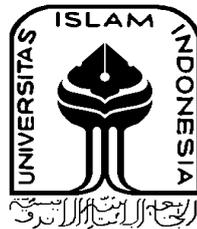


**PENGARUH JUMLAH LAPISAN *SKIN* DAN PERLAKUAN
CURING TERHADAP KEKAKUAN *BENDING* KOMPOSIT
SERAT KARBON DAN PLA *HONEYCOMB RIBS***

TUGAS AKHIR

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



Disusun Oleh :

Nama : Ahmad Nizham Royhan
No. Mahasiswa : 19525115
NIRM : 1907240254

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

2024

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**PENGARUH JUMLAH LAPISAN *SKIN* DAN PERLAKUAN
CURING TERHADAP KEKAKUAN *BENDING* KOMPOSIT
SERAT KARBON DAN PLA *HONEYCOMB RIBS***

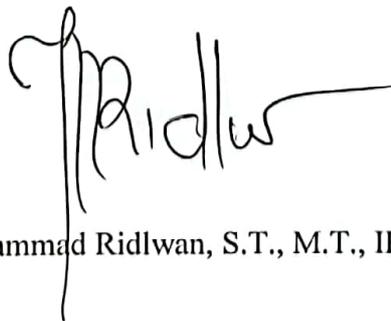
TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Ahmad Nizham Royhan
No. Mahasiswa : 19525115
NIRM : 1907240254

Yogyakarta, 12 Februari 2024

Pembimbing



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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**PENGARUH JUMLAH LAPISAN *SKIN* DAN PERLAKUAN
CURING TERHADAP KEKAKUAN *BENDING* KOMPOSIT
SERAT KARBON DAN PLA *HONEYCOMB RIBS***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Ahmad Nizham Royhan
No. Mahasiswa : 19525115
NIRM : 1907240254

Tim Penguji

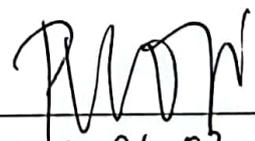
Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP
Ketua


Tanggal : 26/02/2024

Ir, Santo Ajie Dhewanto, S.T., M.M. IPP
Anggota 1

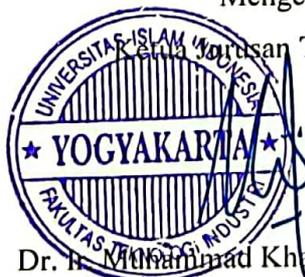

Tanggal : 26-02-2024

Purtojo, S.T., M.Sc
Anggota 2


Tanggal : 21-02-2024

Mengetahui

Jurusan Teknik Mesin



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya bertanda tangan dibawah ini, Ahmad Nizham Royhan selaku penulis Tugas Akhir yang berjudul “PENGARUH JUMLAH LAPISAN *SKIN* DAN PERLAKUAN *CURING* TERHADAP KEKAKUAN *BENDING* KOMPOSIT SERAT KARBON DAN PLA *HONEYCOMB RIBS*” menyatakan bahwa karya tulis ilmiah yang saya buat merupakan karya sendiri bukan hasil plagiarisme dari karya tulis yang dibuat orang lain. Semua referensi dan kutipan yang saya tulis pada karya tulis ini saya cantumkan sitasi dan sumber pustakanya. Apabila dikemudian hari saya dianggap melakukan pelanggaran hak kekayaan intelektual dan yang saya tulis pada karya ilmiah ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi dan hukuman yang berlaku.

Yogyakarta, 8 Februari 2024



Ahmad Nizham Royhan

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur yang mendalam, penulis persembahkan Laporan Tugas Akhir ini serta penulis ucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Orang tua saya yang saya cintai dan saya banggakan Bapak Muhammad Nur Ahabab (Alm.) dan Ibu Suriani yang selalu memberikan dukungan baik berupa dukungan moral dan doa yang tidak hentinya dipanjatkan serta nasihat sehingga penulisan dan pelaksanaan tugas akhir ini dapat terlaksana atas izin Allah Swt.
2. Saudara kandung saya, adik-adik saya tercinta Ahmad Fathi Azizi, Fatimah Azzahra, Ahmad Fahmi Haqiqi, dan Faiha Rafifah yang selalu memberikan semangat dan menjadi motivasi saya untuk terus menjadi lebih baik.
3. 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.
4. Serta teman-teman seperjuangan saya di Teknik Mesin UII yang banyak mendukung, membantu, dan berbagi ilmu selama penulis menjalani perkuliahan.

HALAMAN MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan ada kemudahan”
(QS Al-Insyirah : 6)

“Yakinlah, ada sesuatu yang menantimu setelah sekian banyak kesabaran yang kau jalani, yang akan membuatmu terpana hingga kau lupa betapa pedihnya rasa sakit”
(Ali bin Abi Thalib)

“Bila kau tak tahan lelahnya belajar maka kau harus menahan pedihnya kebodohan”
(Imam Syafi’i)

“Hidup yang tidak dipertaruhkan, tidak akan pernah dimenangkan”
(Sutan Sjahrir)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMAKASIH



Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kita panjatkan kepada tuhan semesta alam Allah Swt. Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, Yang telah memberikan banyak nikmat dan karena Ridho Allah penulis dapat melaksanakan penelitian dan dapat menyelesaikan penelitian, dengan penelitian yang berjudul “Pengaruh Variasi Jumlah *Layer Serat karbon* dan Perlakuan *Curing* Terhadap Pengujian *Bending* Spesimen PLA Struktur *Honeycomb Ribs*”. 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. Keluarga tercinta, Bapak Muhammad Nur Ahabab (Alm.) dan Ibu Suriani selaku orang tua, dan adik-adik Ahmad Fathi Azizi, Fatimah Azzahra, Ahmad Fahmi Haqiqi, dan Faiha Rafifah.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T.IPP., selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin FTI UII.
3. Bapak Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing dalam menempuh tugas akhir yang selalu memberikan bimbingan dan arahan.
4. Seluruh staf pengajar, staf administratif, dan seluruh karyawan di Program Studi Teknik Mesin UII.

5. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin FTI UII yang berjuang Bersama menjalani masa perkuliahan.
6. Rekan-rekan sesama penelitian Fachrozy Aprizal Pradana Putra, Husein Maulana Rokhman, dan Regawa Danu Baya Yoga Sutrisno yang banyak membantu penulis dalam penelitian.
7. Serta seluruh pihak yang sudah membantu dan mendoakan penulis yang tidak dapat ditulis semua dalam kata pengantar atau ucapan terimakasih ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan Laporan Tugas 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, 8 Februari 2024

Ahmad Nizham Royhan

ABSTRACT

The increasingly rapid development of technology and science means that human needs are increasingly expanding. One of them is the need for efficient materials and materials according to specific criteria and characteristics depending on the purpose or use of the material. The method used to make composite specimens with 3D printed PLA filament material and serat karbon is a vacuum bagging and curing process to unite the two materials, then a bending test is carried out to obtain data from the test specimen. The bending stiffness value of the specimen with the addition of serat karbon skin has a better stiffness value as the skin increases, but the specimen with 3 skin layers experiences a less significant increase than the specimen with 2 skin layers, the bending stress value and specific bending stiffness continue to increase as the skin increases. and decreased in specimens with 3 layers of skin. Heat treatment or curing of serat karbon composite specimens on core honeycomb ribs shows a decrease in stiffness values when compared to specimens that did not receive heat treatment or curing.

Keywords: Bending Test, Composite, Vacuum Bagging, Curing, Serat karbon

ABSTRAK

Perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan yang semakin pesat membuat kebutuhan manusia semakin berkembang lebih luas. Salah satunya kebutuhan dalam bidang material dan bahan yang efisien sesuai dengan kriteria dan karakteristik khusus tergantung dari tujuan atau kegunaan dari material tersebut. Metode yang digunakan untuk membuat spesimen komposit dengan material *filament* PLA 3D *print* dan serat karbon yaitu dengan proses *vacuum bagging* dan *curing* untuk menyatukan kedua material tersebut kemudian dilakukan pengujian *bending* untuk mendapatkan data dari spesimen uji. nilai kekakuan *bending* spesimen yang ditambahkan *skin* serat karbon memiliki nilai kekakuan yang lebih baik seiring bertambahnya *skin* namun pada spesimen pada 3 lapis *skin* mengalami kenaikan yang tidak begitu signifikan dari spesimen dengan 2 lapis *skin*, nilai tegangan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik terus meningkat seiring bertambahnya *skin* dan menurun pada spesimen dengan 3 lapis *skin*. Perlakuan panas atau *curing* pada spesimen komposit serat karbon pada *core honeycomb ribs* menunjukkan adanya penurunan nilai kekakuan jika dibandingkan dengan spesimen yang tidak mendapatkan perlakuan panas atau *curing*.

Kata Kunci: Uji *Bending*, Komposit, *Vacuum bagging*, *Curing*, Serat karbon

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing.....	ii
Lembar pengesahan Dosen Penguji	iii
Pernyataan Keaslian	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terimakasih	vii
<i>Abstract</i>	ix
Abstrak	x
Daftar Isi.....	xi
Daftar Tabel	xiii
Daftar Gambar.....	xiv
Daftar Notasi	xvii
Bab 1 Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka.....	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Komposit	7
2.2.2 Komposisi <i>Sandwich</i>	7
2.2.3 Serat Karbon	8
2.2.4 <i>3D Print</i>	9
2.2.5 <i>Vacuum Bagging</i>	9

2.2.6	Proses <i>Curing</i>	10
2.2.7	Pengujian <i>Bending</i>	11
2.2.8	ASTM C393	13
2.2.9	Modus Kegagalan Pengujian <i>Bending</i>	13
Bab 3	Metode Penelitian	15
3.1	Alur Penelitian.....	15
3.2	Peralatan dan Bahan	16
3.3	Dimensi Spesimen.....	25
3.4	Susunan Lapisan Komposit	26
3.5	Proses Pembuatan Spesimen	26
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	34
4.1	Pengujian <i>Bending</i>	34
4.2	Hasil Pengujian <i>Bending</i>	35
4.3	Analisis dan Perhitungan.....	36
4.3.1	Analisis Kegagalan Spesimen Tanpa <i>Skin</i>	36
4.3.2	Analisis Kegagalan Spesimen 1 Lapis <i>Skin</i>	38
4.3.3	Analisis Kegagalan Spesimen 2 Lapis <i>Skin</i>	40
4.3.4	Analisis Kegagalan Spesimen 3 Lapis <i>Skin</i>	41
4.3.5	Perhitungan.....	44
4.4	Pembahasan	45
4.4.1	Perbandingan Variasi Lapis <i>Skin</i>	46
4.4.2	Pengaruh Perlakuan <i>Curing</i>	50
Bab 5	Penutup	55
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya	56
	Daftar Pustaka.....	57
	Lampiran	60

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1	Parameter Pencetakan 3D <i>Print</i>	27
Tabel 3-2	Data Hasil Pengukuran	33
Tabel 4-1	Hasil Pengujian <i>Bending</i>	35
Tabel 4-2	Hasil Perhitungan Spesimen.....	44
Tabel 4-3	Data Spesimen Penelitian Sebelumnya	45
Tabel 4-4	Data Tegangan <i>Bending</i>	46
Tabel 4-5	Perbandingan Perlakuan <i>Curing</i> dan Tanpa <i>Curing</i>	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Struktur Komposit <i>Sandwich</i>	8
Gambar 2-2	Skema <i>Vacuum Bagging</i>	9
Gambar 2-3	Proses <i>Curing</i>	10
Gambar 2-4	Pengujian <i>Bending</i>	11
Gambar 2-5	<i>Three Point Bending Method</i>	13
Gambar 2-6	Modus Kegagalan <i>Skin</i>	14
Gambar 2-7	Modus Kegagalan <i>Core</i>	14
Gambar 3-1	Alur Penelitian	15
Gambar 3-2	Laptop	16
Gambar 3-3	<i>Filament PLA+</i>	16
Gambar 3-4	<i>3D Print Creality Ender 6</i>	17
Gambar 3-5	Serat karbon	17
Gambar 3-6	Lem ALF.....	18
Gambar 3-7	Resin <i>Epoxy</i>	18
Gambar 3-8	<i>Hardener</i>	18
Gambar 3-9	<i>Microwave</i>	19
Gambar 3-10	<i>Thermogun</i>	19
Gambar 3-11	Jangka Sorong	19
Gambar 3-12	Timbangan	20
Gambar 3-13	Pompa Vakum.....	20
Gambar 3-14	<i>Reservoir Pot</i>	21
Gambar 3-15	Plastik <i>Vacuum Bag</i>	21
Gambar 3-16	Kain <i>Peel Ply</i>	22
Gambar 3-17	Kain <i>Bleeder</i>	22
Gambar 3-18	Selang.....	23
Gambar 3-19	Lakban Kertas	23
Gambar 3-20	<i>Sealant Tape</i>	24
Gambar 3-21	Kuas	24
Gambar 3-22	Gunting.....	25

Gambar 3-23	Gelas Plastik dan Stik Pengaduk.....	25
Gambar 3-24	Dimensi Spesimen.....	25
Gambar 3-25	Susunan Lapisan Komposit.....	26
Gambar 3-26	Pembuatan Spesimen 3D <i>Print</i>	27
Gambar 3-27	Skema Susunan <i>Vacuum Bagging</i>	28
Gambar 3-28	Pencampuran Lem ALF	29
Gambar 3-29	Pemasangan <i>Sealant Tape</i>	29
Gambar 3-30	Pencampuran Resin	30
Gambar 3-31	Penempelan <i>Peel Ply</i> dan Kain <i>Breathe Bleeder</i>	30
Gambar 3-32	Rangkaian <i>Vacuum Bagging</i>	31
Gambar 3-33	Proses Vakum Udara.....	31
Gambar 3-34	Hasil <i>Vacuum Bagging</i>	32
Gambar 3-35	Proses <i>Curing</i>	32
Gambar 4-1	<i>Universal Testing Machine</i>	34
Gambar 4-2	Modus Kegagalan Spesimen <i>NonLayer_1</i>	36
Gambar 4-3	Modus Kegagalan Spesimen <i>NonLayer_2</i>	37
Gambar 4-4	Modus Kegagalan Spesimen <i>NonLayer_3</i>	37
Gambar 4-5	Modus Kegagalan Spesimen <i>1Layer_1</i>	38
Gambar 4-6	Modus Kegagalan Spesimen <i>1Layer_2</i>	39
Gambar 4-7	Modus Kegagalan Spesimen <i>1Layer_3</i>	39
Gambar 4-8	Modus Kegagalan Spesimen <i>2Layer_1</i>	40
Gambar 4-9	Modus Kegagalan Spesimen <i>2Layer_2</i>	41
Gambar 4-10	Modus Kegagalan Spesimen <i>2Layer_3</i>	41
Gambar 4-11	Modus Kegagalan Spesimen <i>3Layer_1</i>	42
Gambar 4-12	Modus Kegagalan Spesimen <i>3Layer_2</i>	43
Gambar 4-13	Modus Kegagalan Spesimen <i>3Layer_3</i>	43
Gambar 4-14	Grafik Tegangan <i>Bending</i>	47
Gambar 4-15	Skema Pengujian <i>Bending</i>	47
Gambar 4-16	Grafik Kekakuan <i>Bending</i>	48
Gambar 4-17	Grafik Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik.....	49
Gambar 4-18	Grafik Perbandingan Tegangan <i>Bending</i>	51

Gambar 4-19	Grafik Perbandingan Kekakuan <i>Bending</i>	52
Gambar 4-20	Grafik Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik.....	53

DAFTAR NOTASI

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

P = Beban yang diberikan (N)

L = Jarak *point* (mm)

Δ = Defleksi (mm)

I = Momen inersia (kgm)

b = Lebar spesimen (mm)

h = Tebal spesimen (mm)

W = Berat spesimen (gram)

D = Kekakuan *bending* (Nmm^2)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan dalam industri manufaktur berkembang pesat dan kompleks. Material yang merupakan suatu komponen utama dalam pembuatan suatu produk manufaktur sangat dibutuhkan dengan berbagai macam jenis serta memiliki sifat yang bervariasi tergantung kebutuhan atau tujuan alat yang dibuat. Banyak dari para peneliti berusaha membuat suatu material yang memiliki keunggulan dalam setiap sifat mekanis seperti kuat, kaku, dan ringan. Kebutuhan akan material ini mencakup dalam berbagai bidang kehidupan saat ini seperti industri, teknologi, otomotif, konstruksi, dan sebagainya. Salah satu cara untuk mencari material baru dengan sifat yang diinginkan adalah dengan menggabungkan dua material menjadi satu atau yang biasa disebut dengan material komposit.

Komposit merupakan material yang terbentuk dari kombinasi antara dua atau lebih material pembentuk dan memiliki sifat yang berbeda dari komponen pembentuknya. Penggunaan komposit telah berkembang pesat karena komposit memiliki keunggulan tersendiri dibandingkan bahan teknik alternatif lainnya seperti bahan komposit lebih kuat, tahan terhadap korosi, lebih ekonomis dan sebagainya. (Prayoga *et al*, 2018).

Komposit sandwich memiliki nilai kekakuan yang masih rendah dan proses pembuatannya terbilang mahal karena menggunakan 2 skin di atas dan dibawah. Dengan adanya kekurangan pada komposit sandwich perlu dilakukan inovasi agar mendapatkan material komposit yang lebih kaku dan biaya yang dikeluarkan lebih murah. Ide penambahan ribs pada core yang diinspirasi dari struktur bangunan bertingkat yang memiliki keunggulan kekakuan yang baik. Ribs yang dibuat berbentuk honeycomb karena saling berkaitan sehingga kekakuan yang dihasilkan baik. Penambahan ribs pada core memberikan peluang bahwa geometri dan sifat mekanik produk dapat lebih unggul. Selain itu dalam pembuatan produk skin yang

digunakan hanya 1 sisi, untuk menekan biaya agar lebih murah dari komposit sandwich pada umumnya (Mubarok, 2022).

Fused Deposition Modeling (FDM) merupakan teknologi 3D *print* yang paling banyak digunakan, yang menggunakan bahan filamen seperti *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Polylactic Acid* (PLA), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) dan sebagainya. Jenis filament yang bervariasi akan memberikan fleksibilitas pemilihan material dalam membuat produk 3D *Printing*. 3D *Printing* menghasilkan produk yang cepat, bentuk yang kompleks dan relatif murah, sehingga para peneliti tertarik untuk meningkatkan sifat-sifat mekanik pada produk 3D *Printing*.

Curing adalah proses pemanasan material komposit agar resin memiliki daya ikat yang tinggi pada serat, proses ini dilakukan di atas suhu ruangan (Utomo & Drastiawati, 2021). *Curing Time* adalah parameter penting dalam proses manufaktur komposit karena pemanasan terlalu cepat atau tidak sempurna mengakibatkan berkurangnya sifat ketahanan fatik, termal, kekuatan matriks dan sebagainya (M. I. Putra & Nugroho, 2021).

Pada penelitian sebelumnya spesimen tidak mendapatkan perlakuan *curing*. Pada penelitian ini menggunakan *core* dengan *jenis honeycomb*, dengan menggunakan alat 3D *Print* untuk mencetak spesimen sesuai dengan standar uji ASTM C393. Pengujian *bending* dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk dan kekakuan pada spesimen. Maka dari itu perlu penelitian tentang variasi jumlah lapisan dan pengaruh perlakuan *curing* hasil *print* menggunakan *infill* 100% dengan penambahan serat karbon untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya setelah dilakukan pengujian *bending*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh penambahan lapisan *skin* serat karbon terhadap nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik spesimen?
2. Bagaimana pengaruh perlakuan *curing* terhadap nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik?

1.3 Batasan Masalah

1. Pengujian mekanik yang dilakukan adalah uji *bending* menggunakan standar pengujian ASTM C393.
2. Bagian *core* dan *ribs* menggunakan material PLA dengan pelapisan *skin* menggunakan serat karbon dengan penempelan menggunakan metode *vacuum bagging*.
3. Pembuatan spesimen menggunakan mesin FDM 3D *print* dengan *infill* 100%.
4. *Ribs* berbentuk *honeycomb*.
5. Pelapisan *skin* menggunakan serat karbon dengan variasi 1 lapis, 2 lapis, dan 3 lapis
6. Data spesimen yang tanpa perlakuan *curing* menggunakan data penelitian sebelumnya.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh variasi jumlah lapisan *skin* serat karbon terhadap nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik spesimen.
2. Mengetahui pengaruh perlakuan *curing* terhadap nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui sifat mekanik spesimen.
2. Mengetahui cara pelapisan serat karbon menggunakan metode *vacuum bagging* dengan baik dan benar.
3. Mengetahui pengaruh pemberian *skin* pada *core 3D print* dengan *infill* 100%.
4. Mengetahui pengaruh perlakuan *curing* terhadap kekuatan spesimen.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

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

BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bab ini berisikan kajian Pustaka mengenai dasar teori yang melandasi 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 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

Sumber pertama yang melandasi penelitian ini dilaksanakan adalah pembahasan mengenai penelitian terkait “Pengaruh Penambahan *Skin* Serat Karbon dan *Infill* 100% Material *Honeycomb Ribs* 3D *Print* PLA Terhadap Kekakuan *Bending*”. Pada penelitian tersebut penulis meneliti spesimen struktur *core* dengan *honeycomb ribs* menggunakan bahan PLA dengan *infill* 100% dengan dimensi sesuai standar uji ASTM C393. Variasi dari penelitian sebelumnya adalah spesimen tanpa pemberian *skin* serat karbon dan spesimen dengan pemberian 1 lapis *skin* serat karbon, dimana pemberian *skin* hanya pada 1 permukaan spesimen atau pada *core* spesimen, Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah untuk mengetahui pengaruh dari hasil 3D *print* dengan parameter *infill* 100% dan penambahan *skin* serat karbon terhadap kekakuan *bending* dan juga membandingkan spesimen menggunakan *infill* 100% dengan spesimen menggunakan *infill* 20%. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa penambahan *skin* serat karbon dapat meningkatkan nilai kekakuan *bending* dibanding spesimen tanpa pemberian *skin*, didapatkan juga bahwa *infill* merupakan bagian utama yang mempengaruhi kekuatan dari spesimen semakin tinggi parameter *infill* yang digunakan maka akan semakin tinggi nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik dari spesimen (Rokhman, 2023).

Kajian pustaka berikutnya adalah penelitian berjudul “Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan *Skin* Pada Komposit Sandwich Terhadap Uji *Bending* Menggunakan Metode *Vacuum Bagging*”. Penelitian tersebut membahas terkait bahan komposit *sandwich* dari bahan PLA yang dibuat menggunakan proses 3D *printing* dan digunakan sebagai *core* kemudian dilapisi menggunakan bahan *fiberglass* sebagai *skin*. Lapisan *skin* digabungkan menggunakan metode *vacuum infusion*. Spesimen dibuat beberapa variasi lapisan *skin*, diantaranya 2, 3, dan 4

lapis *skin fiberglass*. Tujuan dari penelitian adalah untuk mencari besar nilai kekakuan dari setiap material kemudian akan dibandingkan dari ketiga material tersebut mana yang memiliki nilai kekakuan tertinggi. Untuk mencari nilai kekakuan dari material tersebut dilakukan pengujian *bending*. Hasil dari pengujian *bending* didapatkan bahwa material yang menggunakan variasi 2 lapis fiberglass sebagai *skin* memiliki nilai kekakuan tertinggi dibanding 3 dan 4 lapis *skin* (Olivianides, 2021).

Kajian pustaka berikutnya adalah penelitian berjudul “Pengaruh Variasi Jenis *Core*, Temperatur *Curing* dan *Post Curing* Terhadap Karakteristik *Bending* Komposit *Sandwich* Serat Karbon dengan Metode *Vacuum Infusion*”. Pada penelitian ini penulis ingin membandingkan spesimen komposit *sandwich* dengan jenis *core* kayu balsa, *honeycomb polypropylene* (PP), dan *PVC foam board*. Spesimen kemudian mendapatkan perlakuan panas atau *curing* dengan variasi 27°C dengan waktu 24 jam, 27°C dengan waktu 24 jam ditambah 90°C dengan waktu 5 jam, dan yang terakhir 90°C dengan waktu 24 jam. Pada penelitian ini dilakukan pengujian *bending* dan juga uji SEM (mikro). Hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa nilai kekuatan *bending* tertinggi terdapat pada *core* kayu balsa diikuti *core honeycomb polypropylene* (PP), dan nilai kekuatan *bending* terendah pada *core PVC foam board*, didapatkan juga bahwa peningkatan temperatur melebihi batas *Tg* menurunkan jumlah ikatan crosslink pada matrik *epoxy*. Spesimen dengan perlakuan *curing* 27°C memiliki nilai hasil uji *bending* lebih tinggi dibandingkan dengan *curing* 90°C (Utomo & Drastiawati, 2021)

Kajian pustaka berikutnya adalah penelitian berjudul “Analisis Kekuatan Tarik Material Komposit Serat Karbon dengan Metode *Vacuum Infusion* Dan *Vacuum Bagging*”. Pada penelitian tersebut penulis ingin mengetahui perbandingan karakteristik spesifik uji tarik dari material komposit dengan matrix resin *epoxy* lical berpenguat serat karbon kevlar yang di buat dengan metode *vacuum infusion* dan *vacuum bagging* di lanjutkan dengan uji foto *micro* untuk mengetahui karakteristik jumlah void material komposit. Hasil dari rata-rata pengujian tarik menunjukkan hasil spesimen *vacuum infusion* sebesar 202.543 Mpa dan spesimen *vacuum bagging* sebesar 270.602 Mpa dimana kita bisa mengetahui bahwa material

dengan metode pembuatan vacuum bagging lebih baik dari metode vacuum infusion. Dari hasil analisis uji foto *micro* menunjukkan karakteristik material dari hasil uji tarik dengan metode pembuatan *vacuum infusion* memiliki jumlah void lebih banyak dan *vacuum bagging* memiliki jumlah void lebih sedikit, karena hal tersebut terjadi saat proses pembuatan spesimen (Negoro *et al*, 2023).

2.2 Dasar Teori

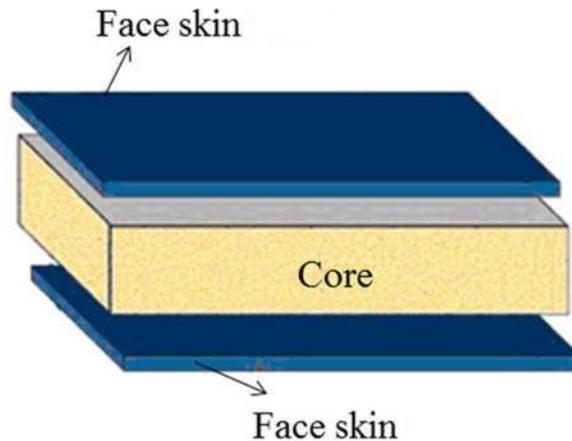
2.2.1 Komposit

Didalam dunia industri kata komposit dalam pengertian bahan komposit berarti terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda yang digabung atau dicampur menjadi satu. Menurut Kaw (1997) komposit adalah struktur material yang terdiri dari 2 kombinasi bahan atau lebih, yang dibentuk pada skala makroskopik dan menyatu secara fisika. Sedangkan menurut Triyono dan Diharjo (1999) mengemukakan bahwa kata komposit (*composite*) merupakan kata sifat yang berarti susunan atau gabungan. *Composite* berasal dari kata kerja “to compose” yang berarti menyusun atau menggabung. Jadi secara sederhana bahan komposit berarti bahan gabungan dari dua atau lebih bahan yang berlainan.

Saat ini komposit serat banyak dikembangkan sebagai bahan alternatif dari pengganti kayu, logam dan lainnya. Hal ini disebabkan bahan komposit yang berasal dari serat mempunyai daya tahan korosi, lebih ringan serta bahan dan proses pembuatannya relatif murah (Syaukani *et al*, 2021).

2.2.2 Komposisi Sandwich

Komposit *sandwich* seperti pada gambar 2-1 pada prinsipnya memiliki dua bagian yang terdiri dari bagian luar atau bagian atas dan bawah yang disebut *skin* dan bagian dalam atau tengah yang disebut *core* (Widiyono, E., M. Y., & Noor, 2021).



Gambar 2-1 Struktur Komposit Sandwich

Tujuan dari penggunaan material komposit *sandwich* adalah untuk mendapatkan efisiensi berat optimal dengan nilai kekakuan dan kekuatan yang tinggi. Material ini sangat sesuai digunakan untuk menahan beban impact, lentur serta dapat meredam atau meminimalisir getaran dan suara (Rokhman, 2023).

Core merupakan bagian inti dari komposit *sandwich*, dimana pada bagian ini harus cukup kaku agar jarak antara permukaan terjaga. Dengan kekakuan *core* diharapkan mampu menahan geseran agar tidak terjadinya *slide* antar permukaan (Hidayat *et al.*, 2016).

Skin merupakan bagian terpenting dari komposit *sandwich* dimana *skin* terletak pada bagian yang melapisi *core*. *Skin* memiliki beberapa fungsi yaitu menahan *tensile* dan *compressive stress*. Biasanya *skin* memiliki tingkat kekuatan yang rendah. Jenis material yang dapat dijadikan bahan untuk pembuatan *skin* yaitu aluminium, baja, logam, *polymer* dan *stainless steel* (Nugroho, 2011).

2.2.3 Serat Karbon

Serat karbon atau yang biasa disebut *carbon fiber* adalah serat sintesis dengan kekuatan tarik dan konduktivitas listrik yang tinggi, massa jenis serta koefisien ekspansi termal yang rendah membuatnya sangat populer di bidang industri. Dalam industri otomotif perkembangan dari bahan yang akan digunakan sebagai komponen kendaraan bermotor sudah sangat maju, hal ini dibuktikan dengan berbagai macam variasi bahan yang lebih ringan dan kuat namun tetap memenuhi aspek keamanan untuk komponen kendaraan tersebut (Sari *et al.*, 2020).

Sifat dari serat karbon dipengaruhi oleh beberapa faktor. Satu faktor yang paling utama adalah arah atau alur serat karbon. Berbeda dengan material logam, karbon fiber khususnya dan material komposit lain pada umumnya, disebut sebagai material anisotropik. Maksudnya adalah sifat properti material ini dipengaruhi oleh bentuk dan arah serat penyusunnya (Pulungan, 2017).

2.2.4 3D Print

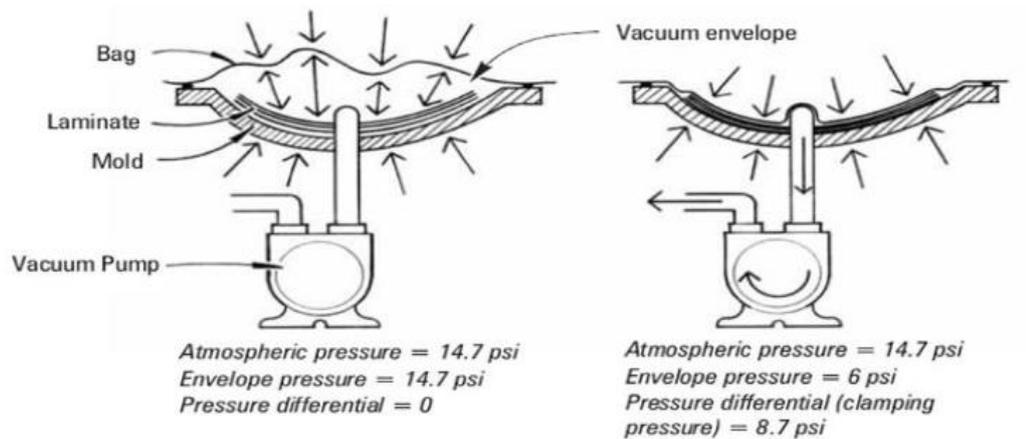
3D *printing* atau dikenal juga sebagai *additive manufacturing* adalah proses membuat objek 3D atau bentuk apapun dari model digital. Dengan prinsipnya menggunakan *additive manufacturing*, 3D *printing* mengkonversi desain digital tiga dimensi dari *computer aided design* (CAD) kemudian dikonversi ke dalam format .stl (*stereolithography*) agar dapat diterapkan pada *software* pencetak objek tiga dimensi dan kemudian dicetak menjadi sebuah produk tiga dimensi berbentuk padat (Kholil *et al*, 2020).

3D *printer* adalah sebuah mesin yang dapat mencetak objek 3 dimensi dengan menggunakan bahan mentah dalam bentuk *filament*. *Filament* ini di proses dengan cepat dan presisi tinggi oleh mesin pencetak 3D, membentuk objek dengan detail yang sangat akurat.

2.2.5 Vacuum Bagging

Vacuum bagging adalah salah satu metode penyempurnaan dari proses *hand lay-up*, metode ini menggunakan *vacuum* untuk menghilangkan kelebihan resin dan udara yang terperangkap sehingga rongga yang terjadi akibat adanya endapan udara yang ada pada laminasi dapat diminimalisir. *Vacuum bagging* menggunakan tekanan atmosfer sebagai penjepit untuk menekan lapisan laminasi secara bersamaan dan tekanan yang sama rata. Laminasi disegel di dalam sebuah kantong kedap udara. Ketika laminasi disegel tekanan udara di dalam cetakan dan di luar cetakan sama dengan tekanan atmosfer, sekitar 14,7 psi. Kemudian pompa vakum dinyalakan dan tekanan di dalam cetakan berkurang sementara tekanan di luar cetakan tetap pada 14,7 psi. Ini adalah teknik yang efektif dan hemat biaya (Nugraha *et al*, 2022).

Pada gambar 2-2 yaitu skema proses *vacuum bagging*, digunakan pompa vakum untuk menghisap udara yang ada dalam wadah atau *mold* tempat diletakkannya komposit yang akan dilakukan proses pencetakan. Dengan dilakukan vakum dalam wadah atau *mold* tersebut maka udara yang berada diluar penutup plastik akan menekan kearah dalam. Hal ini akan menyebabkan udara yang terperangkap dalam spesimen komposit akan dapat diminimalisir (Sari, 2018).



Gambar 2-2 Skema *Vacuum Bagging*

Pada proses vakum, kegagalan yang biasa terjadi pada spesimen komposit yang dilakukan vakum adalah adanya kebocoran udara dan resin yang masuk ke bagian *ribs* spesimen yang berbentuk *honeycomb*.

2.2.6 Proses *Curing*

Proses *Curing* merupakan proses pemanasan atau polimerisasi material komposit agar resin memiliki daya ikat yang tinggi pada serat yang dilakukan pada temperatur diatas temperatur kamar. Meningkatnya temperature *curing* menyebabkan terjadinya peningkatan kecepatan *curing* dan dapat memberikan ikatan silang (*cross-linking*) pada material komposit, tetapi kekuatan material komposit menurun (Utomo & Drastiawati, 2021).



Gambar 2-3 Proses *Curing*

Proses *Curing* seperti pada gambar 2-3 dilakukan dengan memanaskan bahan benda uji pada temperatur tertentu. Namun bila dipanaskan di atas T_g (*glass transition temperature*) material akan menjadi ulet dan saat temperatur dinaikkan maka material akan meleleh dan mencair (Prastyadi, 2017). Kegagalan yang biasa terjadi pada saat proses *curing* adalah spesimen komposit mengalami deformasi atau perubahan bentuk disebabkan temperatur tinggi.

2.2.7 Pengujian *Bending*

Uji lengkung (*Bending Test*) pada gambar 2-4 merupakan proses untuk mengukur kekuatan dan keuletan dalam menahan beban suatu material dimana pada prosesnya pemberian beban secara maksimal bertujuan untuk melihat perubahan bentuk (deformasi) dan hasil pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi kualitas suatu material dan menentukan apakah material tersebut cocok untuk digunakan dalam aplikasi tertentu.

Besar kekuatan *bending* suatu materil dipengaruhi oleh jenis materialnya dan cara pembebanannya. Ketika suatu benda ditekan atau dilengkungkan, bagian atasnya akan mengalami tekanan sedangkan bagian bawahnya mengalami tegangan tarik. Untuk material komposit, kekuatan tekannya lebih tinggi dari pada kekuatan tariknya (Aprillio, 2022).



Gambar 2-4 Pengujian *Bending*

Hasil yang didapatkan dari pengujian *bending* biasanya berupa data beban maksimal, defleksi (perpindahan relatif pada ujung spesimen yang di tekuk), dan tegangan *bending*. Data ini akan digunakan untuk melakukan perhitungan kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik, dengan rumus sebagai berikut:

- Tegangan Maksimal

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

- Kekakuan *Bending*

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

- Kekakuan *Bending* Spesifik

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

Keterangan:

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

P = Beban yang diberikan (N)

L = Jarak point (mm)

Δ = Defleksi (mm)

I = Momen inersia (kgm)

b = lebar spesimen (mm)

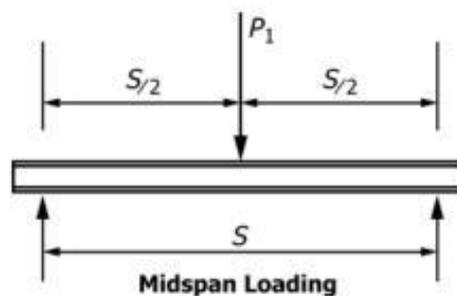
h = tebal spesimen (mm)

W = Berat spesimen (gram)

D = Kekakuan *bending* (Nmm²)

2.2.8 ASTM C393

Terdapat berbagai macam cara pengujian bending yang telah terstandarisasi diantaranya adalah uji bending dengan standar ASTM C393. Metode ini digunakan untuk mencari sifat mekanik geser pada inti konstruksi sandwich datar berdasar lenturan balok. Untuk mendapatkan sifat geser, pengujian bending dilakukan dengan pembebanan pada 1 atau 2 titik. Konfigurasi standar saat pengujian yakni *3-point bending* dengan jarak antara penopang spesimen sebesar 150 mm seperti pada gambar 2-5 dimana P adalah beban atau gaya yang diterima spesimen dan S adalah jarak antar penopang



(a) 3-Point Loading (Standard Configuration)

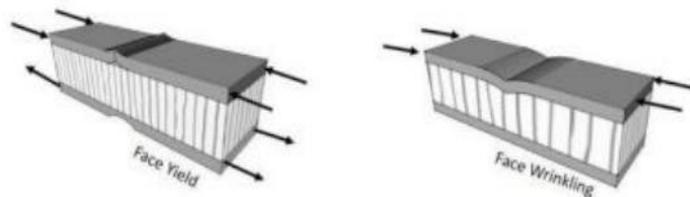
Gambar 2-5 Three Point Bending Method

2.2.9 Modus Kegagalan Pengujian *Bending*

Menurut (Petras, 1998), modus kegagalan dari struktur *honeycomb sandwich* komposit terdiri dari kegagalan *skin* dan kegagalan *core*. Pada gambar 2-6 modus kegagalan *skin* antara lain:

1. *Face yield* yang terjadi akibat tegangan normal nilainya lebih besar dari tegangan luluh material dan apabila material dari *skin* memiliki sifat getas, maka kegagalan *face yield* kemungkinan besar dapat terjadi pada bagian atas disebabkan bagian atas lebih rentan terhadap tegangan tekan.
2. *Face wrinkling* adalah modus kegagalan pada *skin* yang dapat terjadi akibat fenomena *buckling* pada bagian *skin* atas akibat tegangan tekan dan kurangnya

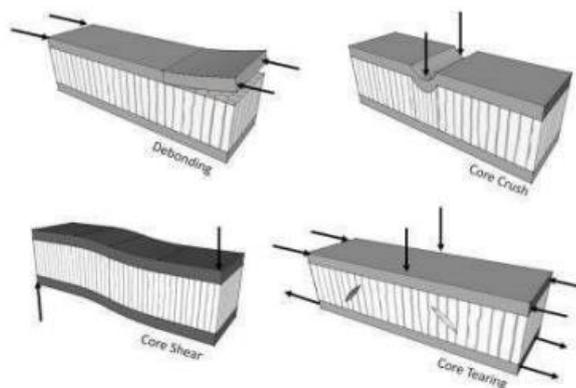
dukungan dari *core* karena dimensi struktur atau karena densitas yang rendah. *Buckling* dapat terjadi kearah inti maupun keluar tergantung dengan kekakuan inti dalam kompresi dan kekuatan perekat.



Gambar 2-6 Modus Kegagalan *Skin*

Selain itu, untuk modus kegagalan *core* terdiri dari 4 jenis seperti pada gambar 2-7 diantaranya:

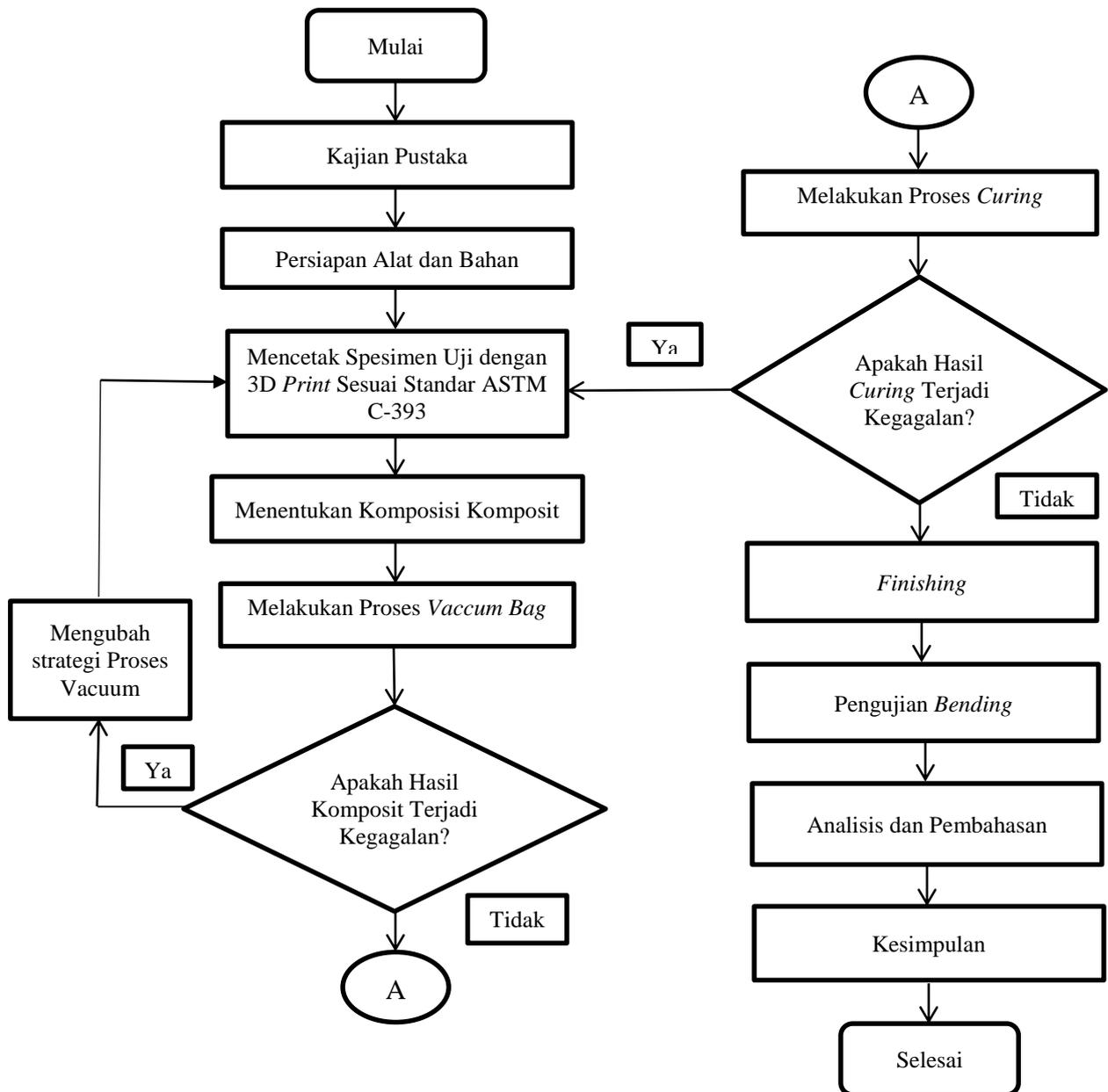
1. *Debonding* merupakan kegagalan yang terjadi ketika terlepasnya bagian *skin* dengan *core*.
2. *Core crush* adalah salah satu kegagalan yang terjadi pada *core* diakibatkan oleh deformasi pada bagian tengah *core* akibat tekanan dari pembebanan. Kegagalan ini dapat terlihat ketika bentuk spesimen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



Gambar 2-7 Modus Kegagalan *Core*

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3-1 Alur Penelitian

3.2 Peralatan dan Bahan

1. Laptop

Laptop digunakan untuk mendesain spesimen menggunakan aplikasi *solidworks* dan mengatur parameter 3D *print* menggunakan aplikasi *ultimaker cura* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3-2.



Gambar 3-2 Laptop

2. Filament PLA+

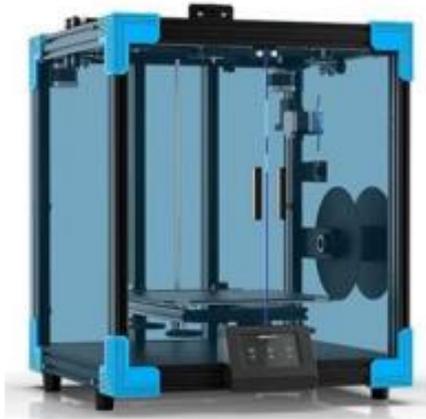
Bahan yang digunakan untuk membuat spesimen 3d *print* atau *core* adalah material PLA+ atau *polylactic acid* seperti pada gambar 3-3 dengan merek *filament* adalah sunlu.



Gambar 3-3 Filament PLA+

3. 3D Printing

Gambar 3-4 merupakan mesin 3D *print* dengan merek Creality3D seri Ender 6 yang digunakan untuk mencetak spesimen dari *filament* yang sudah ada.



Gambar 3-4 3D *Print* Creality3D Ender 6

4. Serat Karbon

Pada gambar 3-5 dibawah merupakan serat karbon yang digunakan sebagai *skin* pada bagian struktur komposit.



Gambar 3-5 Serat karbon

5. Lem ALF

Lem yang digunakan untuk merekatkan *skin* ke *core* adalah lem ALF seperti pada gambar 3-5 yang berbasis resin *epoxy* dan hardener yang mampu merekatkan *skin* sebelum dilakukan proses *vacuum*.



Gambar 3-6 Lem ALF

6. Resin *Epoxy*

Gambar 3-7 menunjukkan resin *epoxy* yang digunakan sebagai perekat diantara lapisan *skin* serat karbon dengan *core* spesimen PLA pada saat proses *vacuum*.



Gambar 3-7 Resin *Epoxy*

7. *Hardener*

Gambar 3-8 menunjukkan hardener yang digunakan sebagai campuran dari resin *epoxy* untuk membantu proses pengerasan dari resin.



Gambar 3-8 *Hardener*

8. *Microwave*

Pada gambar 3-9 dibawah ini merupakan *microwave* yang berfungsi sebagai alat untuk memanaskan spesimen.



Gambar 3-9 *Microwave*

9. *Thermogun*

Pada gambar 3-10 dibawah ini merupakan *thremogun* yang berfungsi untuk mengukur suhu pada *microwave*.



Gambar 3-10 *Thermogun*

10. Jangka Sorong

Pada gambar 3-11 dibawah ini merupakan jangka sorong yang berfungsi sebagai alat untuk mengukur dimensi spesimen.



Gambar 3-11 Jangka Sorong

11. Timbangan

Pada gambar 3-12 dibawah ini merupakan timbangan yang berfungsi untuk menimbang berat spesimen juga menakar campuran resin dan *hardener*.



Gambar 3-12 Timbangan

12. Pompa Vakum

Pada gambar 3-13 dibawah ini merupakan pompa vakum yang berfungsi untuk menyedot udara pada bagian *vacuum bag* dan memberikan tekanan agar *vacuum bag* dapat menyusut mengikuti bentuk benda.



Gambar 3-13 Pompa Vakum

13. *Reservoir Pot*

Pada gambar 3-14 dibawah ini merupakan *reservoir pot* yang berfungsi sebagai barometer pengukur tekanan yang terjadi dalam *vacuum bag*.



Gambar 3-14 *Reservoir Pot*

14. *Plastik Vacuum Bag*

Pada gambar 3-15 dibawah ini merupakan Plastik *vacumm bag* yang berfungsi sebagai peletakan sekaligus penutup spesimen komposit pada saat proses *vacuum*.



Gambar 3-15 Plastik *Vacuum Bag*

15. Kain *Peel Ply*

Pada gambar 3-16 dibawah ini merupakan kain *peel ply* yang berfungsi untuk meratakan resin pada *skin* pada saat proses *vacuum* dan memudahkan pelepasan spesimen saat selesai *vacuum*.



Gambar 3-16 Kain *Peel ply*

16. Kain *Bleeder*

Pada gambar 3-17 dibawah ini merupakan kain *bleeder* yang berfungsi untuk menyerap resin yang berlebih dan resin sisa pada saat proses *vacuum*.



Gambar 3-17 Kain *Bleeder*

17. Selang

Pada gambar 3-18 dibawah ini merupakan selang yang berfungsi untuk penyerapan udara melalui selang sehingga tidak tersisa udara didalam plastic *vacuum bag*.



Gambar 3-18 Selang

18. Lakban Kertas

Pada gambar 3-19 dibawah ini merupakan lakban kertas yang berfungsi untuk membantu pada saat proses mencetak spesimen agar pembentukan spesimen menempel secara kuat pada *base 3D printing*.



Gambar 3-19 Lakban Kertas

19. *Sealant Tape*

Pada gambar 3-20 dibawah ini merupakan *sealant tape* yang berfungsi untuk perekat pada plastic *vacuum bag* agar tidak terjadi kebocoran udara.



Gambar 3-20 *Sealant Tape*

20. Kuas

Pada gambar 3-21 dibawah ini merupakan kuas yang berfungsi untuk mengoleskan lem ALF dan mengoleskan resin pada spesimen.



Gambar 3-21 Kuas

21. Gunting

Pada gambar 3-22 dibawah ini merupakan gunting yang berfungsi untuk menggunting bahan-bahan seperti *peel ply*, plastic *vacuum bag*, dan kain *breeder* sesuai ukuran yang diperlukan.



Gambar 3-22 Gunting

22. Gelas Plastik dan Stik Pengaduk

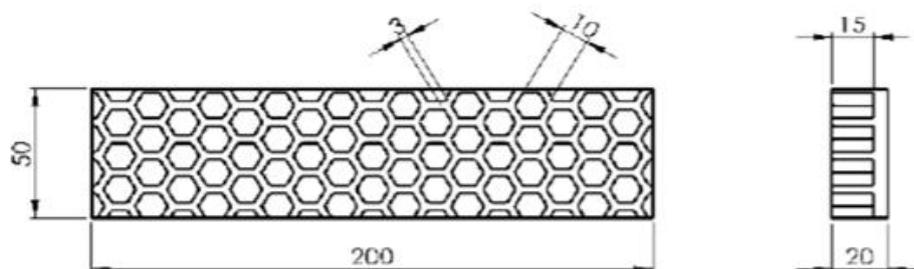
Pada gambar 3-23 dibawah ini merupakan gelas plastic dan stik pengaduk yang berfungsi sebagai wadah dan pengaduk untuk mencampur lem ALF dan mencampur resin *epoxy* dengan *hardener*.



Gambar 3-23 Gelas Plastik dan Stik Pengaduk

3.3 Dimensi Spesimen

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

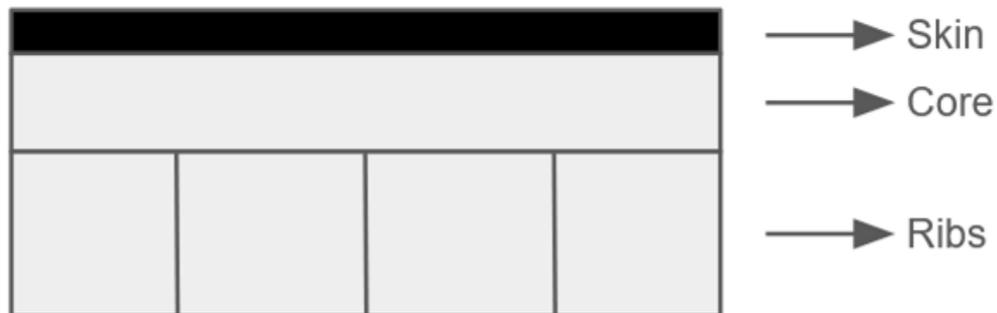


Gambar 3- 24 Dimensi Spesimen

Panjang dari spesimen adalah sebesar 200 mm kemudian lebar 50 mm dan tebal keseluruhan 20 mm. Selain itu, untuk tebal *ribs* sebesar 15 mm dan untuk bentuk heksagonal atau *honeycomb* memiliki ukuran diameter 10 mm dan jarak antar *honeycomb* sebesar 3 mm seperti yang dapat dilihat pada gambar 3-24.

Pembuatan jumlah spesimen sebanyak 12 spesimen yang terdiri dari 3 spesimen tanpa pemberian *skin* serat karbon, 3 spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon, 3 spesimen dengan 2 lapis *skin* serat karbon, dan 3 spesimen dengan 3 lapis *skin* serat karbon untuk dijadikan pembandingan dari hasil pengujian.

3.4 Susunan Lapisan Komposit



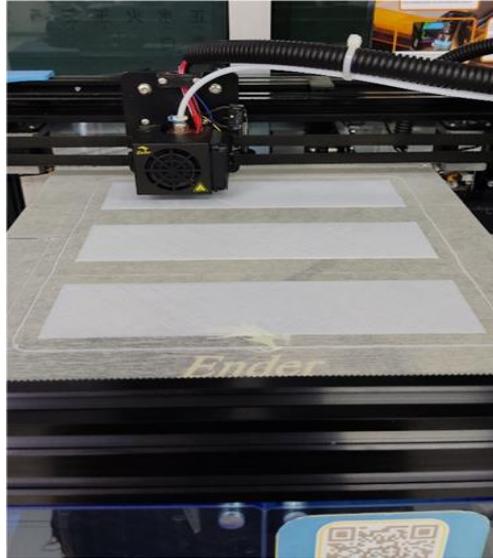
Gambar 3-25 Susunan Lapisan Komposit

Susunan dari spesimen komposit seperti pada gambar 3-25 yang akan dibuat terdiri dari 3 bagian yaitu *skin*, *core*, dan *ribs*. Pada bagian *skin* menggunakan serat karbon dan terdiri dari 3 variasi lapis *skin*, pada bagian *core* dan *ribs* menggunakan material PLA+ dan dicetak dengan proses 3D *printing*. *Ribs* berbentuk *honeycomb* atau sarang lebah, *ribs* juga merupakan bagian dari *core* dan merupakan satu kesatuan.

3.5 Proses Pembuatan Spesimen

Proses pengerjaan atau pembuatan spesimen terdiri dari beberapa bagian dimulai dari pembuatan spesimen *core* menggunakan mesin 3D *print* kemudian dilanjutkan dengan proses pelapisan *skin* pada spesimen menggunakan serat karbon disertai proses *vacuum bagging* kemudian proses *curing* pada spesimen.

3.5.1 Pembuatan Spesimen dengan 3D Printing



Gambar 3-26 Pembuatan Spesimen 3D Print

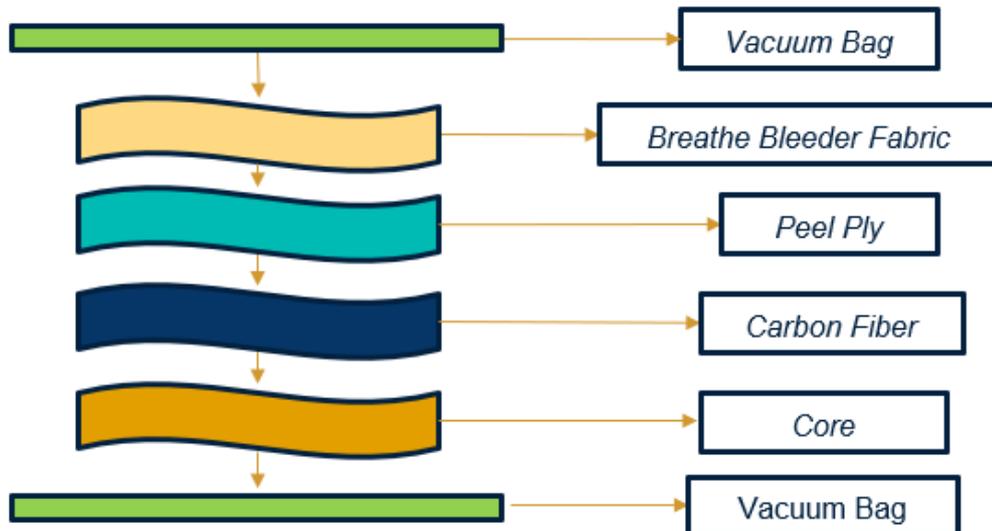
Proses pembuatan spesimen menggunakan mesin 3D *print* seperti pada gambar 3-26 dengan bahan yang digunakan adalah *filament* PLA+. Pembuatan spesimen menggunakan dimensi dengan standar pengujian *bending* ASTM C393 seperti yang dijelaskan pada sub bab 3.3.

Tabel 3-1 Parameter Pencetakan 3D *Print*

Bahan	PLA+
Persentase <i>infill</i>	100%
Tebal <i>Layer</i>	0,4 mm
Suhu <i>Noozle</i>	215°C
Suhu Meja	60°C
Print Speed	100 mm/s

Parameter dari proses pencetakan pada mesin 3D *print* Creality Ender 6 seperti pada table 3-1 menggunakan material PLA+, spesimen dicetak dengan kerapatan atau *infill* sebesar 100%, tebal layer 0,4 mm, suhu dari *noozle* 215°C dan suhu dari meja cetak 60°C dengan kecepatan *print* 100 mm/s.

3.5.2 Proses *Vacuum Bagging*



Gambar 3-27 Skema Susunan *Vacuum Bagging*

Dapat dilihat pada gambar 3-27 skema susunan *vacuum bagging* menunjukkan urutan pelapisan yang digunakan dalam proses vakum dimana lapisan terluar merupakan *vacuum bag* dilanjutkan dengan *breathe bleeder fabric* dilanjutkan dengan *peel ply* lalu lapisan *skin* berupa serat karbon sebanyak 1 lapis, 2 lapis, dan 3 lapis sesuai dengan variasi lapis *skin* yang dibuat yang telah ditempelkan pada spesimen dan lapisan terbawah ditutup kembali menggunakan *vacuum bag*.

Adapun tahapan atau langkah-langkah pengerjaan proses *vacuum bagging* sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam proses *vacuum bagging*
2. Mencampurkan lem ALF dan katalis dengan perbandingan 1:1 seperti pada gambar 3-30 kemudian dioleskan pada bagian spesimen yang rata lalu tempelkan serat karbon pada bagian spesimen yang sudah dioleskan lem dan tunggu hingga mengering kurang lebih selama 10 menit, mengulangi langkah ini untuk variasi 2 lapis dan 3 lapis *skin*.



Gambar 3-28 Pencampuran Lem ALF

3. Menyiapkan *vacuum bag* sebagai alas kemudian menempelkan *sealent tape*.



Gambar 3-29 Pemasangan *Sealent Tape*

4. Mencampurkan resin *epoxy* dan *hardener* dengan perbandingan 2:1 dan aduk selama kurang lebih 15 menit agar tercampur merata. Kemudian mengoleskan ke lapisan serat karbon yang sudah menempel pada spesimen.



Gambar 3-30 Pencampuran Resin

5. Pada gambar 3-31 proses menempelkan *peel ply* pada bagian serat karbon yang sudah dioles campuran resin dan *hardener* kemudian mengoleskan campuran resin dan *hardener* kembali agar resin merata pada serat karbon, kemudian menempelkan *breathe bleeder fabric* diatas *peel ply*.



Gambar 3-31 Penempelan *Peel Ply* dan Kain *Breathe Bleeder*

6. Meletakkan spesimen diatas *vacuum bag* dibagian dalam dari *sealant tape* dengan posisi bagian serat karbon, *peel ply*, dan kain *breathe bleeder* menghadap keatas.

7. Menutup seluruh area spesimen dengan *vacuum bag* dan ditempelkan ke *sealant tape* pada bagian alas seperti pada gambar 3-32 dan pastikan *vacuum bag* pada bagian alas dan *vacuum bag* pada penutup menempel dan tidak ada ruang udara atau kebocoran dengan menyisakan sedikit lubang untuk memasukkan selang kedalam.



Gambar 3-32 Rangkaian *Vacuum Bagging*

8. Mulai melakukan proses *vacuum* dengan menyalakan pompa vakum hingga tidak tersisa udara pada bagian dalam *vacuum bag* seperti pada gambar 3-33, pastikan udara didalam *vacuum bag* sudah tidak ada dan *vacuum bag* menekan spesimen, lalu mematikan pompa vakum dan menutup kran *valve*. Proses vakum dibiarkan selama 24 jam agar resin dapat mengeras dengan sempurna.



Gambar 3-33 Proses Vakum Udara

9. Setelah 24 jam buka rangkaian *vacuum bag* dan lepaskan lapisan kain *breathe bleeder* dan *peel ply* dari spesimen dan periksa kembali apabila terjadi kegagalan dalam proses *vacuum bagging*. Pada gambar 3-34 merupakan hasil vakum spesimen.



Gambar 3-34 Hasil *Vacuum Bagging*

3.5.3 Proses *Curing*



Gambar 3-35 Proses *Curing* Spesimen

Pada gambar 3-35 merupakan proses *curing* spesimen dimana spesimen dipanaskan dengan suhu 60°C yang sudah dilakukan pengukuran suhu menggunakan *thermogun* untuk mencari suhu optimal yang diinginkan, spesimen

di *curing* kurang lebih selama 10 menit kemudian di periksa kembali keadaan dan ukuran spesimen setelah dilakukan proses *curing*.

3.5.4 Hasil Pengerjaan

Proses berikutnya adalah mengukur tiap spesimen, pengukuran dilakukan menggunakan alat jangka sorong dan timbangan. Data pengukuran dapat dilihat pada tabel 3-2 data pengukuran yang didapatkan kemudian diolah untuk mendapatkan nilai dari kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik.

Tabel 3-2 Data Hasil Pengukuran

No.	Variasi Spesimen	Tebal Awal	Tebal Akhir	Lebar	Berat Awal	Berat Akhir
		(mm)	(mm)	(mm)	(gram)	(gram)
1	NonLayer_1	19,66	19,66	50,20	137	137
2	NonLayer_2	19,74	19,74	50,08	137	137
3	NonLayer_3	19,60	19,60	50,18	137	137
4	1Layer_1	19,72	20,22	50,18	136	142
5	1Layer_2	19,7	20,20	50,10	133	140
6	1Layer_3	19,64	20,22	50,08	133	140
7	2Layer_1	19,62	20,46	50,20	137	146
8	2Layer_2	19,61	20,44	50,10	136	146
9	2Layer_3	19,66	20,54	50,12	137	146
10	3Layer_1	19,66	20,70	50,20	136	149
11	3Layer_2	19,68	20,72	50,10	136	149
12	3Layer_3	19,60	20,70	50,08	135	149

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian *Bending*

Pengujian yang dilakukan pada spesimen uji adalah pengujian *bending* untuk mencari nilai kekakuan *bending* dari total 12 spesimen yang dibagi menjadi 3 spesimen tanpa pelapisan *skin* serat karbon, 3 spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon, 3 spesimen dengan 2 lapis *skin* serat karbon, dan 3 spesimen dengan 3 lapis *skin* serat karbon. Pengujian *bending* ini mengacu pada standar ASTM C393 dengan menggunakan *threepoint bending* yang dilakukan di Lab Bahan Teknik UGM menggunakan mesin *universal testing machine* yang dapat dilihat pada gambar 4-1.



Gambar 4-1 *Universal Testing Machine*

Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk proses pengujian *bending* yaitu:

1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji dan melakukan pengukuran dimensi spesimen.
2. Menyiapkan mesin uji *bending* dengan mengatur jarak antar titik tumpu sebesar 170 mm.
3. Meletakkan spesimen uji pada tumpuan tepat pada titik tengah spesimen berada pada titik pembebanan.

4. Memulai pengujian dengan mesin uji akan memberikan beban maksimal secara perlahan hingga spesimen mengalami kegagalan.
5. Mesin akan mencatat hasil nilai beban maksimal yang diberikan dan defleksi yang terjadi pada spesimen.
6. Ulangi langkah 1 sampai 5 untuk setiap variasi lapis *skin* spesimen.

4.2 Hasil Pengujian *Bending*

Hasil pengujian pada spesimen menghasilkan data berupa beban maksimal, defleksi, dan tegangan *bending* yang dapat dilihat pada tabel 4-1 serta menghasilkan grafik beban berbanding defleksi dari setiap spesimen.

Tabel 4-1 Hasil Pengujian *Bending*

No.	Variasi Spesimen	Tebal	Lebar	Pmax	Defleksi	Tegangan <i>Bending</i>
		(mm)	(mm)	(KN)	(mm)	(MPa)
1	NonLayer_1	19,66	50,20	1,40	8,6	18,40
2	NonLayer_2	19,74	50,08	1,36	7,51	17,77
3	NonLayer_3	19,60	50,18	1,41	8,10	18,65
4	1Layer_1	20,22	50,18	1,66	7,86	20,63
5	1Layer_2	20,20	50,10	1,66	8,40	20,71
6	1Layer_3	20,22	50,08	1,54	9,26	19,18
7	2Layer_1	20,46	50,20	1,68	7,12	20,39
8	2Layer_2	20,44	50,10	1,68	7,15	20,47
9	2Layer_3	20,54	50,12	1,79	7,56	21,59
10	3Layer_1	20,70	50,20	1,74	6,39	20,63
11	3Layer_2	20,72	50,10	1,61	7,03	19,09
12	3Layer_3	20,70	50,08	1,61	7,64	19,13

Berdasarkan data pada tabel 4-1 spesimen dengan 2 lapis *skin* serat karbon memiliki rata-rata beban maksimal dan tegangan *bending* yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen lainnya. Nilai beban maksimal yang tertinggi dan dapat ditahan oleh material komposit ada pada spesimen 2 lapis *skin* dengan kode 2Layer_3 sebesar 1,79 KN. Tegangan *bending* terbesar ada pada spesimen 2 lapis *skin* dengan kode 2Layer_3 sebesar 21,59 MPa. Kedua nilai tertinggi tersebut

dimiliki oleh spesimen yang sama dengan penggunaan 2 lapis *skin*. Sedangkan nilai beban maksimal terendah ada pada spesimen tanpa pelapisan *skin* dengan kode NonLayer_2 sebesar 1,36 KN. Tegangan *bending* terendah juga ada pada spesimen spesimen tanpa pelapisan *skin* dengan kode NonLayer_2 sebesar 17,77 Mpa.

4.3 Analisis dan Perhitungan

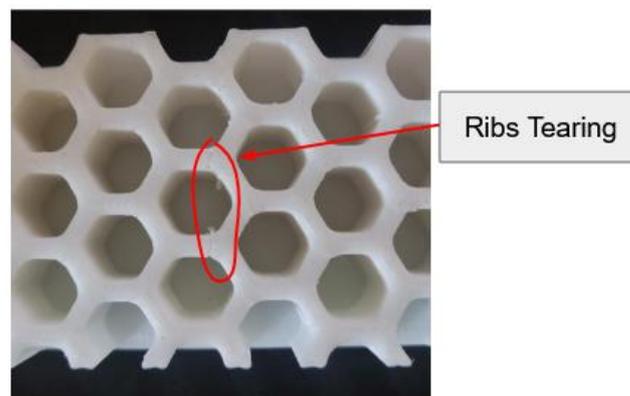
Pengujian *bending* yang telah dilakukan menyebabkan spesimen mengalami kegagalan atau kerusakan akibat pemberian beban pada spesimen yang melebihi kemampuan materialnya. Berdasarkan hasil pengamatan dari 12 spesimen yang telah dilakukan uji *bending*, pada umumnya spesimen mengalami kegagalan *ribs* atau *core tearing* akibat tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi dan kegagalan *debonding* karena ikatan yang tidak kuat antara *core* dan *skin*.

4.3.1 Analisis Kegagalan Spesimen Tanpa *Skin*

Berikut ini adalah hasil analisis kegagalan yang terjadi pada spesimen tanpa *skin* berdasarkan pengamatan langsung.

1. Spesimen tanpa *skin* 1 (NonLayer_1)

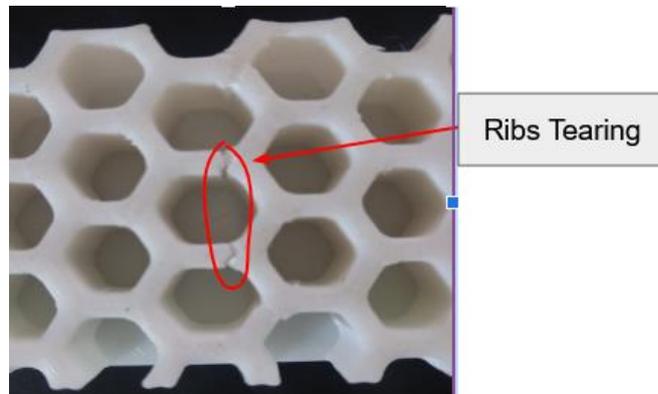
Pada spesimen NonLayer_1 yang terlihat pada gambar 4-2 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing*, pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser sehingga *ribs* mengalami retakan.



Gambar 4-2 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_1

2. Spesimen tanpa *skin* 2 (NonLayer_2)

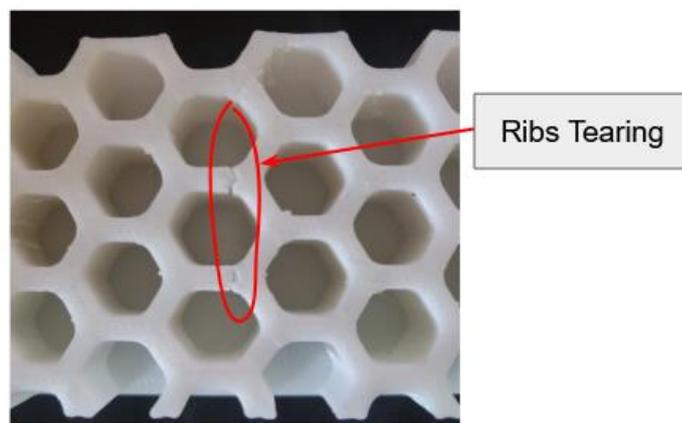
Pada spesimen NonLayer_2 yang terlihat pada gambar 4-3 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing*, pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser sehingga *ribs* mengalami retakan.



Gambar 4-3 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_2

3. Spesimen tanpa *skin* 3 (NonLayer_3)

Pada spesimen NonLayer_3 yang terlihat pada gambar 4-4 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing*, pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser sehingga *ribs* mengalami retakan.



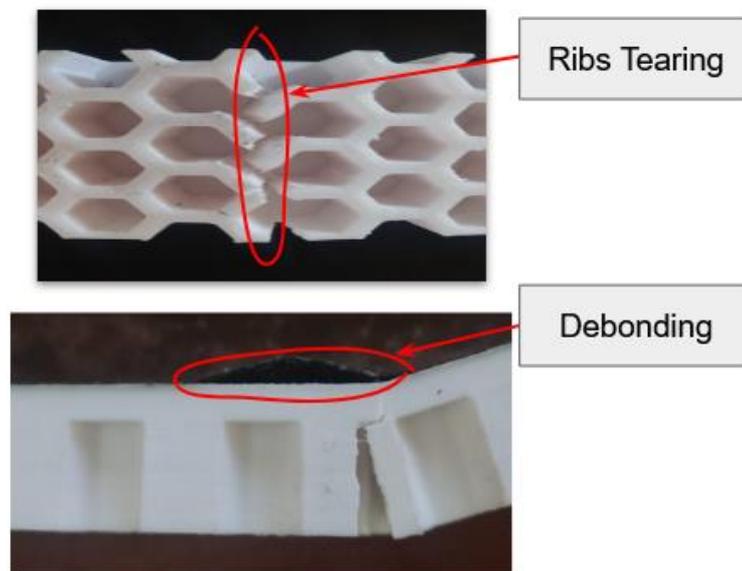
Gambar 4-4 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_3

4.3.2 Analisis Kegagalan Spesimen 1 Lapis Skin

Berikut ini adalah hasil analisis kegagalan yang terjadi pada spesimen dengan 1 layer skin serat karbon berdasarkan pengamatan langsung.

1. Spesimen 1 layer 1 (1Layer_1)

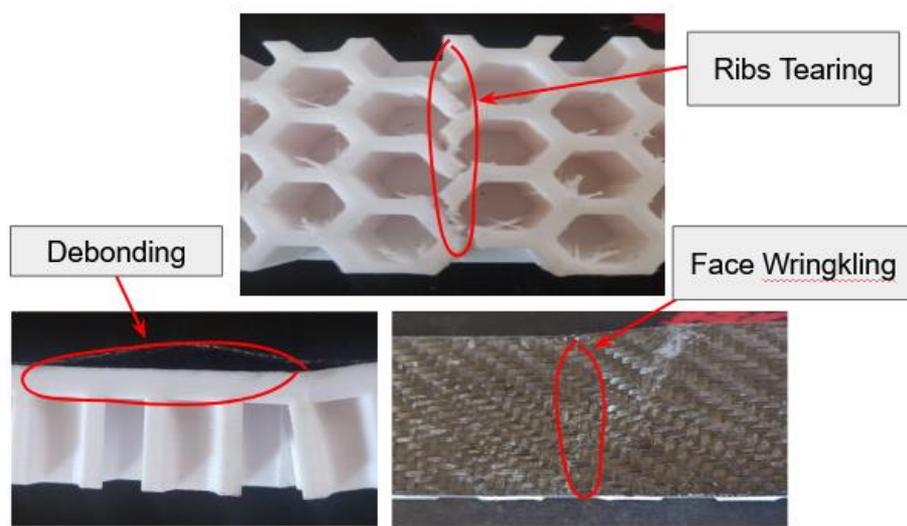
Pada spesimen 1Layer_1 yang terlihat pada gambar 4-5 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing*, pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *debonding* pada lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen karena ikatan antar *skin* dan *core* yang tidak terlalu kuat.



Gambar 4-5 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_1

2. Spesimen 1 layer 2 (1Layer_2)

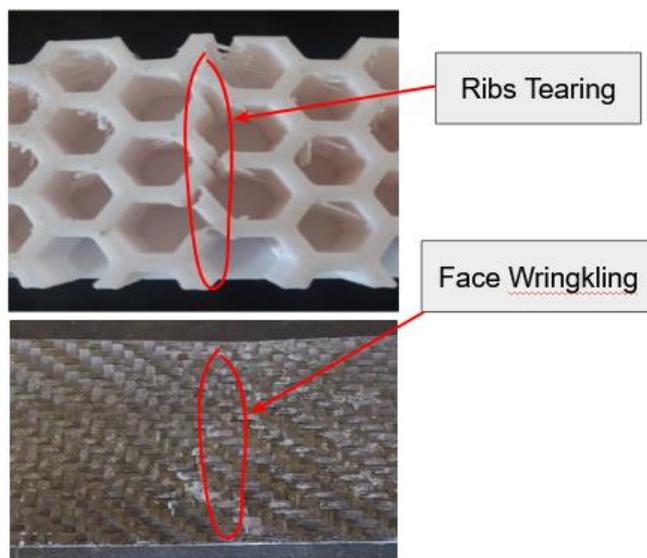
Pada spesimen 1Layer_2 yang terlihat pada gambar 4-6 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing*, pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *debonding* pada lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen karena perekat tidak mampu menahan gaya akibat beban tekan sehingga *skin terlepas*, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada *skin* dimana terjadi kerutan akibat fenomena *buckling* dan kurangnya *support* dari *core*.



Gambar 4-6 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_2

3. Spesimen 1 layer 3 (1Layer_3)

Pada spesimen 1Layer_3 yang terlihat pada gambar 4-7 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing*, pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada lapisan *skin* dimana terjadi kerutan akibat kurangnya *support* dari *core* karena dimensi struktur *core* yang terlalu besar dan akibat adanya fenomena *buckling*.



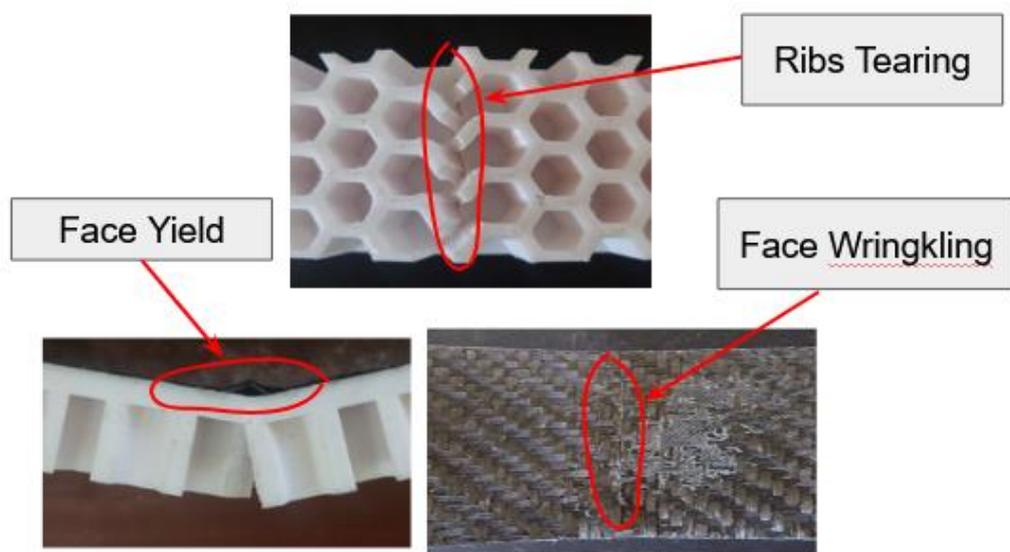
Gambar 4-7 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_3

4.3.3 Analisis Kegagalan Spesimen 2 Lapis *Skin*

Berikut ini adalah hasil analisis kegagalan yang terjadi pada spesimen tanpa *skin* berdasarkan pengamatan langsung.

1. Spesimen 2 layer 1 (2Layer_1)

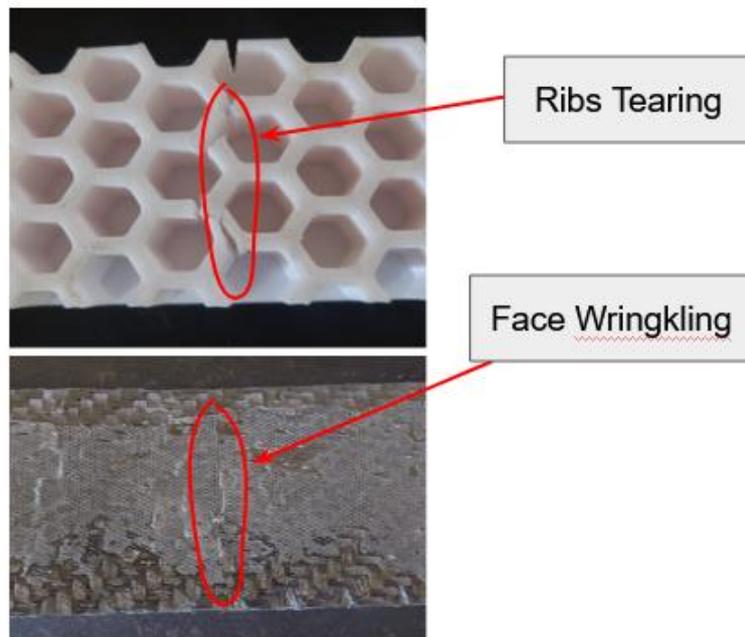
Pada spesimen 2Layer_1 yang terlihat pada gambar 4-8 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing*, pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *face yield* dimana kegagalan ini terjadi pada *skin* komposit bagian atas lebih kritis menerima tegangan tekan menyebabkan penurunan kekuatan *bending*, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada *skin* dimana terjadi kerutan akibat fenomena *buckling* dan kurangnya *support* dari *core*.



Gambar 4-8 Modus Kegagalan Spesimen 2Layer_1

2. Spesimen 2 layer 2 (2Layer_2)

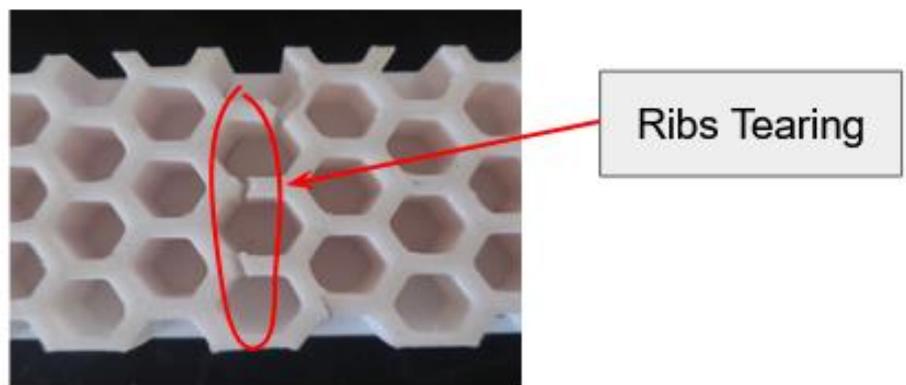
Pada spesimen 2Layer_2 yang terlihat pada gambar 4-9 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing* akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada *skin* dimana terjadi kerutan akibat fenomena *buckling* dan kurangnya *support* dari *core* karena dimensi struktur *core* yang terlalu besar.



Gambar 4-9 Modus Kegagalan Spesimen 2Layer_2

3. Spesimen 2 layer 3 (2Layer_3)

Pada spesimen 2Layer_3 yang terlihat pada gambar 4-10 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing* akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser.



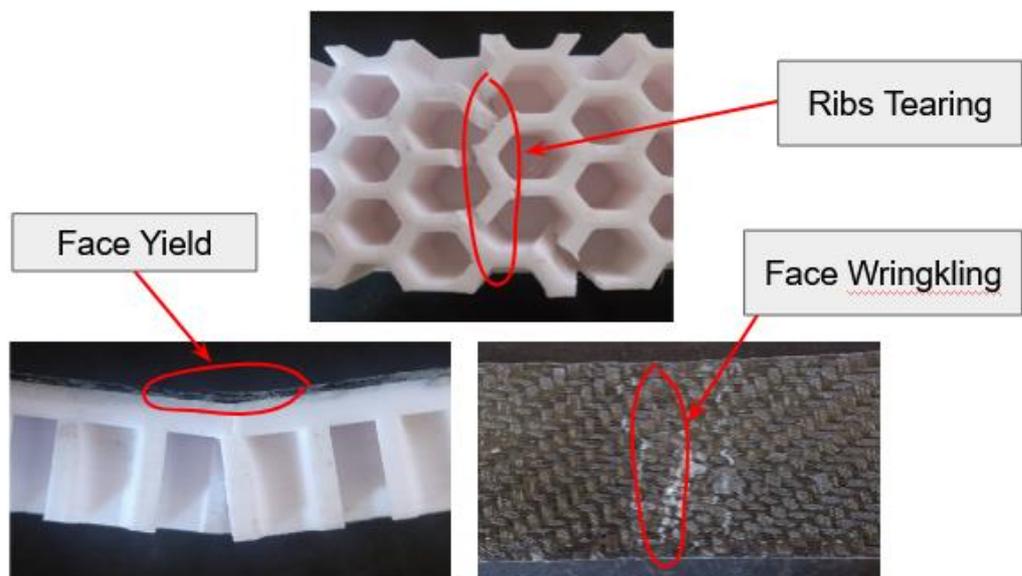
Gambar 4-10 Modus Kegagalan Spesimen 2Layer_3

4.3.4 Analisis Kegagalan Spesimen 3 Lapis *Skin*

Berikut ini adalah hasil analisis kegagalan yang terjadi pada spesimen tanpa *skin* berdasarkan pengamatan langsung.

1. Spesimen 3 layer 1 (3Layer_1)

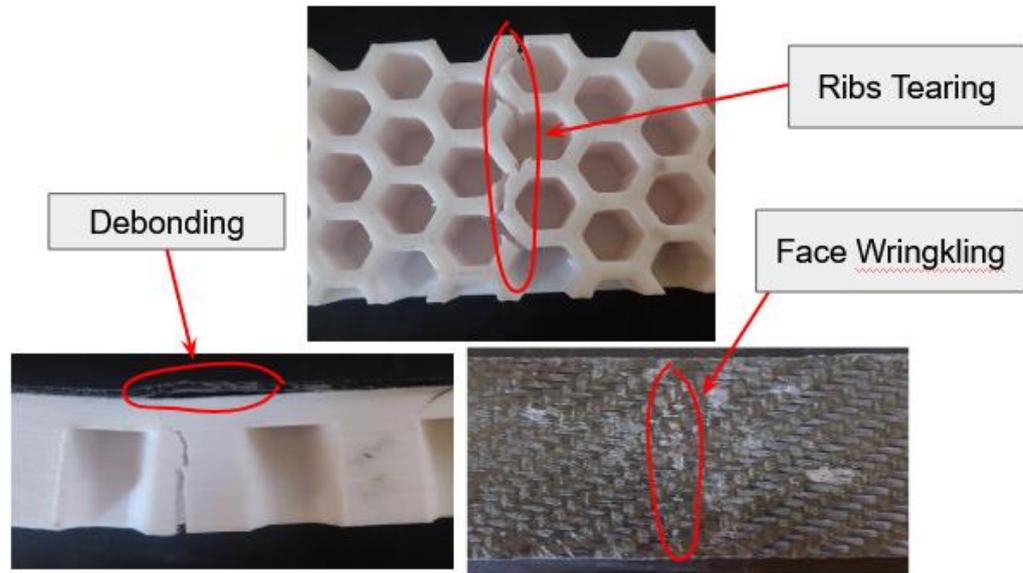
Pada spesimen 3Layer_1 yang terlihat pada gambar 4-11 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing* akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada *skin* dimana terjadi kerutan akibat fenomena *buckling* dan kurangnya *support* dari *core* karena dimensi struktur *core* yang terlalu besar, diikuti kegagalan *face yield* dimana kegagalan ini terjadi pada *skin* komposit bagian atas lebih kritis menerima tegangan tekan menyebabkan penurunan kekuatan *bending*.



Gambar 4-11 Modus Kegagalan Spesimen 3Layer_1

2. Spesimen 3 layer 2 (3Layer_2)

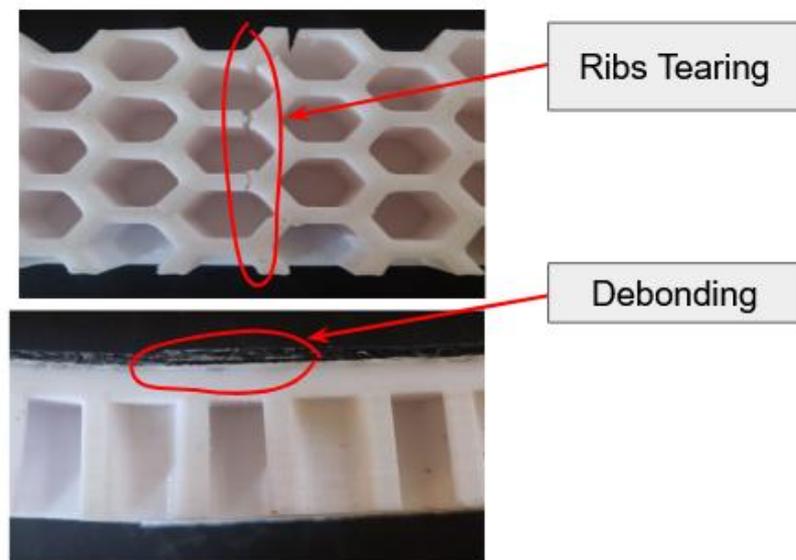
Pada spesimen 3Layer_2 yang terlihat pada gambar 4-12 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing* akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *debonding* pada lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen karena perekat tidak mampu menahan gaya akibat beban tekan sehingga *skin* terlepas, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada *skin* dimana terjadi kerutan akibat fenomena *buckling* dan kurangnya *support* dari *core*.



Gambar 4-12 Modus Kegagalan Spesimen 3Layer_2

3. Spesimen 3 layer 3 (3Layer_3)

Pada spesimen 3Layer_3 yang terlihat pada gambar 4-13 spesimen mengalami kegagalan *ribs tearing* akibat adanya beban tekan dari atas menimbulkan tegangan normal dan tegangan geser, diikuti kegagalan *debonding* pada lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen karena perekat tidak mampu menahan gaya akibat beban tekan sehingga *skin* terlepas.



Gambar 4-13 Modus Kegagalan Spesimen 3Layer_3

4.3.5 Perhitungan

Berdasarkan data yang telah didapatkan dari hasil pengujian *bending* seperti yang terlihat pada tabel 4-1 diatas, data kemudian diolah untuk mencari nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik dari setiap spesimen menggunakan persamaan 2.1, 2.2, dan 2.3 yang tertera pada bab 2.

Tabel 4-2 Hasil Perhitungan Spesimen

Kode Spesimen	Berat	Pmax	Defleksi	Tegangan Max	Kekakuan Bending	Rata-rata	Kekakuan Bending Spesifik	Rata-rata
	(gram)	(KN)	(mm)	(MPa)	(N.mm ²)	(N.mm ²)	(N.mm ² /gr)	(N.mm ² /gr)
NonLayer_1	137	1,40	8,6	18,40	16.662.306	17.671.674	121.623	128.990
NonLayer_2	137	1,36	7,51	17,77	18.535.508		135.296	
NonLayer_3	137	1,41	8,10	18,65	17.817.207		130.053	
1Layer_1	142	1,66	7,86	20,63	21.616.783	19.622.033	152.231	139.432
1Layer_2	140	1,66	8,40	20,71	20.227.133		144.480	
1Layer_3	140	1,54	9,26	19,18	17.022.183		121.587	
2Layer_1	146	1,68	7,12	20,39	24.150.983	24.145.095	165.418	165.377
2Layer_2	146	1,68	7,15	20,47	24.049.650		164.724	
2Layer_3	146	1,79	7,56	21,59	24.234.651		165.991	
3Layer_1	149	1,74	6,39	20,63	27.871.088	24.293.828	187.054	163.046
3Layer_2	149	1,61	7,03	19,09	23.440.997		157.322	
3Layer_3	149	1,61	7,64	19,13	21.569.399		144.761	

Berdasarkan Hasil perhitungan yang telah diolah dan disajikan dalam bentuk tabel 4-2 diatas menunjukkan hasil perhitungan kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik dari spesimen yang telah dilakukan pengujian menggunakan *universal testing machine*. Dapat dilihat spesimen tanpa pelapisan *skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata kekakuan *bending* sebesar 17.671.674 N.mm² dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 128.990 N.mm²/gr. Pada spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata kekakuan *bending* sebesar 19.622.033 N.mm² dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 139.432 N.mm²/gr. Pada spesimen dengan 2 lapis *skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata kekakuan *bending* sebesar 24.145.095 N.mm² dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 165.377 N.mm²/gr. Pada

spesimen dengan 3 lapis *skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata kekakuan *bending* sebesar 24.293.828 N.mm² dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 163.046 N.mm²/gr.

4.4 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 didapatkan dibandingkan antara variasi *layer skin* yaitu tanpa *skin*, 1 lapis *skin*, 2 lapis *skin*, dan 3 lapis *skin*. Kemudian dari data-data yang didapatkan juga dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya yang tanpa perlakuan *curing* (Husain, 2023).

Pada penelitian sebelumnya, penulis menggunakan spesimen dengan ukuran yang sama dan menggunakan *skin* karbon berjumlah 1 lapis. Kemudian yang membedakan dari penelitian ini adalah penelitian sebelumnya spesimen tanpa perlakuan *curing* dan penelitian ini spesimen mendapatkan perlakuan *curing*.

Tabel 4-3 Data Spesimen Penelitian Sebelumnya

Kode Spesimen	Berat	Pmax	Defleksi	Tegangan Max	Kekakuan <i>Bending</i>	Rata-rata	Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik	Rata-rata
	(gram)	(KN)	(mm)	(MPa)	(N.mm ²)	(N.mm ²)	(N.mm ² /gr)	(N.mm ² /gr)
A1	137	1,73	8,86	22,83	19.985.633	19.127.764	145.881	139.474
A2	137	1,36	7,81	17,94	17.823.517		130.289	
A3	137	1,79	9,36	22,51	19.574.141		142.254	
B1	143	1,91	8,65	23,97	22.600.747	22.629.044	157.606	157.369
B2	144	1,89	9,07	23,53	21.328.487		148.012	
B3	144	1,91	8,16	23,23	23.957.899		166.490	

Pada tabel 4-3 diatas menunjukkan data dari spesimen tanpa perlakuan *curing* dari penelitian sebelumnya. Untuk spesimen dengan kode A merupakan spesimen tanpa *skin* serat karbon dan spesimen dengan kode B merupakan spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon.

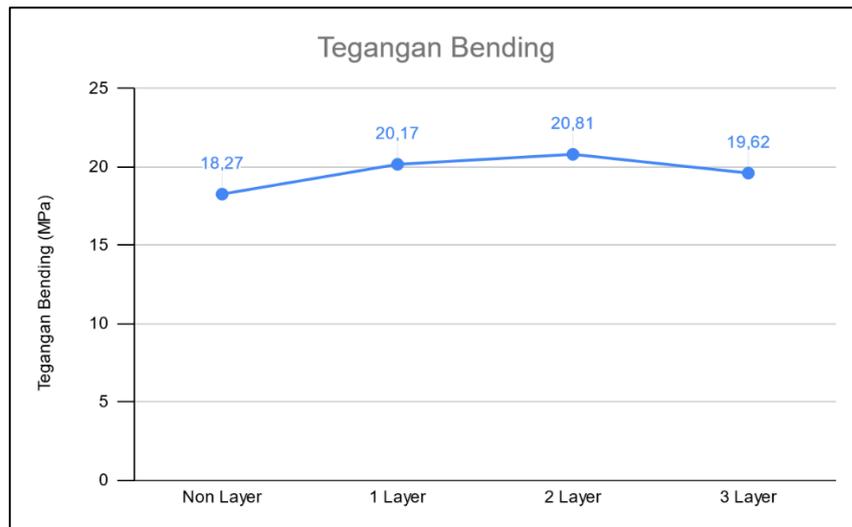
4.4.1 Perbandingan Variasi Lapis *Skin*

1. Tegangan *Bending*

Tabel 4-4 Data Tegangan *Bending*

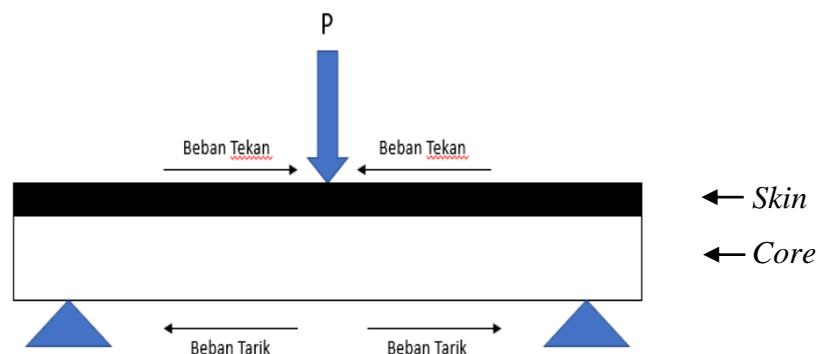
Kode Spesimen	Tegangan Max	Rata-rata
	(MPa)	(MPa)
NonLayer_1	18,40	18,27
NonLayer_2	17,77	
NonLayer_3	18,65	
1Layer_1	20,63	20,17
1Layer_2	20,71	
1Layer_3	19,18	
2Layer_1	20,39	20,81
2Layer_2	20,47	
2Layer_3	21,59	
3Layer_1	20,63	19,62
3Layer_2	19,09	
3Layer_3	19,13	

Pada tabel 4-4 dapat dilihat nilai tegangan *bending* dari setiap spesimen. Pada spesimen dengan tanpa *skin* memiliki nilai rata-rata tegangan *bending* sebesar 18,27 MPa. Pada spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata tegangan *bending* sebesar 20,17 MPa. Pada spesimen dengan 2 lapis *skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata tegangan *bending* sebesar 20,81 MPa. Pada spesimen dengan 3 lapis *skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata tegangan *bending* sebesar 19,62 MPa. Berdasarkan data ini, spesimen dengan nilai rata-rata tegangan *bending* tertinggi pada spesimen dengan 2 lapis *skin* serat karbon dan nilai terendah pada spesimen dengan tanpa pelapisan *skin*.



Gambar 4-14 Grafik Tegangan *Bending*

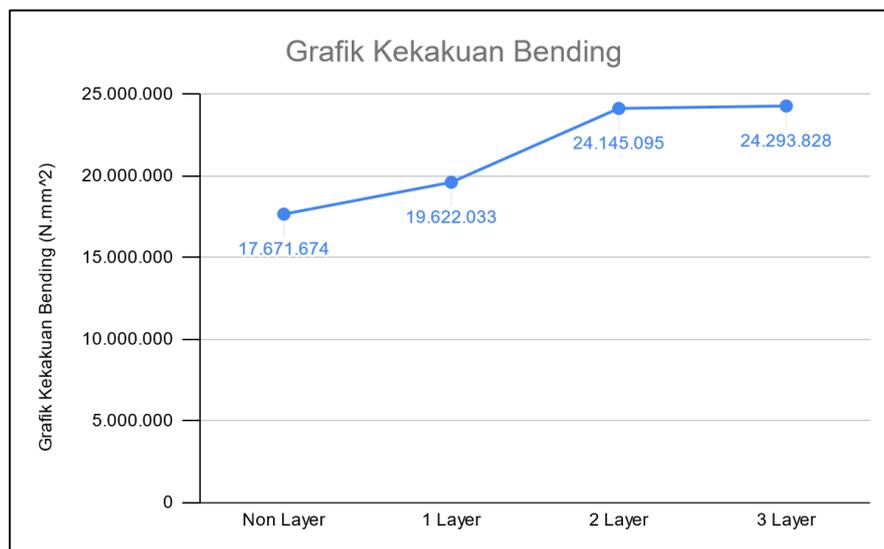
Pada gambar 4-14 menunjukkan grafik nilai tegangan *bending* spesimen mulai dari tanpa *skin* mengalami peningkatan saat bertambahnya 1 lapis *skin* dan meningkat kembali saat bertambah menjadi 2 lapis *skin*, namun pada spesimen dengan 3 lapis *skin* mengalami penurunan nilai tegangan *bending* bahkan lebih rendah daripada spesimen dengan 1 lapis *skin*, hal ini terjadi disebabkan oleh pemberian *skin* pada 1 permukaan membuat beban maksimal yang mampu ditahan spesimen menurun seperti yang terlihat pada gambar 4-15 dengan bertambahnya lapis *skin* meningkatkan berat spesimen namun bagian *skin* hanya menahan beban tekan dan tidak menahan beban tarik dengan kata lain berat yang dihasilkan dari penambahan lapis *skin* tidak sebanding dengan kekakuan yang dihasilkan.



Gambar 4-15 Skema Pengujian *Bending*

2. Kekakuan *Bending*

Dari hasil pengolahan data spesimen dengan variasi *layer skin* serat karbon didapatkan nilai kekakuan *bending* yang disajikan dalam grafik pada gambar 4-15 didapatkan bahwa kenaikan nilai kekakuan *bending* berbanding lurus dengan penambahan lapis *skin*. Nilai kekakuan *bending* tertinggi ada pada spesimen dengan 3 lapis *skin* sebesar 24.293.827,85 Nmm², nilai ini tidak naik signifikan yang hanya naik sebanyak 1,0061 kali lipat dari spesimen dengan 2 lapis *skin*. Nilai kekakuan *bending* terendah ada pada spesimen dengan tanpa pelapisan *skin* sebesar 17.671.673,73 Nmm², nilai ini naik sebanyak 1,1103 kali lipat dari spesimen dengan pemberian *skin* atau 1 lapis *skin*, kenaikan nilai kekakuan *bending* tertinggi terjadi pada spesimen dengan 2 lapis *skin* sebanyak 1,2305 kali lipat lebih besar dari spesimen dengan 1 lapis *skin*.



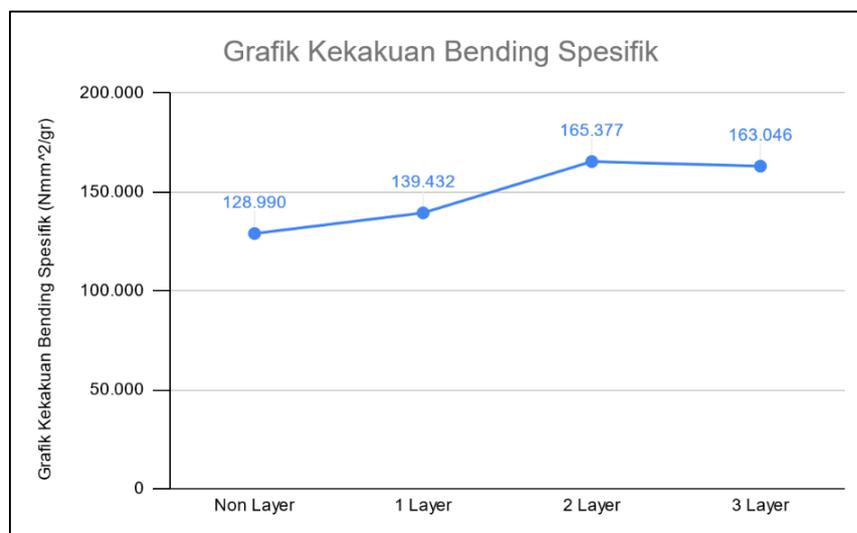
Gambar 4-16 Grafik Kekakuan *Bending*

Jumlah lapisan serat memberikan pengaruh terhadap kekuatan mekanik dari komposit. Karena pada nilai kekuatan *bending* terjadi peningkatan seiring dengan meningkatnya ketebalan *skin* (Prayoga., *et al* 2018). Peningkatan pada spesimen dengan 3 lapis *skin* tidak terlalu signifikan dan cenderung memiliki nilai yang hampir sama dengan spesimen dengan 2 lapis *skin* hal ini disebabkan oleh beban maksimal dan defleksi yang menurun. Beban maksimal yang mampu ditahan

spesimen dengan 3 lapis *skin* menurun sebab pemberian *skin* pada 1 permukaan menambah berat namun tidak menambah tegangan tarik. Peningkatan fraksi volume serat menyebabkan penurunan defleksi. defleksi yang rendah karena ikatan antara serat dengan matrik tidak kuat (Rahman., et al 2008), hal ini didukung oleh kegagalan pada spesimen yaitu debonding.

3. Kekakuan *Bending* Spesifik

Dari hasil pengolahan data spesimen dengan variasi lapis *skin* serat karbon didapatkan nilai kekakuan *bending* spesifik atau nilai kekakuan dari tiap gram spesimen yang disajikan dalam grafik pada gambar 4-17 didapatkan bahwa kenaikan nilai kekakuan *bending* spesifik spesimen mulai dari tanpa *skin* mengalami peningkatan saat bertambahnya 1 *layer skin* dan meningkat kembali saat bertambah menjadi 2 *layer skin*, namun pada spesimen dengan 3 *layer skin* mengalami penurunan nilai kekakuan *bending*, hal ini terjadi disebabkan oleh bertambahnya berat spesimen pada 3 *layer skin* sehingga walaupun nilai kekakuan *bending* tertinggi dimiliki oleh spesimen 3 *layer skin*, kekakuan yang dimiliki tiap gramnya menurun. Nilai kekakuan *bending* spesifik tertinggi ada pada spesimen dengan 2 *layer skin* sebesar 165.377,36 Nmm²/gr dan nilai kekakuan *bending* spesifik terendah ada pada spesimen dengan tanpa pelapisan *skin* sebesar 128.990,32 Nmm²/gr.



Gambar 4-17 Grafik Kekakuan *Bending* Spesifik

Core yang merupakan bagian utama dari komposit digunakan sebagai penyokong utama dan pendistribusi beban yang terjadi pada komposit agar distribusi beban yang diterima lebih merata ke semua bagian (Leite, 2013). Berdasarkan pernyataan tersebut penurunan dari kekakuan *bending* spesifik pada spesimen 3 *layer skin* berkaitan dengan nilai kekakuan *bending* dan penjelasan kekakuan *bending* pada gambar 4-16 dimana kenaikan nilai kekakuan *bending* pada spesimen 3 *layer skin* yang tidak signifikan dan cenderung sama dengan spesimen 2 *layer skin*, sehingga pada nilai kekakuan *bending* spesifik kembali mengalami penurunan karena berat dari spesimen yang bertambah tidak diimbangi dengan tegangan *tarik* yang mampu ditahan sehingga pendistribusian beban yang diterima *core* tidak merata ke semua bagian.

Menurut penelitian Banowati., et al (2022) ditemukan permasalahan yang sama yaitu penurunan tegangan *bending* pada *layer skin* yang paling banyak. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa komposit *serat karbon core* kayu balsa variasi 2 *layer skin* memiliki sifat *ductile* yang lebih baik dibandingkan variasi 4 *layer skin* dan 6 *layer skin*.

4.4.2 Pengaruh Perlakuan *Curing*

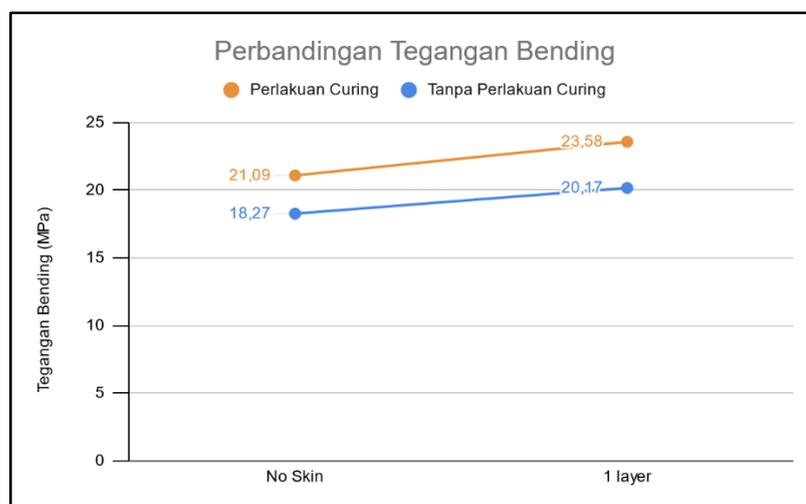
Pada Tabel 4-5 terdapat data spesimen dengan perlakuan *curing* dan spesimen tanpa perlakuan *curing* yang akan diolah datanya untuk mendapatkan perbandingan tegangan, kekakuan, dan kekakuan spesifik dari spesimen dengan perlakuan *curing* dan spesimen tanpa perlakuan *curing*. Perbandingan dilakukan hanya menggunakan spesimen dengan tanpa *skin* dan spesimen dengan 1 *layer skin* untuk menyamakan dengan data spesimen pada penelitian sebelumnya.

Tabel 4-5 Perbandingan Perlakuan *Curing* dan Tanpa *Curing*

Spesimen (<i>Curing</i>)	Tegangan Max	Kekakuan <i>Bending</i>	Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik
	(MPa)	(Nmm ²)	(Nmm ² /gr)
No <i>skin</i>	18,27	17.671.673,73	128.990,32
1 <i>layer</i>	20,17	19.622.033,15	139.432,47
Spesimen (Tanpa <i>Curing</i>)	Tegangan Max	Kekakuan <i>Bending</i>	Kekakuan <i>Bending</i> Spesifik
	(MPa)	(Nmm ²)	(Nmm ² /gr)
No <i>skin</i>	21,09	19.127.763,57	139.474,44
1 <i>layer</i>	23,58	22.629.044,23	157.369,32

1. Tegangan *Bending*

Dari hasil pengolahan data spesimen dengan perlakuan *curing* dan dibandingkan dengan data pada penelitian sebelumnya yang tanpa perlakuan *curing* kemudian disajikan dalam grafik pada gambar 4-18 pada spesimen yang tanpa pelapisan *skin* serat karbon kenaikan nilai tegangan *bending* pada spesimen dengan tanpa perlakuan *curing* nilainya 1,15 kali lipat lebih besar daripada spesimen dengan perlakuan *curing*, dan pada spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon didapatkan nilai tegangan *bending* pada spesimen dengan tanpa perlakuan *curing* nilainya 1,17 kali lebih besar dibandingkan spesimen dengan perlakuan *curing*.



Gambar 4-18 Grafik Perbandingan Tegangan *Bending*

2. Kekakuan *Bending*

Dari hasil pengolahan data spesimen dengan perlakuan *curing* dan dibandingkan dengan data pada penelitian sebelumnya yang tanpa perlakuan *curing* kemudian disajikan dalam grafik pada gambar 4-19 pada spesimen yang tanpa pelapisan *skin* serat karbon kenaikan nilai kekakuan *bending* pada spesimen dengan tanpa perlakuan *curing* nilainya 1,08 kali lipat lebih besar daripada spesimen dengan perlakuan *curing*, dan pada spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon didapatkan nilai kekakuan *bending* pada spesimen dengan tanpa perlakuan *curing* nilainya 1,15 kali lebih besar dibandingkan spesimen dengan perlakuan *curing*.



Gambar 4-19 Grafik Perbandingan Kekakuan *Bending*

3. Kekakuan *Bending* Spesifik

Dari hasil pengolahan data spesimen dengan perlakuan *curing* dan dibandingkan dengan data pada penelitian sebelumnya yang tanpa perlakuan *curing* kemudian disajikan dalam grafik pada gambar 4-18 pada spesimen yang tanpa pelapisan *skin* serat karbon kenaikan nilai kekakuan *bending* spesifik pada spesimen dengan tanpa perlakuan *curing* nilainya 1,08 kali lipat lebih besar daripada spesimen dengan perlakuan *curing*, dan pada spesimen dengan 1 lapis *skin* serat karbon didapatkan nilai kekakuan *bending* spesifik pada spesimen dengan tanpa perlakuan *curing* nilainya 1,13 kali lebih besar dibandingkan spesimen dengan perlakuan *curing*.



Gambar 4-20 Grafik Perbandingan Kekakuan *Bending* Spesifik

Berdasarkan dari ketiga nilai yang dibandingkan yaitu perbandingan tegangan *bending*, perbandingan kekakuan *bending*, dan perbandingan kekakuan *bending* spesifik yang terlihat pada gambar 4-18,4-19, dan 4-20. Dapat dilihat ketiga nilai tersebut menunjukkan grafik yang sama yaitu penurunan nilai pada spesimen dengan perlakuan *curing* atau spesimen dengan tanpa perlakuan *curing* memiliki nilai yang lebih tinggi daripada spesimen dengan perlakuan *curing*, hal ini disebabkan oleh temperature tinggi yang dapat merubah struktur dari spesimen komposit baik dari *core*, resin, dan *skin* dapat terjadi perubahan akibat panas atau temperature tinggi yang diterima. Menurut penelitian Utomo & Drastiawati (2021) ditemukan permasalahan yang sama yaitu penurunan nilai pada spesimen dengan perlakuan *curing*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan dengan uji SEM terlihat bahwa pada spesimen dengan *curing* 90°C terdapat lebih banyak *void* dan terdapat retak matrik, pada temperatur *curing* 90°C resin *epoxy* dan *void* menguap dalam jumlah yang banyak dan cepat akibat temperatur tinggi. Pada proses *curing* 90°C molekul-molekul *epoxy* dan *hardener* akan memiliki energi lebih sedikit untuk bergerak aktif membentuk ikatan *crosslink* yang lebih besar. karena sudah melebihi batas *Tg* resin *epoxy*. Ikatan *crosslink* adalah ikatan antar molekul-molekul dalam resin *epoxy*. Sehingga spesimen dengan *curing* 90°C memiliki banyak penyusutan volume, banyak terbentuk *void*, viskositas yang rendah, massa yang rendah, dan

ikatan *crosslink* yang lebih sedikit sehingga menghasilkan nilai uji *bending* yang rendah. Hal ini didukung oleh banyaknya kegagalan yang dialami spesimen.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pengujian *bending* material komposit 3D *print honeycomb ribs* dengan *skin serat karbon* didapat kesimpulan bahwa:

1. Pada spesimen material 3D *print* PLA dengan parameter *infill* 100% dengan penambahan *skin* pada 1 permukaan yang rata atau pada bagian *core* menghasilkan nilai kekakuan *bending* yang meningkat seiring bertambahnya pemberian lapis *skin serat karbon*, namun peningkatan yang terjadi tidak signifikan dan cenderung berpotensi mengalami penurunan disebabkan oleh pemberian *skin* hanya pada 1 permukaan tidak menambah kekuatan terhadap tegangan tarik, hal ini terbukti dengan menurunnya nilai tegangan *bending* dan nilai kekakuan *bending* spesifik pada spesimen dengan 3 lapis *skin*.
2. Perlakuan *curing* selama 10 menit dengan temperatur 60°C (temperatur tinggi) tidak berpengaruh terhadap meningkatnya nilai kekakuan *bending*. Perlakuan *curing* dapat mempengaruhi struktur spesimen yang menyebabkan penurunan hasil nilai tegangan *bending*, kekakuan *bending*, dan kekakuan *bending* spesifik. Hal tersebut dibuktikan dengan perbandingan spesimen yang dilakukan perlakuan *curing* dengan spesimen tanpa perlakuan *curing*. Nilai tegangan *bending*, kekakuan *bending*, dan kekakuan *bending* spesifik spesimen tanpa perlakuan *curing* lebih tinggi dibandingkan nilai spesimen dengan perlakuan *curing*.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

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

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan menggunakan pengujian SEM untuk mengetahui struktur *micro* yang terjadi pada spesimen yang mendapatkan perlakuan *curing*.
2. Perlu dilakukan penelitian dengan melakukan proses pemanasan tidak ke spesimen komposit secara utuh tapi cukup pemanasan pada resin karena sifat core dari filament PLA yang lemah terhadap temperatur tinggi.
3. Setiap proses pembuatan spesimen perlu memperhatikan parameter-parameter dalam pembuatan untuk meminimalisir kegagalan pada proses pembuatan, juga memperhatikan prosedur penggunaan dan keamanan K3 terutama penggunaan serat karbon yang berbahaya saat terkena kulit.
4. Pada saat pencampuran antara *epoxy* dan *hardener* harus sesuai dengan standar dan takaran yang tepat agar proses pengeringan spesimen menjadi keras sempurna.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprillio, Y. (2022). Pengaruh Diameter *Honeycomb Ribs* Pada Produk Acrylonitrile Butadiene Styrene (Abs) 3d *Printing Fused Filament Fabrication (Fff)* Yang Diperkuat Komposit Serat karbon.
<https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/41697>
- Hidayat, A., & Manik, P. (2016). Analisa teknis komposit *sandwich* berpenguat serat daun nanas dengan *core* serbuk gergaji kayu sengon laut ditinjau dari kekuatan tekuk dan impak. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 4(11): 265 – 273.
- Kaw, A.K., (1997), *Mechanics Of Composite Material*, CRC Press, Boca Raton.
- Khalil, A., Yaufi, A., dan Syaefuddin, E. A. (2020). Pengaruh *layer thickness* dan orientasi 3D *printing* terhadap uji tarik material ABS. *Prosiding Seminar Nasional NCIET*, 1(1): 219 – 226.
- Leite, P. (2013). Optimal design of architected sandwich panels for multifunctional propertis. *Saint-martin-d'heres, prancis : thesis Universitas de Grenoble*.
- Mubarok, F. S. (2022). Pengaruh Ketebalan *Hexagonal Ribs* Pada Produk *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) 3D Printing Fused Filament Fabrication (FFF)* Diperkuat Komposit *Carbon Fiber*. Tugas Akhir
- Nugraha, D. E. B., Setiawan, F., dan Sehono. (2022). Eksperimen komposit berbahan dasar tanaman mendong menggunakan metode *vacuum baging* terhadap uji tarik. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy (Jamere)*, 2(2): 36 – 41.
- Nugroho, A. T. P. (2011). Pengaruh Tebal *Skin* Dan *Core* Terhadap Kekuatan *Bending* Komposit Sandwich Serat Rami—Polyester Dengan *Core* Sekam Padi-Ureaformaldehyde.
<https://digilib.uns.ac.id/dokumen/24716/Pengaruh-tebal-skin-dan-core-terhadap-kekuatan-bending-komposit-sandwich-serat-rami-polyester-dengan-core-sekam-padi-urea-formaldehyde>

- Oliviandes, F. (2021). Analisis pengaruh jumlah lapisan *skin* pada komposit *sandwich* terhadap uji *bending* menggunakan metode *vacuum infusion*. Tugas Akhir.
- Petras, A. (1998). Design of Sandwich Structures. dissertation Cambridge University Engineering Department.
- Prastyadi, C. (2017). Pengaruh Variasi Fraksi Volume, Temperatur, Waktu *Curing* dan Post-*Curing* Terhadap Karakteristik Tekan Komposit Polyester - Partikel Hollow Glass Micropheres (HGM) IM30K [Undergraduate, Institut Teknologi Sepuluh Nopember].<https://repository.its.ac.id/3156/>
- Prayoga, D. A., Eryawanto., B., dan Hadi, Q. (2018). Pengaruh ketebalan *skin* terhadap kekuatan *bending* dan tarik komposit *sandwich* dengan *honeycomb polypropylene* sebagai *core*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 18(1): 23 – 28.
- Pulungan, M. A. (2017). Analisis kemampuan rompi anti peluru yang terbuat dari komposit HGM-Epoxy dan serat karbon dalam menyerap energi akibat *impact* peluru. *Tesis*.
- Rahman, M. B. N., Sundawa, T., dan Diharjo, K. (2008). Studi optimasi peningkatan kekakuan *bending* komposit berpenguat serat nanas-nanasan (*Bromeliaceae*) kontinu searah. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, 11(2): 207 – 217.
- Rokhman, H. M. (2023). Pengaruh penambahan *skin* serat karbon dan *infill* 100% material *honeycomb ribs 3d print* PLA terhadap kekakuan *bending*. *Tugas Akhir*.
- Sari, E. D. R., Respati, S. M. B., dan Nugroho, A. (2020). Analisis kekuatan *bending* dan tarik komposit serat karbon-resin dengan variasi waktu *curing* dan suhu penahanan 80°C. *Jurnal Momentum*, 16(2): 150 – 155.
- Sari, N. (2018). Analisa pengaruh sudut karbon *twill* dan *fiber e-glass* dengan *core polyurethane* pada komposit *sandwich* menggunakan metode *bagging vacuum* dan pengujian *three point bending*. *Tugas Akhir*.
- Syaukani, M., Paundra, F., Qalbina, F., Arirohman, I. D., Yunesti, P., dan Sabar. (2021). Desain dan analisis mesin *press* komposit kapasitas 20 ton. *Journal of Science, Technology, and Virtual Science*, 1(1): 29 – 34.

Utomo, W. B., & Drastiawati, N. S. (2021). Pengaruh variasi jenis *core*, temperatur *curing*, dan post-*curing* terhadap karakteristik *bending* komposit *sandwich* serat karbon dengan metode *vacuum infusion*. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(2): 45 – 54.

LAMPIRAN



LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN BENDING

No.	Variasi Spesimen	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Pmax (KN)	Defleksi (mm)	Tegangan Bending (MPa)
1	Non Layer_1	19.66	50.20	1.40	8.6	18.40
2	Non Layer_2	19.74	50.08	1.36	7.51	17.77
3	Non Layer_3	19.60	50.18	1.41	8.10	18.65
4	1 Layer_1	20.22	50.18	1.66	7.86	20.63
5	1 Layer_2	20.20	50.10	1.66	8.40	20.71
6	1 Layer_3	20.22	50.08	1.54	9.26	19.18
7	2 Layer_1	20.46	50.20	1.68	7.12	20.39
8	2 Layer_2	20.44	50.10	1.68	7.15	20.47
9	2 Layer_3	20.54	50.12	1.79	7.56	21.59
10	3 Layer_1	20.70	50.20	1.74	6.39	20.63
11	3 Layer_2	20.72	50.10	1.61	7.03	19.09
12	3 Layer_3	20.70	50.08	1.61	7.64	19.13

Keterangan:

1. Pengujian dilakukan tanggal 8 Desember 2023
2. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine
3. Standar spesimen menggunakan ASTM C393

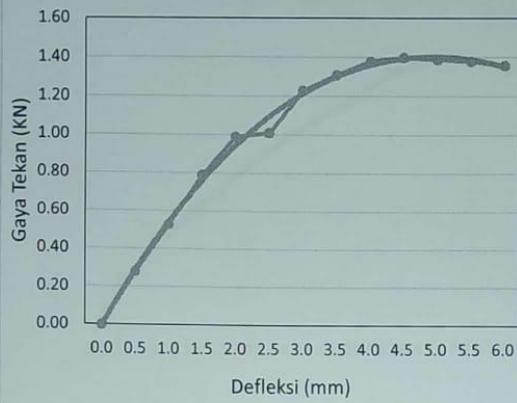
Identitas Penguji :

Nama : Ahmad Nizham Royhan
NIM : 19525115
Institusi : Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia

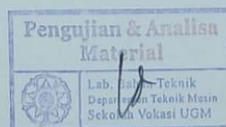
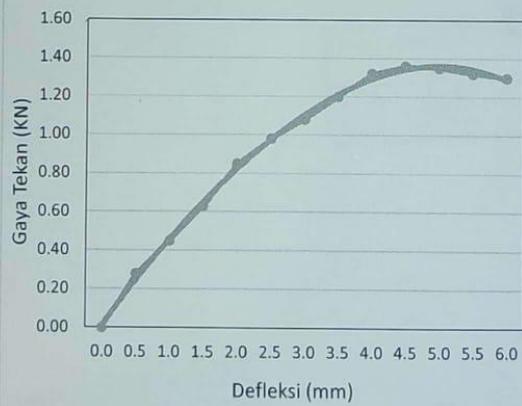
Yogyakarta, 8 Desember 2023
Staf Laboratorium Bahan Teknik

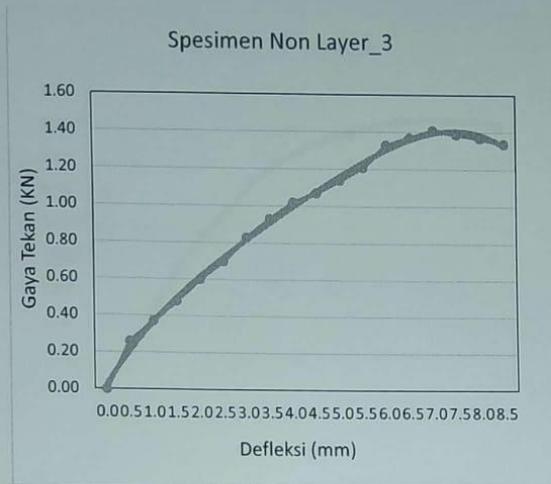
Pengujian & Analisa Material
Laboratorium Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM
Dr. Lilik Dwi Setyana, S.T., M.T
NIP. 197703312002121002

Spesimen Non Layer_1

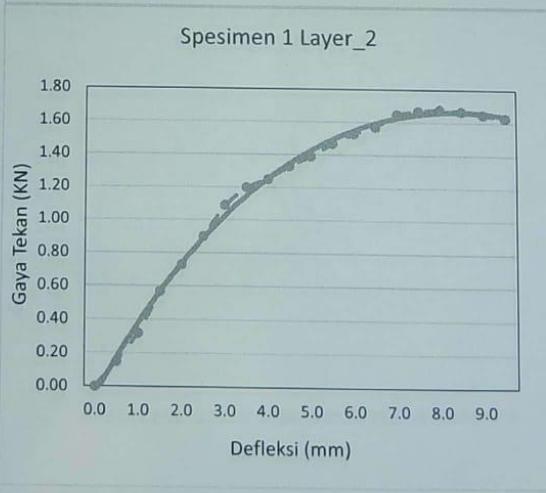
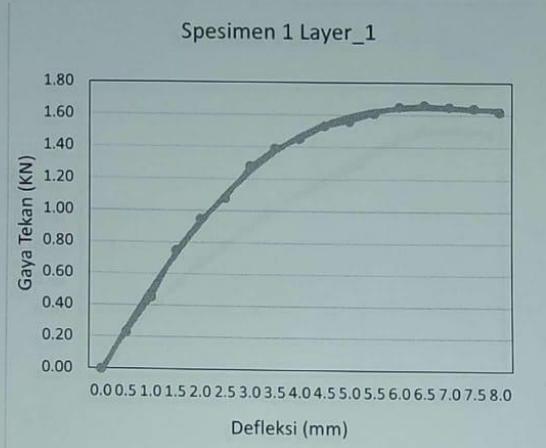


Spesimen Non Layer_2

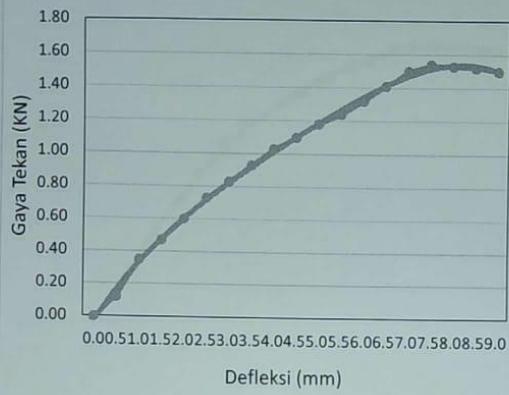




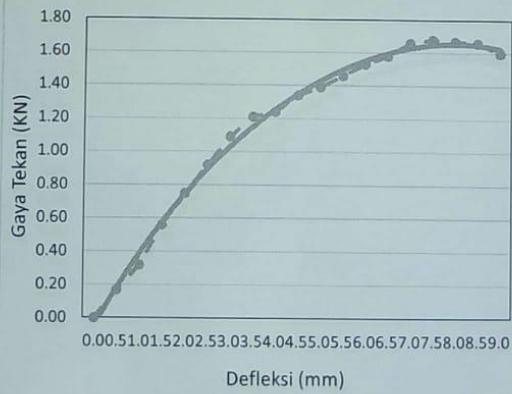
Pengujian & Analisa
Material
Lab. Bahan Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM

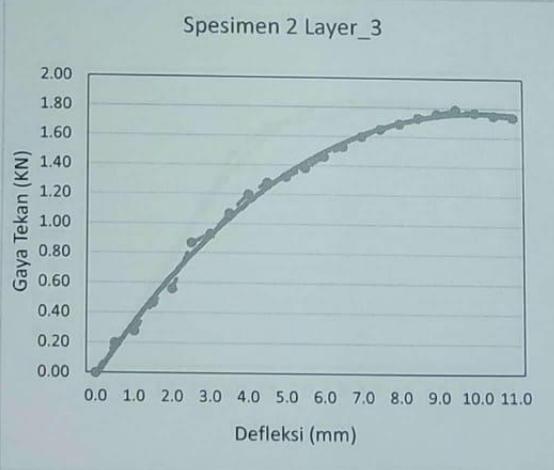
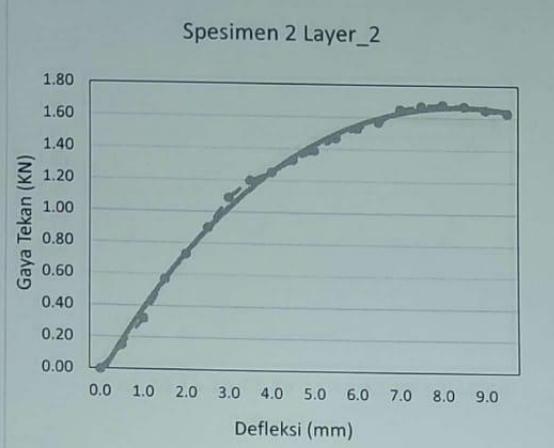


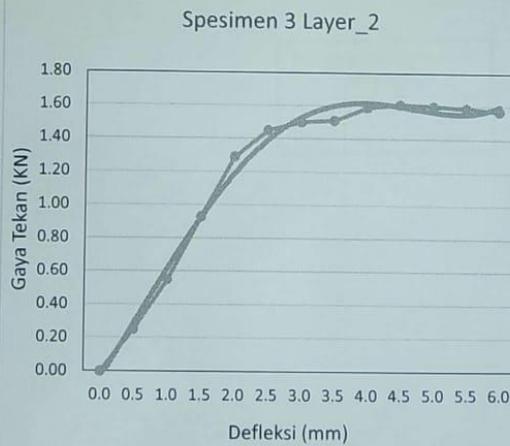
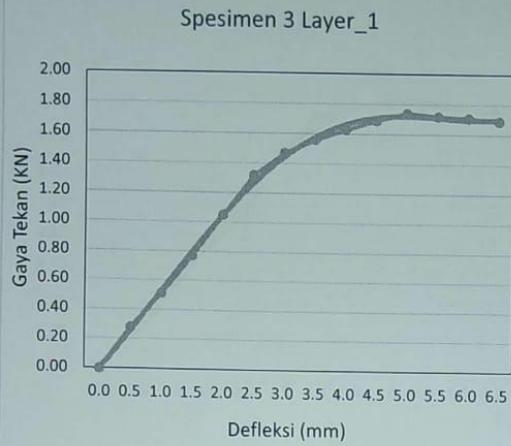
Spesimen 1 Layer_3

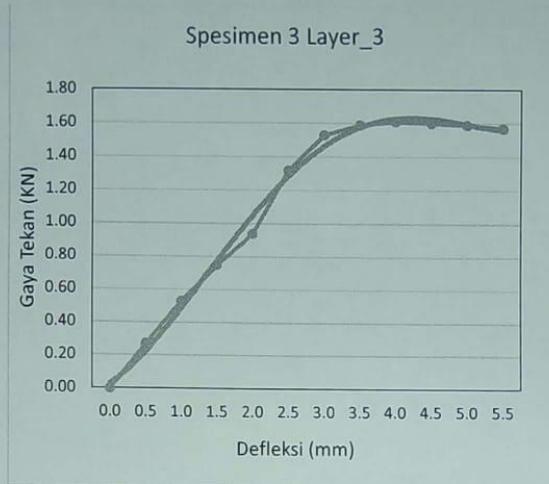


Spesimen 2 Layer_1











Designation: C393/C393M – 20

Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure¹

This standard is issued under the fixed designation C393/C393M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the core shear properties of flat sandwich constructions subjected to flexure in such a manner that the applied moments produce curvature of the sandwich facing planes. Permissible core material forms include those with continuous bonding surfaces (such as balsa wood and foams) as well as those with discontinuous bonding surfaces (such as honeycomb).

1.2 *Units*—The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system are not necessarily exact equivalents; therefore, to ensure conformance with the standard, each system shall be used independently of the other, and values from the two systems shall not be combined.

1.2.1 Within the text, the inch-pound units are shown in brackets.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.4 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.09 on Sandwich Construction.

Current edition approved July 1, 2020. Published August 2020. Originally approved in 1957. Last previous edition approved in 2016 as C393/C393M – 16. DOI: 10.1520/C0393_C0393M-20.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

C273 Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials

D883 Terminology Relating to Plastics

D3410 Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading

D3878 Terminology for Composite Materials

D5229/D5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials

D7249/D7249M Test Method for Facesheet Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure

D7250/D7250M Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process

E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E456 Terminology Relating to Quality and Statistics

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D3878 defines terms relating to high-modulus fibers and their composites, as well as terms relating to sandwich constructions. Terminology D883 defines terms relating to plastics. Terminology E6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E456 and Practice E177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D3878 shall have precedence over the other terminologies.

3.2 *Symbols:*

b = specimen width

c = core thickness

CV = coefficient of variation statistic of a sample population for a given property (in percent)

d = sandwich total thickness

D^{nom} = effective sandwich flexural stiffness

E_f = effective facing chord modulus

ϵ = measuring strain in facing

- F^u = facing ultimate strength (tensile or compressive)
 F_c = core compression allowable strength
 F_s = core shear allowable strength
 F_s^{ult} = core shear ultimate strength
 F_s^{yield} = core shear yield strength
 k = core shear strength factor to ensure core failure
 L = length of loading span
 S = length of support span
 l_{pad} = length of loading pad
 n = number of specimens
 P = applied force
 P_{max} = maximum force carried by test specimen before failure
 F_Z^{fm} = ultimate flatwise tensile strength
 P_{max} = maximum force carried by test specimen before failure
 S_{n-1} = standard deviation statistic of a sample population for a given property
 σ = facing stress or strength
 t = facing thickness
 x_1 = test result for an individual specimen from the sample population for a given property
 \bar{x} = mean or average (estimate of mean) of a sample population for a given property

4. Summary of Test Method

4.1 This test method consists of subjecting a beam of sandwich construction to a bending moment normal to the plane of the sandwich. Force versus deflection measurements are recorded.

4.2 The only acceptable failure modes are core shear or core-to-facing bond. Failure of the sandwich facing preceding failure of the core or core-to-facing bond is not an acceptable failure mode. Use Test Method [D7249/D7249M](#) to determine facing strength.

5. Significance and Use

5.1 Flexure tests on flat sandwich construction may be conducted to determine the sandwich flexural stiffness, the core shear strength and shear modulus, or the facings compressive and tensile strengths. Tests to evaluate core shear strength may also be used to evaluate core-to-facing bonds.

5.2 This test method is limited to obtaining the core shear strength or core-to-facing shear strength and the stiffness of the sandwich beam, and to obtaining load-deflection data for use in calculating sandwich beam flexural and shear stiffness using Practice [D7250/D7250M](#).

NOTE 1—Core shear strength and shear modulus are best determined in accordance with Test Method [C273](#), provided bare core material is available.

5.3 Facing strength is best determined in accordance with Test Method [D7249/D7249M](#).

5.4 Practice [D7250/D7250M](#) covers the determination of sandwich flexural and shear stiffness and core shear modulus using calculations involving measured deflections of sandwich flexure specimens.

5.5 This test method can be used to produce core shear strength and core-to-facing shear strength data for structural design allowables, material specifications, and research and development applications; it may also be used as a quality control test for bonded sandwich panels.

5.6 Factors that influence the shear strength and shall therefore be reported include the following: facing material, core material, adhesive material, methods of material fabrication, core geometry (cell size), core density, adhesive thickness, specimen geometry, specimen preparation, specimen conditioning, environment of testing, specimen alignment, loading procedure, speed of testing, and adhesive void content. Further, core-to-facing strength may be different between precured/bonded and co-cured facings in sandwich panels with the same core and facing material.

NOTE 2—Concentrated loads on beams with thin facings and low density cores can produce results that are difficult to interpret, especially close to the failure point. Wider load pads with rubber pads may assist in distributing the loads.

6. Interferences

6.1 *Material and Specimen Preparation*—Poor material fabrication practices and damage induced by improper specimen machining are known causes of high data scatter in composites and sandwich structures in general. A specific material factor that affects sandwich cores is variability in core density. Important aspects of sandwich core specimen preparation that contribute to data scatter include the existence of joints, voids or other core discontinuities, out-of-plane curvature, and surface roughness.

6.2 *Geometry*—Specific geometric factors that affect core shear strength include core orthotropy (that is, ribbon versus transverse direction for honeycomb core materials) and core cell geometry.

6.3 *Environment*—Results are affected by the environmental conditions under which specimens are conditioned, as well as the conditions under which the tests are conducted. Specimens tested in various environments can exhibit significant differences in both strength behavior and failure mode. Critical environments must be assessed independently for each specific combination of core material, facing material, and core-to-facing interfacial adhesive (if used) that is tested.

6.4 *Core Material*—If the core material has insufficient shear or compressive strength, it is possible that the core may locally crush at or near the loading points, thereby resulting in facing failure due to local stresses. In other cases, facing failure can cause local core crushing. When there is both facing and core failure in the vicinity of one of the loading points, it can be difficult to determine the failure sequence in a post-mortem inspection of the specimen as the failed specimens look very similar for both sequences. For some core materials, the shear strength is a function of the direction that the core is oriented relative to the length of the specimen.

7. Apparatus

7.1 *Micrometers and Calipers*—A micrometer with a 4 to 7 mm [0.16 to 0.28 in.] nominal diameter ball-interface or a flat

anvil interface shall be used to measure the specimen thickness. A ball interface is recommended for thickness measurements when facings are bonded to the core and at least one surface is irregular (for example, the bag-side of a thin facing laminate that is neither smooth nor flat). A micrometer or caliper with a flat anvil interface is recommended for thickness measurements when facings are bonded to the core and both surfaces are smooth (for example, tooled surfaces). A micrometer or caliper with a flat anvil interface shall be used for measuring length and width, as well as the specimen thickness when no facings are present. The use of alternative measurement devices is permitted if specified (or agreed to) by the test requestor and reported by the testing laboratory. The accuracy of the instruments shall be suitable for reading to within 1 % of the sample dimensions. For typical specimen geometries, an instrument with an accuracy of ± 0.025 mm [± 0.001 in.] is adequate for the length, width, and thickness measurements.

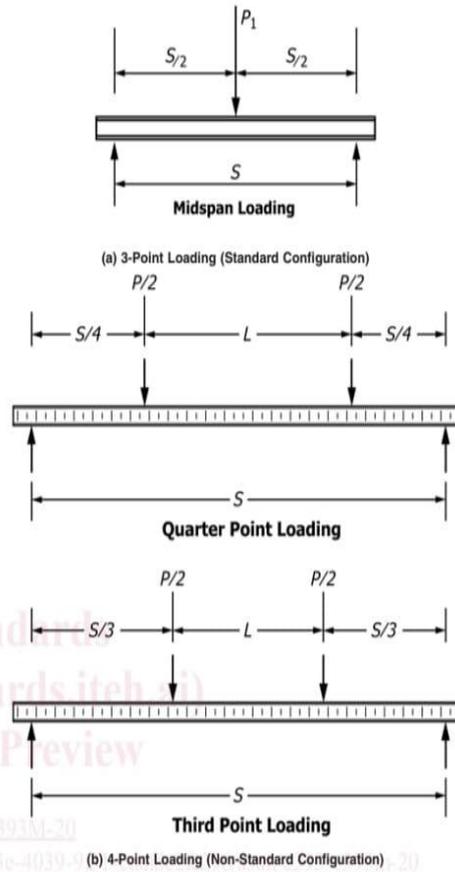
NOTE 3—The accuracies given above are based on achieving measurements that are within 1 % of the sample length, width, and thickness.

7.2 Loading Fixtures—The loading fixture shall consist of either a 3-point or 4-point loading configuration with two support bars that span the specimen width located below the specimen, and one or two loading bars that span the specimen width located on the top of the specimen (Fig. 1). The force shall be applied vertically through the loading bar(s), with the support bars fixed in place in the test machine.

7.2.1 Standard Configuration—The standard loading fixture shall be a 3-point configuration and shall have the centerlines of the support bars separated by a distance of 150 mm [6.0 in.].

7.2.2 Non-Standard Configurations—All other loading fixture configurations are considered non-standard, and details of the fixture geometry shall be documented in the test report. Fig. 3 shows a typical 4-point short beam test fixture. Non-standard 3- and 4-point loading configurations have been retained within this standard (a) for historical continuity with previous versions of Test Method C393, (b) because some sandwich panel designs require the use of non-standard loading configurations to achieve core or bond failure modes, and (c) load-deflection data from non-standard configurations may be used with Practice D7250/D7250M to obtain sandwich beam flexural and shear stiffnesses.

7.2.3 Support and Loading Bars—The bars shall be designed to allow free rotation of the specimen at the loading and support points. The bars shall have sufficient stiffness to avoid significant deflection of the bars under load; any obvious bowing of the bars or any gaps occurring between the bars and the test specimen during loading shall be considered significant deflection. The recommended configuration has a 25 mm [1.0 in.] wide flat steel loading block to contact the specimen (through rubber pressure pads) and is loaded via either a cylindrical pivot or a V-shaped bar riding in a V-groove in the top of the flat-bottomed steel loading pad. The tips of the V-shaped loading bars shall have a minimum radius of 3 mm [0.12 in.]. The V-groove in the loading pad shall have a radius larger than the loading bar tip and the angular opening of the groove shall be such that the sides of the loading bars do not contact the sides of the V-groove during the test. Loading bars consisting of 25 mm [1.0 in.] diameter steel cylinders may also



Configuration	Support Span (S)	Load Span (L)
Standard 3-Point (Mid-Span)	150 mm [6.0 in.]	0.0
Non-Standard 4-Point (Quarter-Span)	S	S/2
4-Point (Third-Span)	S	S/3

FIG. 1 Loading Configurations

be used, but there is a greater risk of local specimen crushing with cylindrical bars. Also, the load and support span lengths tend to increase as the specimen deflects when cylindrical loading bars without V-grooved loading pads are used (for example, rolling supports).

7.2.4 Pressure Pads—Rubber pressure pads having a Shore A durometer of approximately 60, a nominal width of 25 mm [1.0 in.], a nominal thickness of 3 mm [0.125 in.], and spanning the full width of the specimen shall be used between the loading bars and specimen to prevent local damage to the facings.

7.3 Testing Machine—The testing machine shall be in accordance with Practices E4 and shall satisfy the following requirements:

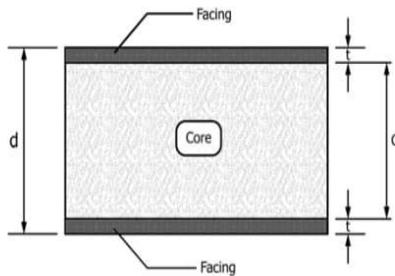


FIG. 2 Sandwich Panel Thickness Dimensions



FIG. 3 Short Beam—4-Point (Third-Span) Short Beam Loading Configuration

7.3.1 *Testing Machine Configuration*—The testing machine shall have both an essentially stationary head and a movable head.

7.3.2 *Drive Mechanism*—The testing machine drive mechanism shall be capable of imparting to the movable head a controlled velocity with respect to the stationary head. The velocity of the movable head shall be capable of being regulated in accordance with 11.4.

7.3.3 *Force Indicator*—The testing machine force-sensing device shall be capable of indicating the total force being carried by the test specimen. This device shall be essentially free from inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the force with an accuracy over the force range(s) of interest of within $\pm 1\%$ of the indicated value.

7.4 *Deflectometer*—The deflection of the specimen shall be measured in the center of the support span by a properly calibrated device having an accuracy of $\pm 1\%$ or better.

NOTE 4—The use of crosshead or actuator displacement for the beam mid-span deflection produces inaccurate results, particularly for 4-point loading configurations; the direct measurement of the deflection of the mid-span of the beam must be made by a suitable instrument.

7.5 *Conditioning Chamber*—When conditioning materials at non-laboratory environments, a temperature/vapor-level controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ [$\pm 5\text{ }^\circ\text{F}$] and the required relative humidity level to within $\pm 3\%$. Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

7.6 *Environmental Test Chamber*—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the gage section of the test specimen at the required test environment during the mechanical test.

8. Sampling and Test Specimen

8.1 *Sampling*—Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, as in the case of a designed experiment. For statistically significant data, consult the procedures outlined in Practice E122. Report the method of sampling.

8.2 *Geometry*—The standard specimen configuration should be used whenever the specimen design equations in 8.2.3 indicate that the specimen will produce the desired core or core-to-facing bond failure mode. In cases where the standard specimen configuration will not produce a desired failure, a non-standard specimen shall be designed to produce a core or bond failure mode.

8.2.1 *Standard Configuration*—The test specimen shall be rectangular in cross section, with a width of 75 mm [3.0 in.] and a length of 200 mm [8.0 in.]. The depth of the specimen shall be equal to the thickness of the sandwich construction.

8.2.2 *Non-Standard Configurations*—For non-standard specimen geometries, the width shall be not less than twice the total thickness nor more than six times the total thickness, not less than three times the dimension of a core cell, nor greater than one half the span length. The specimen length shall be equal to the support span length plus 50 mm [2 in.] or plus one half the sandwich thickness, whichever is the greater. Limitations on the maximum specimen width are intended to allow for the use of simplified sandwich beam calculations; plate flexure effects must be considered for specimens that are wider than the restrictions specified above.

8.2.3 *Specimen Design*—Proper design of the sandwich flexure test specimen for determining shear strength of the core or core-to-facing bond is required to avoid facing failures. The facings must be sufficiently thick or the support span sufficiently short, or both, such that transverse shear forces are produced at applied forces low enough so that the allowable facing stress will not be exceeded. However, if the facings are too thick, the transverse shear force will be carried to a considerable extent by the facings, thus leading to a high

apparent core shear strength as computed by the equations given in this standard. The following equations can be used to size the test specimen (these equations assume that both facings have the same thickness and modulus, and that the facing thickness is small relative to the core thickness [$t/c \leq -0.10$]):

The support span length shall satisfy:

$$S \geq \frac{2k\sigma t}{F_c} + L \quad (1)$$

or, the core shear strength shall satisfy:

$$F_c \leq \frac{2k\sigma t}{(S - L)} \quad (2)$$

The core compression strength shall satisfy:

$$F_c \geq \frac{2(c+t)\sigma t}{(S-L)l_{pad}} \quad (4\text{-point loading}) \quad (3)$$

$$F_c \geq \frac{4(c+t)\sigma t}{Sl_{pad}} \quad (3\text{-point loading})$$

where:

- S = support span length, mm [in.],
- L = loading span length, mm [in.] ($L = 0$ for 3-point loading),
- σ = expected facing ultimate strength, MPa [psi],
- t = facing thickness, mm [in.],
- c = core thickness,
- F_c = estimated core shear strength, MPa [psi],
- k = facing strength factor to ensure core failure (recommend $k = 0.75$),
- l_{pad} = dimension of loading pad in specimen lengthwise direction, mm [in.], and
- F_c = core compression allowable strength, MPa [psi].

8.3 Facings:

8.3.1 Layup—The apparent flexural stiffness obtained from this method may be dependent upon the facing stacking sequence, albeit to a much lesser degree than is typical for laminate flexure. For the standard test configuration, facings consisting of a laminated composite material shall be balanced and symmetric about the sandwich beam mid-plane.

8.3.2 Stiffness—For the standard specimen, the facings shall be the same material, thickness, and layup. The calculations assume constant and equal upper and lower facing stiffness properties. This assumption may not be applicable for certain facing materials (such as aramid fiber composites) which have significantly different tensile and compressive moduli or which exhibit significant non-linear stress-strain behavior.

8.3.3 Facing Thickness—Accurate measurement of facing thickness is difficult after bonding or co-curing of the facings and core. The test requestor is responsible for specifying the facing thicknesses to be used for the calculations in this test method. For metallic or precured composite facings which are secondarily bonded to the core, the facing thickness should be measured prior to bonding. In these cases, the test requestor may specify that either or both measured and nominal thicknesses be used in the calculations. For co-cured composite facings, the thicknesses are generally calculated using nominal ply thickness values.

8.4 Specimen Preparation and Machining—Specimen preparation is important for this test method. Take precautions when cutting specimens from large panels to avoid notches, undercuts, rough or uneven surfaces, or delaminations due to inappropriate machining methods. Obtain final dimensions by water-lubricated precision sawing, milling, or grinding. The use of diamond coated machining tools has been found to be extremely effective for many material systems. Edges should be flat and parallel within the specified tolerances. Record and report the specimen cutting preparation method.

8.5 Labeling—Label the test specimens so that they will be distinct from each other and traceable back to the panel of origin, and will neither influence the test nor be affected by it.

9. Calibration

9.1 The accuracy of all measuring equipment shall have certified calibrations that are current at the time of use of the equipment.

10. Conditioning

10.1 The recommended pre-test specimen condition is effective moisture equilibrium at a specific relative humidity per Test Method D5229/D5229M; however, if the test requestor does not explicitly specify a pre-test conditioning environment, conditioning is not required and the test specimens may be tested as prepared.

10.2 The pre-test specimen conditioning process, to include specified environmental exposure levels and resulting moisture content, shall be reported with the test data.

NOTE 5—The term moisture, as used in Test Method D5229/D5229M, includes not only the vapor of a liquid and its condensate, but the liquid itself in large quantities, as for immersion.

10.3 If no explicit conditioning process is performed, the specimen conditioning process shall be reported as “unconditioned” and the moisture content as “unknown”.

11. Procedure

11.1 Parameters to Be Specified Before Test:

11.1.1 The specimen sampling method, specimen geometry, and conditioning travelers (if required).

11.1.2 The properties and data reporting format desired.

11.1.3 The environmental conditioning test parameters.

11.1.4 The nominal thicknesses of the facing materials.

NOTE 6—Determine specific material property, accuracy, and data reporting requirements prior to test for proper selection of instrumentation and data recording equipment. Estimate the specimen strength to aid in transducer selection, calibration of equipment, and determination of equipment settings.

11.2 General Instructions:

11.2.1 Report any deviations from this test method, whether intentional or inadvertent.

11.2.2 Condition the specimens as required. Store the specimens in the conditioned environment until test time, if the test environment is different than the conditioning environment.

11.2.3 Before testing, measure and record the specimen length, width and thickness at three places in the test section. Measure the specimen length and width with an accuracy of ± 0.254 mm [± 0.010 in.]. Measure the specimen thickness