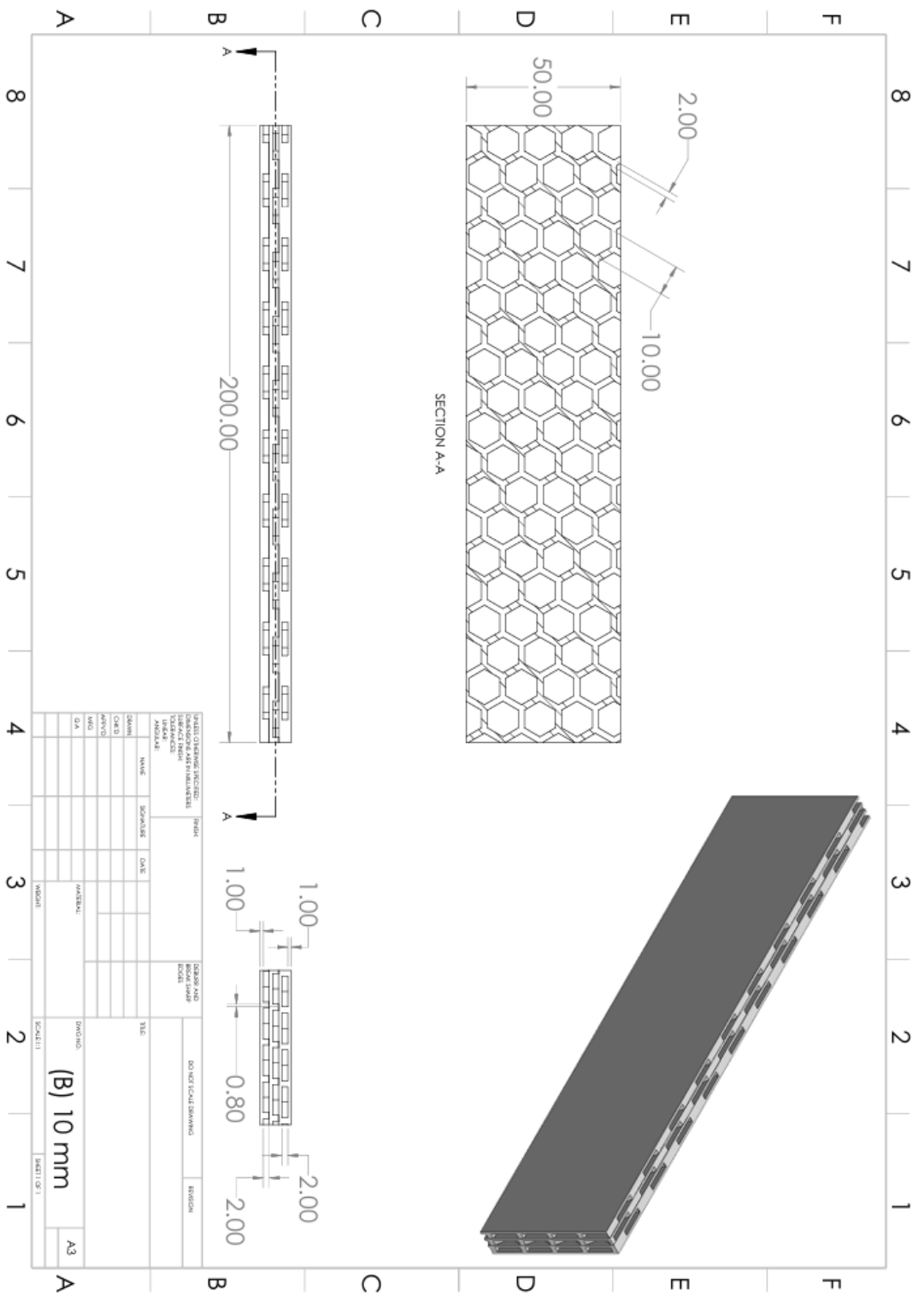
Spesimen B2



Spesimen B3

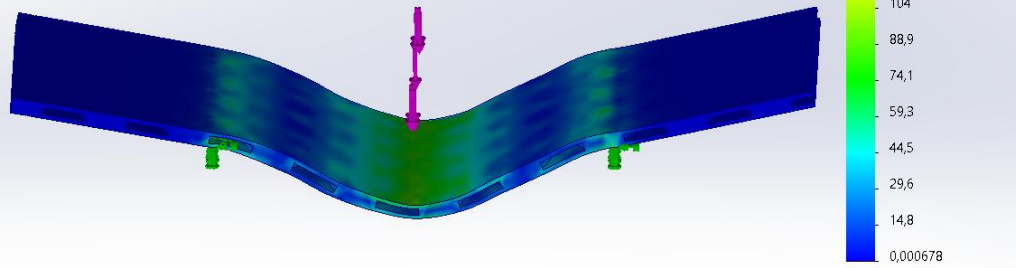






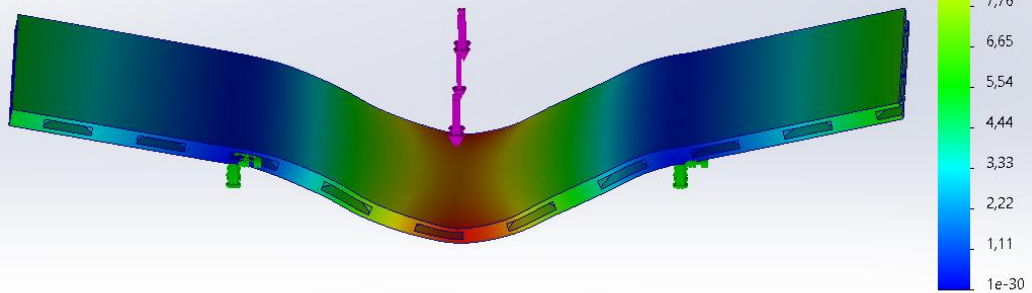
Tegangan Spesimen

4 mm



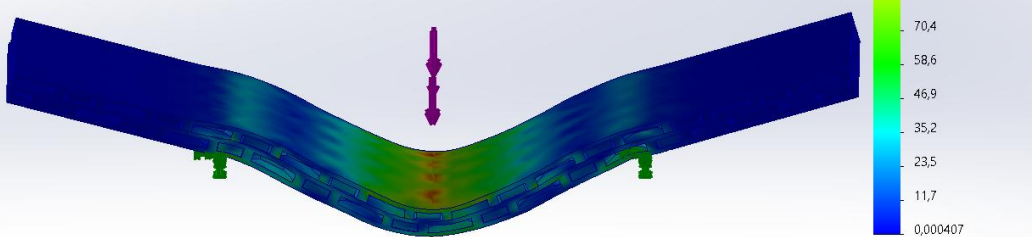
Defleksi Spesimen

4 mm



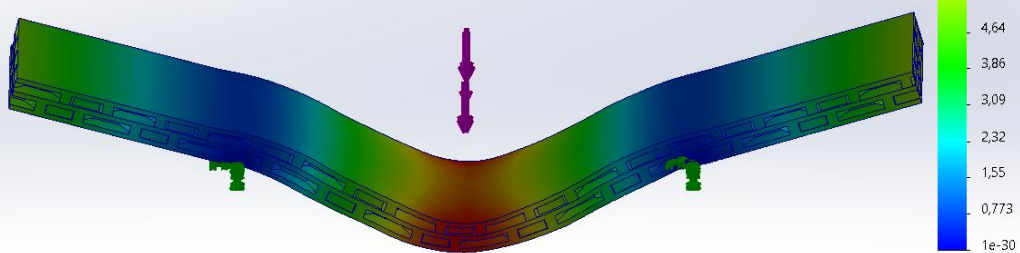
Tegangan Spesimen

7 mm



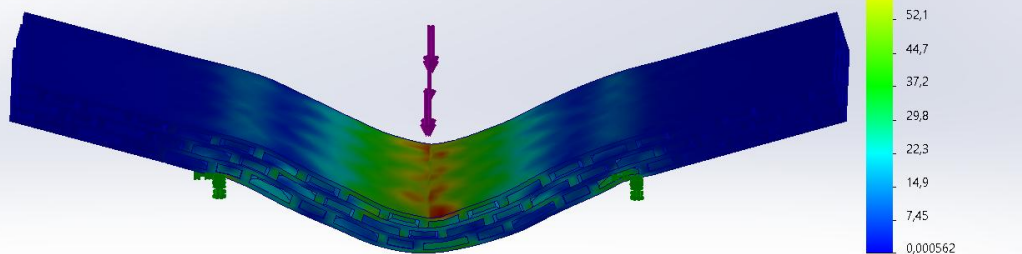
Defleksi Spesimen

7 mm



Tegangan Spesimen

10 mm



Defleksi Spesimen

10 mm

