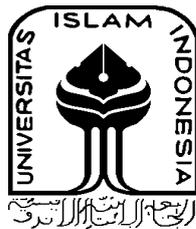


**ANALISIS PENGARUH JUMLAH LAPISAN *SKIN* PADA
KOMPOSIT *SANDWICH* TERHADAP UJI BENDING
MENGUNAKAN METODE *VACUUM INFUSION***

TUGAS AKHIR

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



Disusun Oleh:

Nama : Fadhyl Oliviandes

No. Mahasiswa : 17525044

NIRM 2017030245

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

2021

PERNYATAAN ORISINALITAS TUGAS AKHIR

Dengan ini saya yang bertanda tangan dibawah ini, Fadhyl OlivianDES selaku penulis Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Jumlah Lapisan *Skin* Pada Komposit *Sandwich* Terhadap Uji Bending Menggunakan Metode *Vacuum Infusion*” menyatakan bahwa dalam penulisan ini merupakan hasil karya asli penulis. Apabila dalam Tugas Akhir ini terbukti merupakan hasil duplikasi ataupun plagiasi dari penulis lain, penulis bersedia menerima berbagai bentuk sanksi akademik dan hukum sesuai dengan peraturan yang berlaku. Demikian surat pernyataan keaslian ini yang saya buat dalam keadaan sadar, penuh pertanggungjawaban dan tanpa adanya paksaan dari berbagai pihak.

Yogyakarta, 13 Januari 2022



Fadhyl OlivianDES
17525044

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**ANALISIS PENGARUH JUMLAH LAPISAN *SKIN* PADA
KOMPOSIT *SANDWICH* TERHADAP UJI BENDING
MENGUNAKAN METODE *VACCUM INFUSION***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

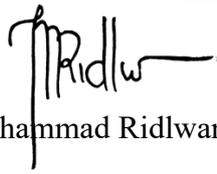
Nama : Fadhyl Oliviandes

No. Mahasiswa : 17525044

NIRM 2017030245

Yogyakarta, 13 Januari 2022

Pembimbing ,



Muhammad Ridlwan S.T., M.T

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**ANALISIS PENGARUH JUMLAH LAPISAN *SKIN* PADA
KOMPOSIT *SANDWICH* TERHADAP UJI BENDING
MENGUNAKAN METODE *VACCUM INFUSION***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh:

Nama : Fadhyl OlivianDES
No. Mahasiswa : 17525044
NIRM : 2017030245

Tim Penguji

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



Tanggal : 07/02/2022

Arif Budi Wicaksono, S.T., M.Eng
Anggota I



Tanggal : 4 Februari 2022

Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D
Anggota II



Tanggal : 3 Februari 2022

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin




Rusdiyono S.T., M.Eng., Ph.D.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini saya persembahkan kepada :

Orang tua saya Bapak Oyong Tarulin dan Ibu Linda Yetri yang telah memberikan nasihat dan doa yang tulus kepada saya sampai penulisan tugas akhir ini selesai.

Abang saya Dio Aulia Sandy, adik saya yang pertama Sabean Rizki Multafaq dan adik kedua saya Aretia Rizki Mulwafaq yang selalu menjadi penyemangat saat mengerjakan tugas akhir ini

HALAMAN MOTTO

“Kalau hidup hanya sekedar hidup, kera dirimba juga hidup. Kalau kerja hanya sekedar kerja, kerbau disawah juga bekerja.”

(Buya Hamka)

“Ketika kita melakukan sesuatu namun tak bisa, janganlah mengeluh, tapi kurangi waktu tidurmu, kurangi waktu makan mu, berusaha!

Untuk mendapatkan anganmu, untuk menggapai mimpimu hanya ada satu cara, bertindak!

Ujung Bahagia manusia itu disaat dirinya bisa bermanfaat bagi sesama dan lingkungan disekitarnya.”

(Ricky Elson)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH



Assalamualaikum Wr. Wb

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, dengan segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Tugas Akhir. Sholawat dan salam semoga tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, serta pengikutnya hingga akhir zaman. Dalam kesempatan ini penulis banyak mendapatkan saran, dorongan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala hati perkenankanlah penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Dr. Risdiyono, S.T., M.Eng. selaku Kepala Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Muhammad Ridlwan, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan dukungan dan bimbingan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir.
4. Bapak Oyong Tarulin dan Ibu Linda Yetri selaku orang tua serta Dio Aulia, Sabean Rizki dan Aretia Rizki selaku saudara saya yang telah memberikan doa, semangat, perhatian, dan kasih sayang yang begitu tulus.
5. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin, terima kasih atas ilmu pengetahuan yang diberikan selama masa perkuliahan.
6. Teman seperjuangan M.Ashfan “kemkuy”, Azra Haidar “dek dar” dan Galang Pangestu “dek gal” yang sudah saling membantu selama pengerjaan tugas akhir ini.
7. Teman-teman kontrakan baik, teman-teman kos las vegas dan teman-teman dari kota asal saya atas canda tawa dan semangatnya selama perkuliahan berlangsung.
8. Untuk orang terdekat saya Indah Kartika yang tiada henti memberi semangat kepada saya dalam mengerjakan tugas akhir ini.
9. Untuk teman saya Muhammad Afif “Bon” yang selalu siap saya susahkan.

10. Teruntuk semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, penulis mengucapkan banyak terima kasih atas suka duka yang telah diberikan selama penulis berkuliah, semoga kebaikannya dapat diberi balasan oleh Allah SWT.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih terdapat banyak kesalahan, maka dari itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dalam penulisan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 13 Januari 2022



Fadhyl Olivianides

17525044

ABSTRACT

Composite is a material consisting of two or more forming materials that have different properties from the constituent materials. The sandwich composite in this study is a composite layer consisting of (skin) using fiberglass and core material (core) using PLA with the vacuum infusion method. In this study, the researchers varied the number of layers of fiberglass (skin) using 2,3 and 4 layers using a 3D print core. This study aims to compare the value of the modulus of elasticity in each layer of fiberglass (skin) using a bending test. This bending test was carried out by the Gadjah Mada University Laboratory, and based on the test results, the highest stiffness value was obtained, namely in the variation of 2 layers of skin with a value of 4.131.398,63 Nmm^2 . The results of the specimen after the vacuum infusion process experienced changes in dimensions, namely in the weight and height of the specimen due to the addition of fiberglass (skin) attached to the specimen.

Keywords: Composite sandwich, skin thickness, Vacuum Infusion, Bending Test

ABSTRAK

Komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih material pembentuk yang memiliki sifat yang berbeda dari material pembentuknya. Komposit *sandwich* pada penelitian ini merupakan lapisan komposit yang terdiri dari (*skin*) menggunakan *fiberglass* dan material inti (*core*) menggunakan PLA dengan metode *vacuum infusion*. Pada penelitian ini peneliti bervariasi jumlah lapisan *fiberglass (skin)* menggunakan 2,3 dan 4 lapisan dengan menggunakan *core 3D printing*. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai kekakuan pada masing-masing lapisan *fiberglass (skin)* menggunakan pengujian bending. Pengujian bending ini dilakukan Laboratorium Universitas Gadjah Mada dan berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai kekakuan tertinggi yaitu pada variasi 2 lapisan *skin* dengan nilai 4.131.398,63 *Nmm*². Hasil spesimen setelah dilakukan proses *vacuum infusion* mengalami perubahan dimensi yaitu pada berat dan tinggi spesimen karena penambahan *fiberglass (skin)* yang menempel pada spesimen.

Kata kunci: Komposit *sandwich*, Ketebalan *skin*, *Vacuum Infussion*, Pengujian Bending

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| Halaman Judul | i |
| Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing | ii |
| Lembar Pengesahan Dosen Penguji | iii |
| Halaman Persembahan | 4 |
| Halaman Motto | 5 |
| Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih | 6 |
| Abstract..... | 8 |
| Daftar Isi | x |
| Daftar Tabel..... | xii |
| Daftar Gambar | xiii |
| Daftar Notasi..... | xv |
| Bab 1 Pendahuluan | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 2 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 3 |
| 1.6 Sistematika Penulisan | 3 |
| Bab 2 Tinjauan Pustaka | 4 |
| 2.1 Kajian Pustaka | 4 |
| 2.2 Dasar Teori | 5 |
| 2.2.1 Komposit | 5 |
| 2.2.2 Komposit <i>Sandwich</i> | 5 |
| 2.2.3 <i>3D Printing</i> | 6 |
| 2.2.4 <i>Vacuum Infusion</i> | 7 |
| 2.2.5 Pengujian Kekakuan (Uji bending) | 8 |
| 2.2.6 Modulus Kegagalan Uji Bending Komposit <i>Sandwich</i> | 12 |
| Bab 3 Metode Penelitian..... | 15 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Alur Penelitian..... | 15 |
| 3.2 | Peralatan dan Bahan | 16 |
| 3.3 | Dimensi Spesimen | 24 |
| 3.4 | Skema Lapisan Komposit <i>Sandwich</i> | 25 |
| 3.5 | Proses Pengerjaan..... | 25 |
| 3.5.1 | Pembuatan core (3D <i>Printing</i>)..... | 25 |
| 3.5.2 | Proses <i>Vacuum Infusion</i> | 26 |
| 3.5.3 | <i>Finishing</i> | 30 |
| Bab 4 | Hasil dan Pembahasan..... | 31 |
| 4.1 | Proses Pengujian Spesimen | 31 |
| 4.2 | Hasil pengujian Bending | 32 |
| 4.3 | Analisis dan perhitungan | 35 |
| 4.3.1 | Hasil uji Spesimen dengan 2 lapis <i>skin</i> | 35 |
| 4.3.2 | Hasil uji Spesimen dengan 3 lapis <i>skin</i> | 35 |
| 4.3.3 | Hasil uji Spesimen dengan 4 lapis <i>skin</i> | 36 |
| 4.3.4 | Hasil uji Spesimen 0 lapis <i>skin</i> / tanpa komposit | 36 |
| 4.4 | Perhitungan..... | 37 |
| 4.5 | Pembahasan | 38 |
| 4.5.1 | Kegagalan hasil pengujian..... | 38 |
| 4.5.2 | Beban Bending | 40 |
| 4.5.3 | Luas penampang..... | 41 |
| 4.5.4 | Tegangan Bending..... | 42 |
| 4.5.5 | Modulus Elastisitas..... | 44 |
| 4.5.5 | Kekakuan Bending | 45 |
| Bab 5 | Penutup..... | 46 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 46 |
| 5.2 | Saran atau Penelitian Selanjutnya | 46 |
| | Daftar Pustaka..... | 48 |
| | LAMPIRAN | 50 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 3. 1 Hasil perhitungan dimensi awal spesimen..... | 24 |
| Tabel 4. 1 Data hasil pengujian bending spesimen | 33 |
| Tabel 4. 2 Rata-rata hasil pengujian bending spesimen..... | 33 |
| Tabel 4. 3 Perbandingan dimensi spesimen sebelum dan sesudah pengujian | 34 |
| Tabel 4. 4 Hasil perhitungan luas penampang dan momen inersia spesimen..... | 37 |
| Tabel 4. 5 Hasil perhitungan modulus elastisitas dan kekakuan bending spesimen | 37 |
| Tabel 4. 6 Perbandingan Beban Bending antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit | 40 |
| Tabel 4. 7 Perbandingan Luas Penampang antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit | 41 |
| Tabel 4. 8 Perbandingan Tegangan Bending antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit | 42 |
| Tabel 4. 9 Perbandingan Modulus Elastisitas antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit | 44 |
| Tabel 4. 10 Perbandingan Kekakuan Bending antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit | 45 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2. 1 Struktur Komposit <i>sandwich</i> | 6 |
| Gambar 2. 2 Mesin 3D <i>Printing</i> | 7 |
| Gambar 2. 3 Skema Proses <i>Vacuum Infusion</i> | 8 |
| Gambar 2. 4 Universal Testing Machine..... | 9 |
| Gambar 2. 5 Pembebanan lentur <i>three point bending</i> | 9 |
| Gambar 2. 6 Rumus Perhitungan Luas Penampang 3DP <i>Core</i> | 10 |
| Gambar 2. 7 Rumus Perhitungan Momen Inersia 3DP <i>Core</i> | 10 |
| Gambar 2. 8 Rumus Perhitungan Luas Penampang Komposit <i>Sandwich</i> | 11 |
| Gambar 2. 9 Rumus Perhitungan Momen Inersia Komposit <i>Sandwich</i> | 11 |
| Gambar 2. 10 Jenis-jenis kegagalan pada <i>skin</i> komposit <i>sandwich</i> | 13 |
| Gambar 2. 11 Jenis-jenis kegagalan pada <i>core</i> komposit <i>sandwich</i> | 13 |
| Gambar 3. 1 <i>Vacuum Reservoir</i> | 16 |
| Gambar 3. 2 <i>Vacuum pump</i> | 17 |
| Gambar 3. 3 PLA..... | 17 |
| Gambar 3. 4 Cairan Resin..... | 18 |
| Gambar 3. 5 Sealent Tape..... | 18 |
| Gambar 3. 6 Cairan Katalis | 19 |
| Gambar 3. 7 Serat Kaca/ <i>fiberglass</i> | 19 |
| Gambar 3. 8 Resin Valve dan Vacuum valve..... | 20 |
| Gambar 3. 9 Resin Trap..... | 20 |
| Gambar 3. 10 Hasil Filter setelah digunakan | 21 |
| Gambar 3. 11 <i>Vacuum Bag</i> | 21 |
| Gambar 3. 12 Kain <i>Strimin</i> | 22 |
| Gambar 3. 13 <i>Peel Ply</i> | 22 |
| Gambar 3. 14 Selang <i>Spiral</i> | 23 |
| Gambar 3. 15 Selang <i>Pneumatik</i> | 23 |
| Gambar 3. 16 Dimensi Spesimen ASTM D790 | 24 |
| Gambar 3. 17 Skema komposisi lapisan komposit <i>sandwich</i> 2 lapis <i>skin</i> | 25 |
| Gambar 3. 18 Proses pembuatan <i>core</i> 3D <i>printing</i> | 25 |
| Gambar 3. 19 Pemasangan <i>vacuum bag</i> pada lapisan awal..... | 26 |

| | |
|--|----|
| Gambar 3. 20 Pemasangan kain <i>strimin</i> | 26 |
| Gambar 3. 21 Pemasangan <i>peel ply</i> | 27 |
| Gambar 3. 22 Pemasangan lapisan <i>fiberglass</i> | 27 |
| Gambar 3. 23 Pemasangan selang spiral dan spesimen..... | 28 |
| Gambar 3. 24 Pemasangan sealent tape..... | 28 |
| Gambar 3. 25 Mencampur resin dan katalis | 29 |
| Gambar 3. 26 Proses <i>vacuum infusion</i> | 29 |
| Gambar 3. 27 Proses <i>finishing</i> | 30 |
| Gambar 3. 28 Hasil spesimen setelah pemotongan | 30 |
| Gambar 4. 1 Proses pengujian bending spesimen | 31 |
| Gambar 4. 2 Spesimen komposit <i>sandwich</i> setelah proses pengujian..... | 32 |
| Gambar 4. 3 Spesimen komposit <i>sandwich</i> 2 lapis <i>skin</i> (tampak samping) | 35 |
| Gambar 4. 4 Spesimen komposit <i>sandwich</i> 3 lapis <i>skin</i> (tampak samping) | 35 |
| Gambar 4. 5 Spesimen komposit <i>sandwich</i> 4 lapis <i>skin</i> (tampak samping) | 36 |
| Gambar 4. 6 Spesimen tanpa lapisan komposit <i>sandwich</i> (tampak samping) | 36 |
| Gambar 4. 7 Jenis kegagalan pada 2 lapis <i>skin</i> | 38 |
| Gambar 4. 8 Jenis kegagalan pada 3 lapis <i>skin</i> | 39 |
| Gambar 4. 9 Jenis kegagalan pada 4 lapis <i>skin</i> | 39 |
| Gambar 4. 10 Grafik beban bending | 41 |
| Gambar 4. 11 Grafik luas penampang..... | 42 |
| Gambar 4. 12 Grafik tegangan bending..... | 43 |
| Gambar 4. 13 Grafik modulus elastisitas..... | 44 |
| Gambar 4. 14 Grafik kekakuan bending..... | 45 |

DAFTAR NOTASI

σ_b = Tegangan Bending maksimal (MPa)

E_b = Modulus elastisitas bending (MPa) P

= Beban yang diberikan (N)

L = Jarak antara titik tumpuan (mm)

b = Lebar spesimen (mm)

t = tebal lapisan *core/ shell*(mm)

h = Tebal spesimen (mm)

δ = Defleksi (mm)

I = Momen inersia (mm⁴)

A = Luas Penampang (mm²)

D = Kekakuan Bending (Nmm²)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era sekarang teknologi berkembang dengan sangat cepat, dan dampaknya sangat bisa kita rasakan pada saat ini. Dengan berkembangnya teknologi maka semakin banyak juga permintaan terhadap material yang akan digunakan, baik itu untuk kegiatan sehari-hari maupun untuk membuat suatu produk. Jika dilihat dari kondisi saat ini, material yang sering digunakan adalah material yang memenuhi beberapa kriteria yaitu kuat, ringan, ramah lingkungan dan murah. Semakin berkembangnya pengetahuan tentang material maka dapat mencari alternatif untuk memenuhi permintaan untuk material, yang salah satunya biasa didengar adalah komposit.

Komposit adalah material yang terbentuk dari kombinasi antara dua atau lebih material pembentuk dan memiliki sifat yang berbeda dari material pembentuknya. Penggunaan komposit pada beberapa hal terbukti lebih efektif daripada bahan logam, karena sifat komposit pada umumnya yaitu tahan korosi, dapat meredam getaran dan bunyi yang baik, komposit dapat memberikan penampilan dan kehalusan permukaan yang lebih baik. Dalam penggunaannya juga komposit memiliki keunggulan yaitu memiliki biaya perawatan yang lebih murah karena komposit lebih tahan dibanding material biasa.

Pada pembuatan komposit umumnya diawali dengan pembuatan cetakan terlebih dahulu, maka produk komposit yang dihasilkan hanya akan terpaku pada cetakan itu sendiri. Dalam penelitian ini mencoba untuk mengatasi masalah itu dengan mengabungkan komposit dengan *3D printing* sebagai *core*. Dengan penggunaan *3D printing* sebagai *core* maka pembuatan produk komposit akan menghasilkan spesimen lebih beragam tanpa harus terpaku pada cetakan sebelumnya.

Pada proses pembuatan komposit sendiri juga memiliki beberapa jenis pembuatan, yaitu ada *hand lay-up*, *spray-up*, *vacuum bag* dan *vacuum infusion*. Dalam penelitian ini proses pembuatan komposit adalah dengan menggunakan

metode *vacuum infusion*, karena pembuatan komposit dengan metode *vacuum infusion* lebih efisien dibanding dengan metode lainnya. Kelebihan metode *vacuum infusion* adalah lebih kecilnya kemungkinan udara untuk terperangkap dalam lapisan komposit.(Prayoga, 2018)

1.2 Rumusan Masalah

- Bagaimana melakukan proses *vacuum infusion* yang sesuai?
- Bagaimana melakukan perbandingan nilai kekakuan produk komposit *sandwich* dengan dua lapisan, tiga lapisan dan empat lapisan *skin*?
- Bagaimana perbandingan nilai kekakuan dari spesimen penggabungan material 3D *printing* +komposit *sandwich* dan 3D *printing* tanpa lapisan komposit

1.3 Batasan Masalah

- Pembuatan spesimen menggunakan 3D *printing* dengan material PLA.
- *Vacuum Infusion* dilakukan menggunakan mesin pada Lab Proses Produksi UII.
- Menggunakan spesimen yang sebelumnya sudah dibuat dengan komposisi diantaranya, 3DP + Fiberglass 2 lapis, 3DP +Fiberglass 3 lapis, dan 3DP +Fiberglass 4 lapis. Dengan menggunakan kerapatan infeel 20 %, dengan 9 spesimen yang diujikan.
- Pengujian yang dilakukan hanya pengujian bending.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membuat komposit *sandwich* yang digabungkan dengan 3D *printing* dengan metode *vacuum infusion* untuk mengetahui perbandingan perubahan dimensi dan nilai kekakuan spesimen yang dilapisi komposit *sandwich* dan tanpa lapisan komposit.

1.5 Manfaat Penelitian

- Mengetahui perbedaan nilai kekakuan pada masing-masing komposit dengan ketebalan yang sudah direncanakan.
- Mengetahui cara proses pembuatan produk dengan metode *vacuum infusion*

1.6 Sistematika Penulisan

BAB 1. Pendahuluan, terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2. Kajian Pustaka dan teori teori yang akan digunakan pada penelitian ini.

BAB 3. Metodologi penelitian, berisikan alur penelitian, alat dan bahan, tahapan proses pembuatan produk untuk diuji.

BAB 4. Hasil dan pembahasan, berisi analisis data, hasil pengujian bending, dan penampilan grafik dan tabel.

BAB 5. Penutup, berisi kesimpulan penelitian serta saran yang didapat dari pelaksanaan penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Kajian pustaka pertama yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini berjudul “3D *printing* of composite *sandwich* structures using continuous carbon fiber and fiber tension” oleh (Sugiyama et al., 2018). Dalam penelitian ini penulis mencoba membuat komposit dengan *core* 3D *printing* berbahan PLA dengan inti berbentuk honeycomb dengan menggunakan mesin 3D *printing* tipe FDM. Dalam komposit *sandwich* tersebut lapisan *core* dilapisi dengan serat kaca (*fiberglass*) dan diresapi oleh resin di dapat bahwa sifat mekanik kompositi sangat bergantung pada bentuk inti.

Kajian Pustaka kedua dari penelitian berjudul “A Comparison Process Between *Vacuum Infusion* and Hand Lay-Up Method Toward Kenaf/Polyster Composites” oleh (Yuhazri, 2010). Dimana dalam penelitian ini meneliti tentang perbandingan kekuatan dari komposit dengan metode *vacuum infusion* lebih tinggi dibanding dengan metode hand lay-up. Selain karena metode *vacuum infusion* lebih tinggi nilai kekuatan dan modulus, dinilai pembuatan dengan metode *vacuum infusion* lebih efektif dibanding metode hand lay-up karena resin yang berlebih akan dihisap ke filter *vacuum*.

Kajian Pustaka yang ketiga berasal dari penelitian berjudul “Evaluation and comparison of mechanical properties of natural fiber abaca-sisal composite” oleh (Venkatesan & Bhaskar, 2020). Pada penelitian ini, dilakukan pengujian bending dengan standar ASTM D790 dengan metode *three point bending*. Pada pengujian *three point bending* beban yang diberikan berada pada bagian tengah spesimen dengan menggunakan 2 tumpuan. Pembebanan diberikan sampai spesimen bengkok atau patah, untuk mengetahui beban maksimum yang diberikan kepada spesimen.

Kajian Pustaka yang keempat berasal dari penelitian berjudul “Pengaruh ketebalan *skin* terhadap kekuatan bending dan Tarik komposit *sandwich* dengan *honeycomb polypropylene* sebagai *core*” oleh (Prayoga, 2018). Penelitian ini

membahas tentang pengaruh ketebalan *skin* pada komposit *sandwich* dengan variasi ketebalan yaitu dua, tiga dan empat. Penelitian ini dilakukan pengujian bending dan pengujian Tarik untuk mengetahui nilai kekakuan dan kekuatan Tarik. Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan pada lapisan dua *skin* dan tiga *skin* mengalami kegagalan *core* akibat *core* tidak dapat menahan beban sedangkan pada lapisan empat *skin* tidak terjadi kegagalan *core* pada pengujian bending.

Kajian Pustaka kelima berasal dari penelitian berjudul “Analisis uji bending komposit *sandwich* yang digabungkan 3D *printing*” oleh (Yudha Izma,2021). Penelitian ini membahas tentang pengujian bending dengan standar ASTM D790 pada komposit *sandwich* dengan metode hand lay-up dengan *infill* 10% dan *infill* 20%. Didapat kesimpulan bahwa komposit *sandwich* dengan *infill* 20% lebih baik dibanding dengan komposit *sandwich* dengan *infill* 10%.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Komposit

Kata komposit sebenarnya memiliki banyak sekali definisi tergantung dari situasi dan perkembangan bahan itu sendiri. Secara umum dapat di definisikan Komposit merupakan satu atau lebih jenis bahan rekayasa yang digabungkan dimana sifat masing masing bahan berbeda satu sama lainnya baik sifat kimia ataupun fisiknya dan tetap terpisah masing masing hasil akhirnya.

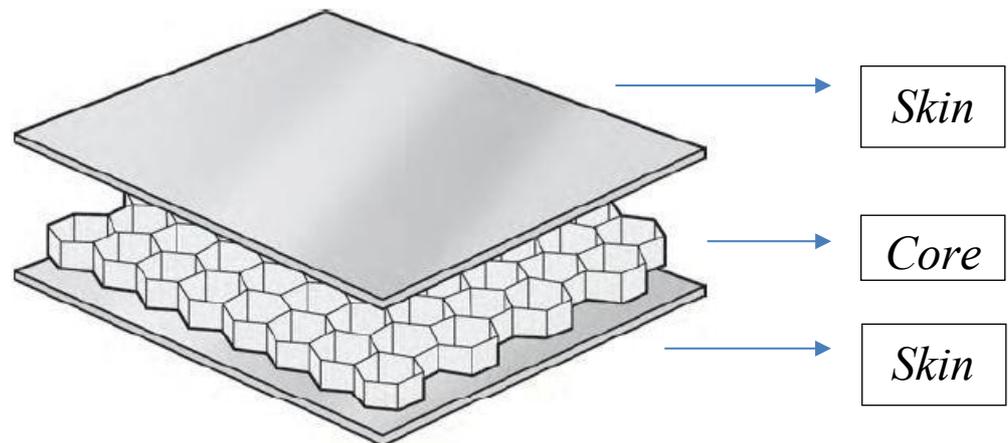
Komposit sendiri memiliki banyak keunggulan, diantaranya lebih ringan, lebih murah, kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi, tahan korosi dan memiliki biaya perakitan yang lebih murah disbanding dengan material konvensional yang sering kita temui.

2.2.2 Komposit *Sandwich*

Komposisi *sandwich* merupakan salah satu jenis komposit yang sangat potensial dikembangkan. Dalam komposit *sandwich* terdiri dari *flat* komposit (*skin*) dan *core*. Dalam *skin* komposit biasanya terdiri dari dua atau lebih pelapis sedangkan biasanya memiliki *core* yang lebih tebal. Pada lapisan *skin* biasanya dilapisi oleh dua atau lebih lapisan komposit sedangkan *core* terbuat dari logam maupun non logam dengan jenis *honeycomb*. (Daniel & Ishai, 2006)

Core merupakan inti dari struktur *sandwich* berfungsi untuk menopang dan memisahkan lembaran *fiber* sehingga kekakuan lentur yang diinginkan tercapai, bahan *core* pada umumnya memiliki kerapatan yang relatif rendah dibandingkan dengan lembaran *fiberglass*. Inti *core* yang digunakan adalah berbentuk *honeycomb* karena selain salah satu bentuk yang paling populer memiliki efisiensi terhadap berat yang lebih tinggi dan efisiensi structural. (Marsono et al., 2019)

Skin merupakan struktur *sandwich* yang berfungsi sebagai pelapis *core* pada saat melakukan komposit *sandwich*. Untuk melakukan metode ini *skin* harus direkatkan secara rapat ke *core* dengan menggunakan resin dan katalis untuk perekatannya.



Gambar 2. 1 Struktur Komposit *sandwich*

Struktur *sandwich* terdiri dari dua atau lebih lembaran fiber dan adapun cara untuk menghubungkan keduanya, seperti perekat atau *brazing*. Komposit *sandwich* diuji untuk memastikan lembaran *skin* terhubung antara *core* dan *skin*, adapun metode pengujiannya yaitu dengan memastikan permukaan *skin* rata tanpa adanya gelembung.

2.2.3 3D Printing

Manufaktur aditif atau pencetakan 3D *printing* merupakan proses aditif membangun satu lapisan pada suatu waktu, ada berbagai teknologi pencetakan 3D *printing* dengan punya manfaat dan keterbatasan masing-masing yang dapat

mencetak bagian-bagian dari bahan yang berbeda. 3D *printing* tidak bergantung pada harga perkakas mahal yang pada dasarnya tidak mempunyai biaya, dan 3D *printing* memiliki banyak kelebihan salah satunya verifikasi cepat dan pengembangan prototipe dan bagian volume produksi yang rendah, namun 3D *printing* juga memiliki kelemahan salah satunya ialah ketidakmampuan untuk menghasilkan bagian dengan sifat material yang setara dengan yang dibuat subtraktif atau teknik formatif.

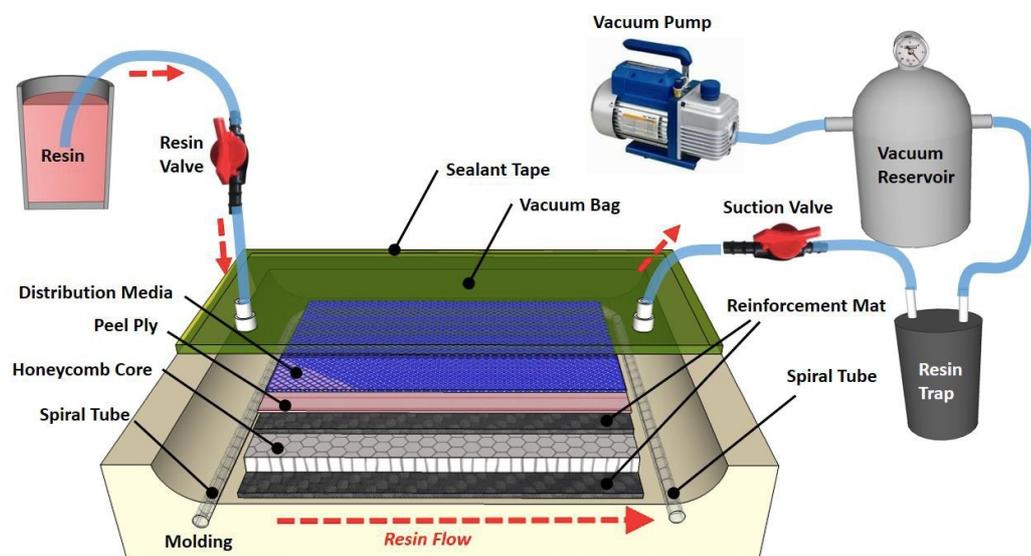


Gambar 2. 2 Mesin 3D *Printing*

2.2.4 Vacuum Infusion

Vacuum Infusion adalah salah satu metode pembuatan komposit modern yang dapat menggantikan metode *hand lay-up* dan *spray up* pada pembuatan komposit, dengan menggunakan metode *vacuum infusion* dapat meminimalisir kemungkinan udara yang terperangkap pada komposit itu sendiri. Metode *vacuum infusion* dapat digunakan untuk membuat produk secara berulang-ulang dengan kualitas yang bagus dibandingkan dengan metode *hand lay-up* dan *spray up*.(Yuhazri, 2010)

Metode *vacuum infusion* ini dilakukan dengan memasukkan perekat terlebih dahulu lalu memasukkan resin ke dalam cetakan dengan menggunakan bantuan *vakum pump*. Metode *vacuum infusion* ini dapat mengalirkan resin dari tempat penampungan resin mengalir melalui specimen komposit dan masuk ke dalam *resin trap* secara otomatis setelah alat digunakan. Resin dapat mengalir dari penampungan resin ke *resin trap* karena perbedaan tekanan pada kantung yang digunakan dan mengakibatkan resin mengalir membentuk spesimen, setelahnya resin yang berlebih akan terhisap menuju *resin trap*.(Azissyukhron & Hidayat, n.d.)



Gambar 2. 3 Skema Proses *Vacuum Infusion*

Penggunaan metode dengan *vacuum infusion* ini memiliki manfaat dan keunggulan karena dalam pembuatannya manusia tidak banyak campur tangan. Manusia hanya menyiapkan bahan-bahannya saja dan memantau kinerja alat tersebut.

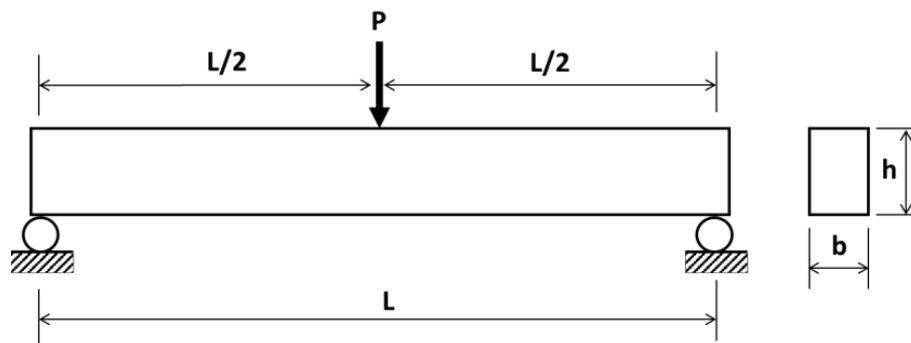
2.2.5 Pengujian Kekakuan (Uji bending)

Pengujian bending merupakan proses pembebanan suatu material pada suatu titik ditengah- tengah dari material yang ditahan diatas dua tumpuan kanan dan kiri. Dengan diberikan beban maka spesimen akan mengalami perubahan bentuk atau yang biasa disebut deformasi. Akibat dari pengujian bending pada spesimen adalah bagian atas mengalami gaya tekan, sedangkan bagian bawah akan mengalami

tegangan Tarik(Sari & Sinarep, 2011). Pada pengujian bending terdapat dua jenis pengujian, yaitu *three point bending* dan *fourpoint bending*.



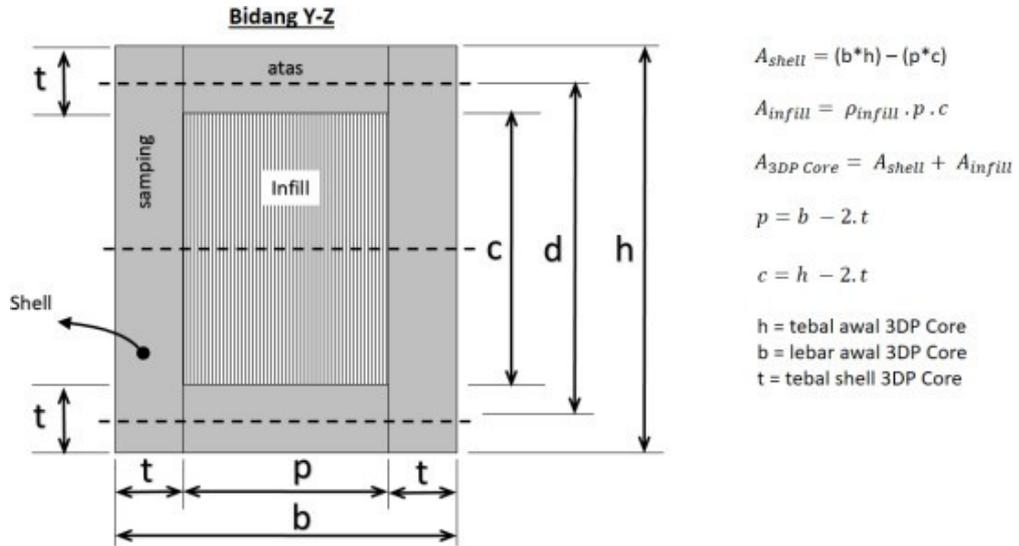
Gambar 2. 4 Universal Testing Machine



Gambar 2. 5 Pembebanan lentur *three point bending*

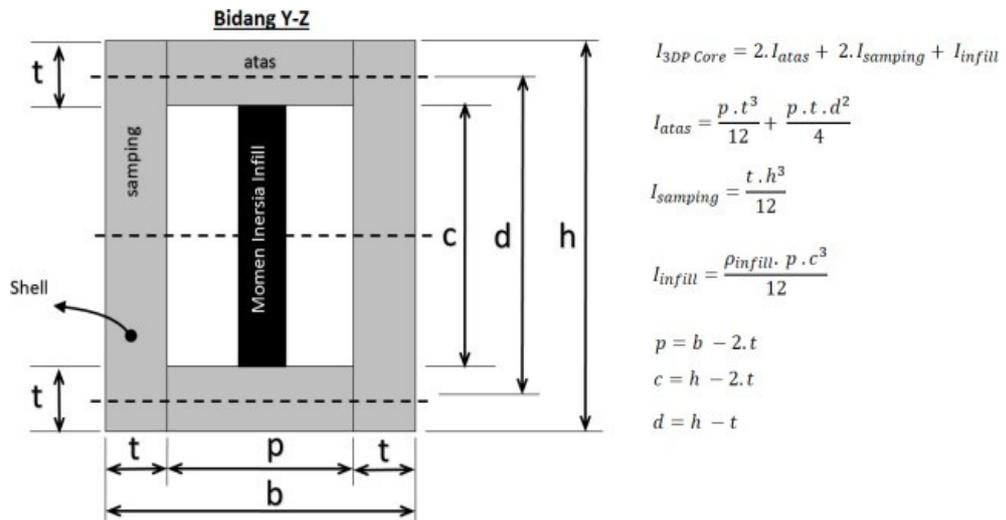
Perhitungan luas penampang dan momen inersia pada komposit *sandwich* berbeda dengan perhitungan batang pejal. Luas penampang dan momen inersia komposit *sandwich* dapat dilihat pada gambar dibawah.

- Luas penampang spesimen 3D *Printing*



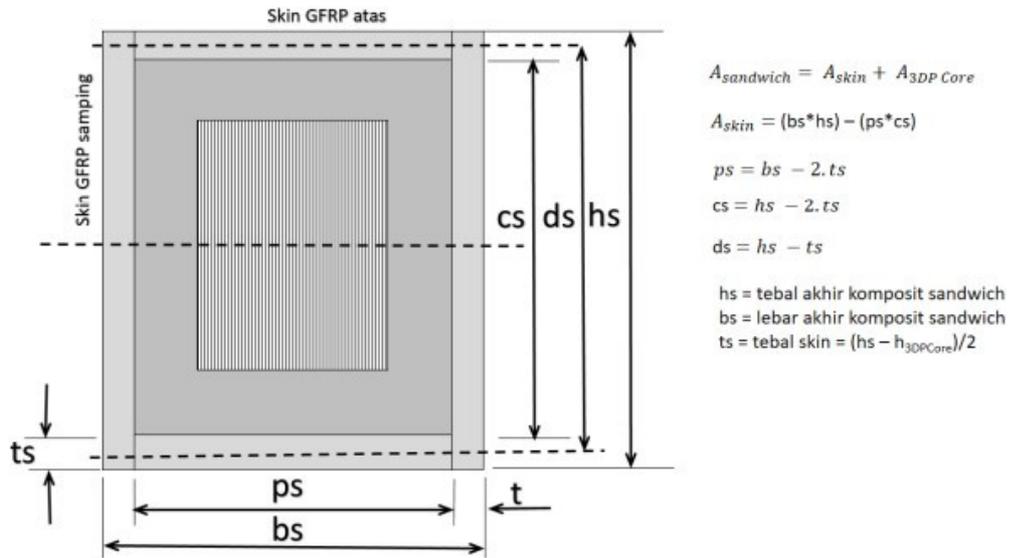
Gambar 2. 6 Rumus Perhitungan Luas Penampang 3DP *Core*

- Momen inersia 3D *Printing*



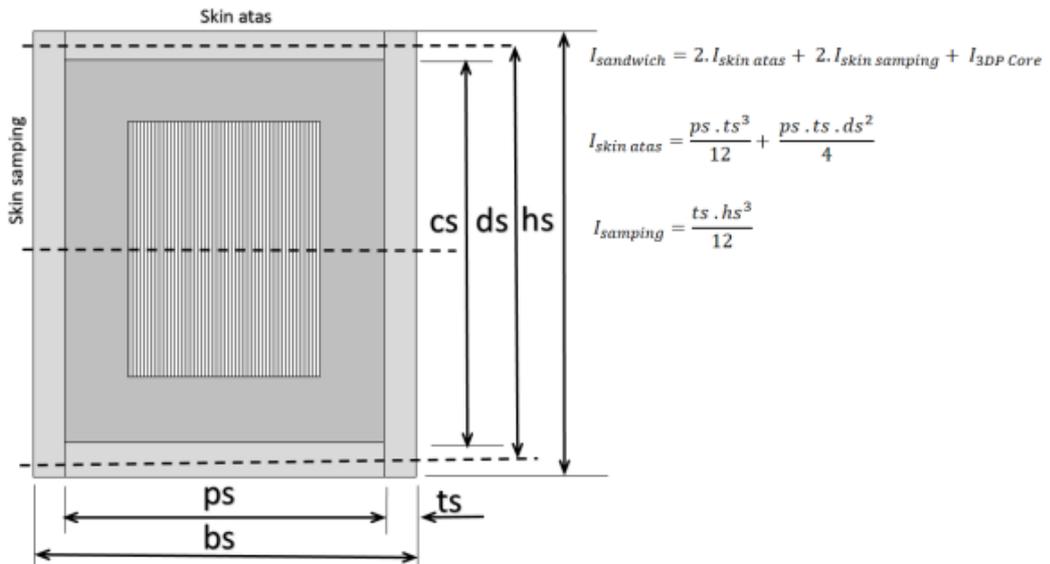
Gambar 2. 7 Rumus Perhitungan Momen Inersia 3DP *Core*

- Luas Penampang GFRP Spesimen



Gambar 2. 8 Rumus Perhitungan Luas Penampang Komposit *Sandwich*

- Momen Inersia GFRP Spesimen



Gambar 2. 9 Rumus Perhitungan Momen Inersia Komposit *Sandwich*

Rumus yang digunakan untuk menghitung kekuatan bending sebagai berikut:

- Besar Tegangan maskimal:

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{8 \cdot b \cdot d^2}$$

- Persamaan defleksi maksimal:

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_{sandwich}}$$

- Nilai Modulus Elastisitas bending:

$$E_b = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I_{sandwich}}$$

- Kekakuan Bending (Flexural Rigidity):

$$D = E \cdot I_{sandwich} = 48 \cdot \delta \cdot D$$

Keterangan:

σ = Tegangan Bending maksimal (MPa)

E = Modulus elastisitas bending (MPa)

P = Beban yang diberikan (N)

L = Jarak antara titik tumpuan (mm)

b = Lebar spesimen (mm)

d = Tebal spesimen (mm)

δ = Defleksi (mm)

I = Momen Inersia (mm^4)

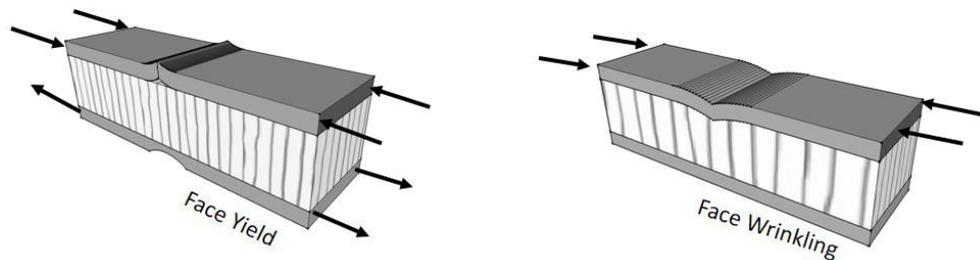
A = Luas Penampang (mm^2)

D = Kekakuan Bending (N/ mm^2)

2.2.6 Modulus Kegagalan Uji Bending Komposit Sandwich

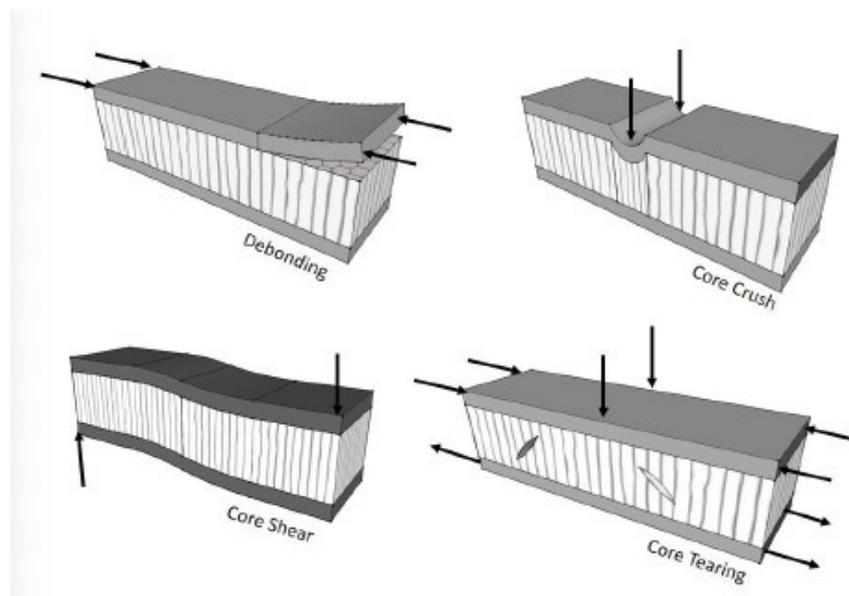
Dalam aplikasinya pada bidang rekayasa, komposit *sandwich* mengalami berbagai macam beban mekanik, seperti misalnya beban tekan, tarik, lentur, geser dan puntir. Terkadang, dalam aplikasinya tidak jarang juga beban yang dialami oleh material ini melebihi beban pada awal perancangan sehingga menyebabkan

terjadinya kegagalan pada material ini. Menurut (Petras, n.d.) berikut kegagalan yang terjadi pada komposit *sandwich*:



Gambar 2. 10 Jenis-jenis kegagalan pada *skin* komposit *sandwich*

Pada kegagalan *skin* komposit *sandwich* yang pertama yaitu *face yield* dimana bisa terjadi Ketika tegangan normal melebihi tegangan luluh material *skin*. Jika material *skin* bersifat getas, maka kegagalan *face yield* kemungkinan besar terjadi pada *skin* bagian atas karena lebih kritis terhadap tegangan tekan. Kemudian kegagalan *face wrinkling* yaitu fenomena *buckling* yang terjadi pada *skin* atas akibat tegangan tekan dan kurangnya *support* dari *core* karena dimensi struktur *core* yang terlalu besar (densitas rendah).



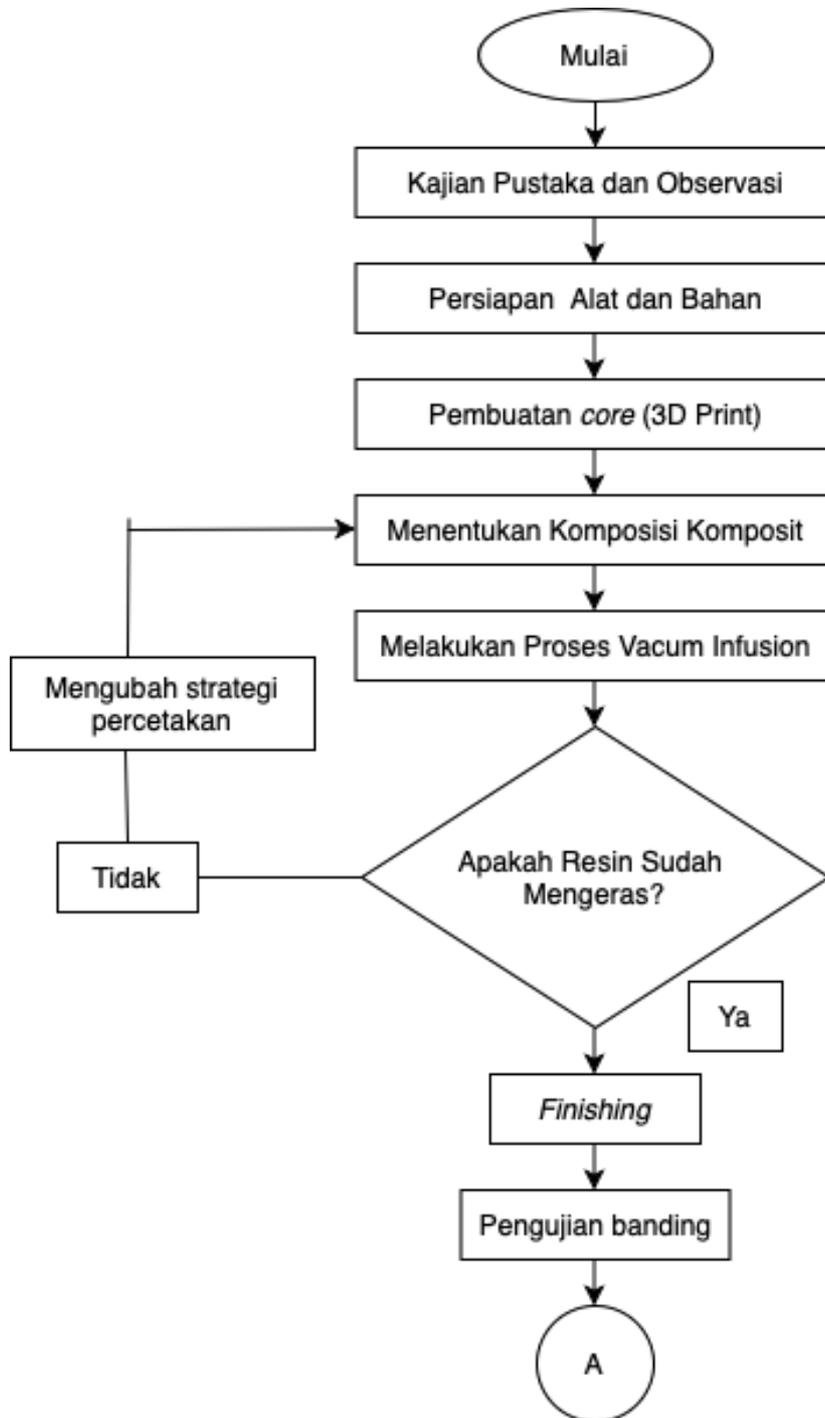
Gambar 2. 11 Jenis-jenis kegagalan pada *core* komposit *sandwich*

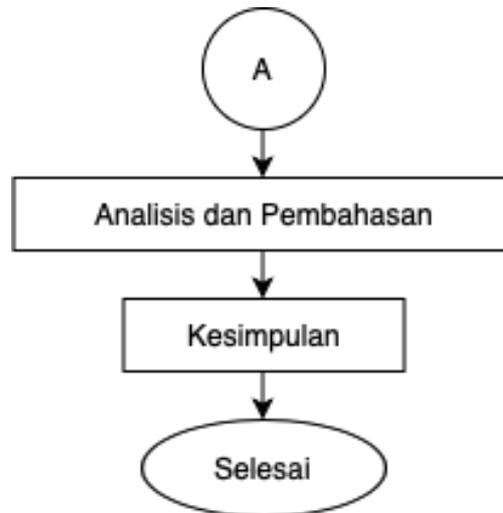
Pada kegagalan core terdapat 4 jenis kegagalan, dimana pada kegagalan debonding kegagalan yang terjadi adalah lapisan *skin* terlepas dari bagian core spesimen. Untuk core crush kegagalan yang terjadi adalah perubahan bentuk pada bagian tengah spesimen. Untuk kegagalan core shear bentuk kegagalan yang terjadi adalah

spesimen berubah bentuk akibat pembebanan yang diberikan. Sedangkan untuk kegagalan core tearing jenis kegagalan yang terjadi adalah pecahnya atau terlepasnya bagian core spesimen akibat gaya gesek pada bagian tengah spesimen.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian





3.2 Peralatan dan Bahan

- Vacuum Reservoir



Gambar 3. 1 *Vacuum Reservoir*

Vacuum reservoir adalah tabung kosong yang memiliki output dan input yang berfungsi untuk menampung tekanan udara agar pada saat memulai proses *vacuum infusion* daya hisap menjadi lebih tinggi.

- *Vacuum pump*



Gambar 3. 2 *Vacuum pump*

Vacuum pump berfungsi sebagai penghisap udara yang ada pada *vacuum bag* pada saat proses *vacuum infusion*. *Vacuum pump* yang digunakan pada saat penelitian ini bermerk Krisbow dengan kapasitas ½ HP.

- PLA



Gambar 3. 3 PLA

Polyactic Acid (PLA) merupakan bahan dasar pembuatan 3D *printing*. Jenis PLA yang digunakan dalam penelitian ini adalah PLA CCTRE. PLA berfungsi sebagai *core* untuk membuat produk komposit *sandwich*.

- Resin



Gambar 3. 4 Cairan Resin

Resin senyawa kimiawi berguna sebagai perekat antara inti 3D *printing* dan *fiberglass*, resin yang digunakan pada penelitian ini adalah resin dengan jenis 2668 wnc.

- Sealent tape



Gambar 3. 5 Sealent Tape

Sealent tape merupakan perekat yang digunakan untuk merekatkan bagian dalam vacuum bag bagian atas dan vacuum bag bagian bawah.

- Katalis



Gambar 3. 6 Cairan Katalis

Katalis merupakan suatu zat yang dapat mempercepat terjadinya reaksi pengerasan pada resin. Perbandingan antara campuran resin dengan katalis adalah 100: 1 ml.

- *Fiberglass*



Gambar 3. 7 Serat Kaca/ *fiberglass*

Serat kaca (*fiberglass*) pada penelitian ini berfungsi sebagai bahan pengikat dalam sebuah produk komposit, sehingga resin dan spesimen dapat saling berikatan. Dan jenis fiberglass yang digunakan adalah jenis acak.

- Resin Valve dan Vacuum Valve



Gambar 3. 8 Resin Valve dan Vacuum valve

Vacuum valve pada penelitian ini berfungsi sebagai katup untuk mengatur udara dari *vacuum pump* dan saluran input resin.

- Resin Trap/ Filter Resin



Gambar 3. 9 Resin Trap

Resin Trap/ filter merupakan pipa yang memiliki dua input yang berisi kawat berbentuk *spiral* dan balutan kawat, dan tissue untuk menampung sisa resin pada saat melakukan *vacuum infusion* dan juga mencegah agar resin tidak masuk kedalam Vacuum Reservoir yang dapat menyebabkan kerusakan pada *vacuum pump*.



Gambar 3. 10 Hasil Filter setelah digunakan

- *Vacuum Bag*



Gambar 3. 11 *Vacuum Bag*

Vacuum bag pada penelitian ini berfungsi sebagai menutup dan tempat terjadinya proses pengvacuuman agar tidak ada gelembung didalam komposit.

- Kain *Strimin*



Gambar 3. 12 Kain *Strimin*

Kain strimin merupakan media agar resin dapat berjalan tanpa adanya hambatan dan berguna agar komposit dengan vacuum bag mudah untuk dipisahkan.

- *Peel ply*



Gambar 3. 13 *Peel Ply*

Fungsi *peel ply* adalah sebagai pembatas antara kain strimin dengan serat kaca (*fiberglass*) agar pada saat proses pelepasan produk tidak terdapat garis-garis yang disebabkan oleh kain strimin.

- Selang *Spiral*



Gambar 3. 14 Selang *Spiral*

Selang *spiral* yang berongga ini berfungsi untuk menyalurkan aliran tekanan dari *vacuum pump* dan tempat mengalirnya resin yang berlebih ke *vacuum pump*.

- Selang *pneumatik*

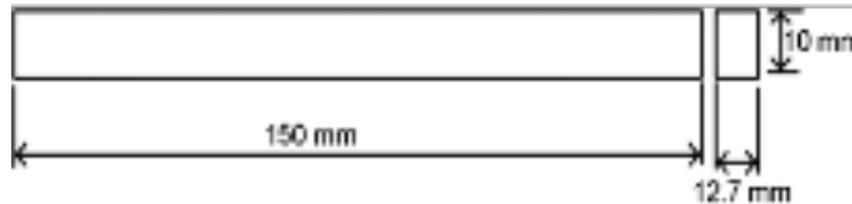


Gambar 3. 15 Selang *Pneumatik*

Selang pneumatik berfungsi sebagai penyalur aliran tekanan udara dari *vacuum pump* dan sebagai saluran infus pada resin saat proses *vacuum infusion* berlangsung

3.3 Dimensi Spesimen

Dimensi spesimen komposit *sandwich* dengan standar ASTM D790 infill 20 % berbentuk *honeycomb* dapat dilihat dibawah ini :



Gambar 3. 16 Dimensi Spesimen ASTM D790

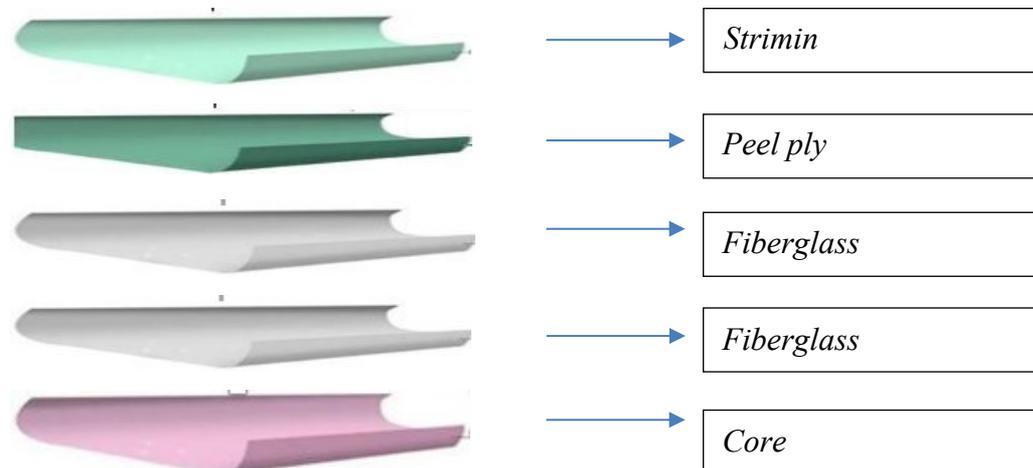
Berdasarkan standar uji bending ASTM D790 dibuat 3 variasi spesimen antara lain 2 *skin fiberglass*, 3 *skin fiberglass*, 4 *skin fiberglass* dan tanpa lapisan *skin*. Pada proses pembuatan spesimen tiap tiap variasi ketebalan *skin fiberglass* dibuat sebanyak tiga spesimen, maka jumlah spesimen yang akan dibuat adalah 12 spesimen.

Tabel 3. 1 Hasil perhitungan dimensi awal spesimen

| Kode | Tebal | Lebar | GFRP | Berat |
|------|-------|-------|-------|-------|
| | mm | mm | Lapis | gr |
| 2.1 | 10,12 | 12,5 | 2 | 20,1 |
| 2.2 | 10 | 12,42 | 2 | 20,8 |
| 2.3 | 10,22 | 12,42 | 2 | 20,4 |
| 3.1 | 10,7 | 12,32 | 3 | 18,7 |
| 3.2 | 10,82 | 12,7 | 3 | 19,6 |
| 3.3 | 11 | 12,62 | 3 | 18 |
| 4.1 | 11,6 | 12,94 | 4 | 19,2 |
| 4.2 | 11,6 | 13,9 | 4 | 18,9 |
| 4.3 | 11,5 | 13,32 | 4 | 23 |
| 0.1 | 9,98 | 12,17 | 0 | 8 |
| 0.2 | 9,96 | 11,96 | 0 | 8 |
| 0.3 | 9,93 | 12,08 | 0 | 8 |

3.4 Skema Lapisan Komposit *Sandwich*

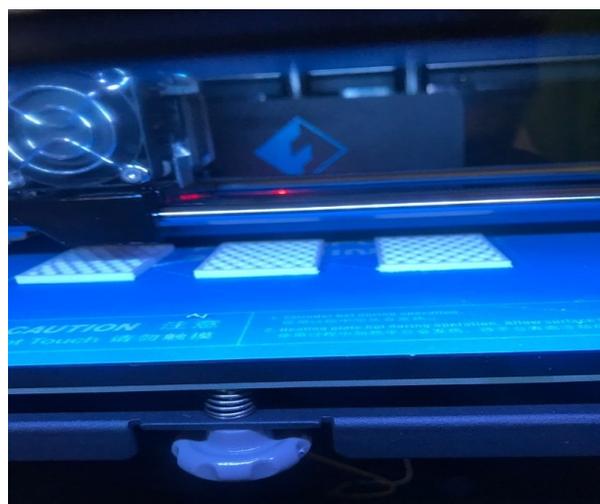
- 3D *printing* + 2 lapis *fiberglass*



Gambar 3. 17 Skema komposisi lapisan komposit *sandwich* 2 lapis *skin*
Pada gambar 3.17 dapat dilihat contoh komposisi lapisan komposit *sandwich* dengan menggunakan 2 lapis *skin*. Dimana jumlah lapisan *fiberglass* yang digunakan berjumlah 2, begitu juga untuk 3 dan 4 lapis *skin* yaitu hanya menambahkan lapisan *fiberglass* pada bagian bawah *peel ply*.

3.5 Proses Pengerjaan

3.5.1 Pembuatan core (3D *Printing*)



Gambar 3. 18 Proses pembuatan *core* 3D *printing*

Pada tahap ini dimulai dengan pembuatan *core* komposit yaitu spesimen ASTM D790 dengan menggunakan mesin 3D *printing*. Spesimen yang dibuat menggunakan 3D *printing* disini dibuat dengan bahan PLA, dengan infeel 20 %.

3.5.2 Proses *Vacuum Infusion*

- Pemasangan *vacuum bag*



Gambar 3. 19 Pemasangan *vacuum bag* pada lapisan awal

- Pemasangan Strimin



Gambar 3. 20 Pemasangan kain *strimin*

- Pemasangan *peel ply*



Gambar 3. 21 Pemasangan *peel ply*

- Pemasangan lapisan fiberglass



Gambar 3. 22 Pemasangan lapisan *fiberglass*

- Meletakkan spesimen dan selang *spiral*



Gambar 3. 23 Pemasangan selang spiral dan spesimen

Pemasangan selang spiral berbentuk U dalam *vacuum bag* bertujuan agar saat proses pemvakuman resin yang berlebih diserap secara sempurna. Fungsi berbentuk U agar arah aliran resin mengalir secara sempurna, dari bagian bawah mengalir kebagian atas.

- Sebelum proses pemasangan lapisan atas



Gambar 3. 24 Pemasangan sealent tape

Sebelum menutup bagian atas pada proses vacuum dipastikan tidak ada yang tertinggal dan posisi spesimen tidak bergeser agar pada proses vacuum spesimen tidak menempel satu sama lain.

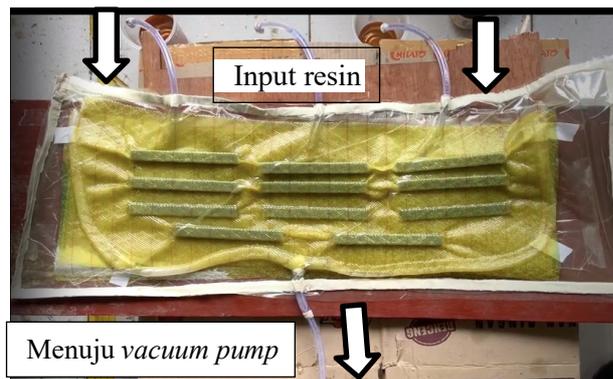
- Mencampur Resin dan katalis



Gambar 3. 25 Mencampur resin dan katalis

Sebelum melakukan pencampuran resin, katalis sebelumnya ditimbang sesuai dengan takaran yang sudah ada sebelumnya yaitu 1:100 ml. Alasan digunakanya perbandingan sebelumnya adalah karena jika menggunakan perbandingan 1:10 maka campuran resin dan katalis akan lebih cepat mengering dan mengakibatkan campuran resin akan panas yang menyebabkan *vacuum bag* akan rusak dan berlubang.

- memulai proses *vacuum infusion*



Gambar 3. 26 Proses *vacuum infusion*

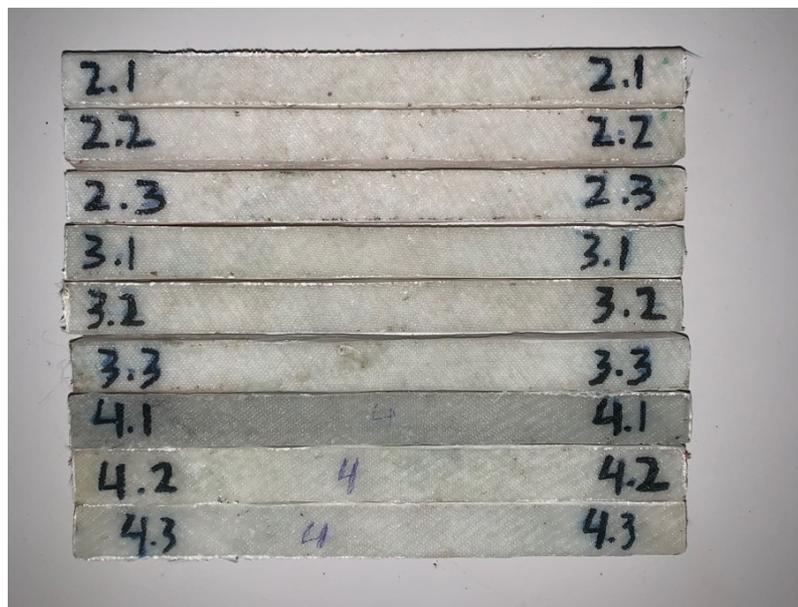
Setelah proses *vacuum infusion* maka selanjutnya spesimen disimpan selama semalam, agar resin dapat mengeras secara sempurna. Waktu pengvakuman spesimen berlangsung selama 6 menit 30 detik, dan *vacuum pump* akan dimatikan setelah 15 menit.

3.5.3 *Finishing*



Gambar 3. 27 Proses *finishing*

Setelah produk kering maka proses selanjutnya adalah *finishing*. Proses *finishing* disini adalah pemotongan *skin* berlebih pada spesimen dan pengamplasan. Dalam proses finishing diharus dipotong adalah bagian panjang dan lebar spesimen karena pada pengujian yang akan dihitung perubahan dari produk komposit *sandwich* adalah tinggi dan berat dari 3D *printing* hasil komposit dan sebelum komposit.



Gambar 3. 28 Hasil spesimen setelah pemotongan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Pengujian Spesimen

Pengujian spesimen yang dilakukan adalah pengujian bending, yaitu untuk mengetahui nilai kekakuan dari spesimen yang telah dibuat. Pengujian bending ini mengacu pada standar pengujian bending ASTM D790 yang dilakukan di Lab Bahan Teknik UGM.

Sebelum melakukan pengujian, pastikan spesimen yang ingin diuji sudah diberi tanda pada tiap tiap bagian spesimen, agar hasil pengujian dapat disusun dengan mudah. Berikut Langkah-langkah pengujian yang dilakukan:

- Spesimen yang sudah dirapikan dan sesuai dengan standar ASTM D790 dikumpulkan menurut variasi nya masing-masing.
- Letakan spesimen uji yang sudah dibuat pada alat uji bending sesuai dengan ketentuan yang sudah ada.



Gambar 4. 1 Proses pengujian bending spesimen

- Mesin uji bending akan memberikan beban maksimal pada spesimen secara perlahan hingga spesimen melengkung atau patah.

- Hasil pengujian akan otomatis tercatat pada kertas yang ada di panel mesin uji.

4.2 Hasil pengujian Bending

Spesimen komposit *sandwich* dengan *core 3D printing* sebelum pengujian bending dapat dilihat pada gambar 4.16 dibawah ini.



Gambar 4. 2 Spesimen komposit *sandwich* setelah proses pengujian

Pada gambar 4.2 dapat dilihat terdapat kode pada tiap-tiap spesimen yang dibuat. Tanda 2.1 memiliki pengertian variasi 2 lapis *skin* dengan nomor pertama, kemudian untuk 2.2 menandakan variasi 2 lapis *skin* dengan nomor ke-dua dan untuk 2.3 menandakan mamiliki 2 variasi ketebalan *skin* dengan nomor spesimen ke-tiga. Begitu juga selanjutnya, dan yang terakhir 4.3 memiliki pengertian 3 lapis *skin* dengan nomor spesimen ketiga. Sedangkan untuk 0.1 memiliki pengertian yaitu tanpa lapisan komposit nomor pertama.

Tabel 4. 1 Data hasil pengujian bending spesimen

| Kode | Tebal (mm) | Lebar (mm) | Pmax (KN) | Defleksi (mm) | Tegangan Bending (MPa) |
|------|---------------|---------------|--------------|------------------|---------------------------|
| 2.1 | 10,12 | 12,50 | 0,59 | 2,45 | 69,13 |
| 2.2 | 10 | 12,42 | 0,6 | 2,37 | 72,46 |
| 2.3 | 10,22 | 12,42 | 0,45 | 3,45 | 52,03 |
| 3.1 | 10,7 | 12,32 | 0,34 | 2,82 | 36,16 |
| 3.2 | 10,82 | 12,7 | 0,34 | 2,17 | 34,3 |
| 3.3 | 11 | 12,62 | 0,35 | 3,03 | 34,38 |
| 4.1 | 11,6 | 12,94 | 0,39 | 4,56 | 33,6 |
| 4.2 | 11,6 | 13,9 | 0,36 | 5,46 | 28,87 |
| 4.3 | 11,5 | 13,32 | 0,45 | 4,47 | 38,32 |
| 0.1 | 9,96 | 11,96 | 0,19 | 8,42 | 23,51 |
| 0.2 | 9,93 | 12,08 | 0,2 | 8,39 | 25,29 |
| 0.3 | 10 | 12,42 | 0,08 | 8,03 | 10,07 |

Tabel 4. 2 Rata-rata hasil pengujian bending spesimen

| Spesimen | Tebal (mm) | Lebar (mm) | Pmax (N) | Defleksi (mm) | Tegangan Bending (MPa) |
|---------------------|---------------|---------------|-------------|------------------|---------------------------|
| 2 lapis <i>skin</i> | 10,11 | 12,45 | 546,67 | 2,76 | 64,54 |
| 3 lapis <i>skin</i> | 10,84 | 12,55 | 343,33 | 2,67 | 34,95 |
| 4 lapis <i>skin</i> | 11,57 | 13,39 | 400 | 4,83 | 33,6 |
| 0 lapis <i>skin</i> | 9,96 | 12,15 | 156,67 | 8,28 | 19,62 |

Pada tabel 4.1 menunjukkan data yang didapatkan setelah melakukan pengujian bending. Dapat dilihat bahwa beban maksimal tertinggi berapa pada spesimen 2.2 yaitu 0,6 kN, untuk defleksi maksimal tertinggi adalah pada spesimen 0.1 yaitu 8,42 dan Tegangan bending tertinggi pada spesimen 2.2 yaitu 72,46 MPa.

Tabel 4. 3 Perbandingan dimensi spesimen sebelum dan sesudah pengujian

| Kode | Lebar (mm) | | Tebal (mm) | | Berat (gr) | |
|------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | Awal | Akhir | Awal | Akhir | Awal | Akhir |
| 2.1 | 12,7 | 12,42 | 10 | 10 | 8 | 20,1 |
| 2.2 | 12,7 | 12,42 | 10 | 10,22 | 8 | 20,9 |
| 2.3 | 12,7 | 12,32 | 10 | 10,7 | 8 | 20,5 |
| 3.1 | 12,7 | 12,7 | 10 | 10,82 | 8 | 18,8 |
| 3.2 | 12,7 | 12,62 | 10 | 11 | 8 | 19,6 |
| 3.3 | 12,7 | 12,94 | 10 | 11,6 | 8 | 18 |
| 4.1 | 12,7 | 13,9 | 10 | 11,6 | 8 | 19,2 |
| 4.2 | 12,7 | 13,32 | 10 | 11,5 | 8 | 19,2 |
| 4.3 | 12,7 | 12,17 | 10 | 9,98 | 8 | 23,1 |
| 0.1 | 12,7 | 11,96 | 10 | 9,96 | 8 | 8 |
| 0.2 | 12,7 | 12,08 | 10 | 9,93 | 8 | 8 |
| 0.3 | 12,7 | 12,42 | 10 | 10 | 8 | 8 |

Pada tabel 4.3 diatas dapat dilihat perubahan dmensi spesimen sebelum dan sesudah dilapisi oleh komposit *sandwich* dengan metoda *vacuum infusion*. Pada lebar spesimen tidak terlalu mengalami perubahan karena pada proses *finishing* spesimen bagian samping tidak menyisakan fiberglass. Untuk tebal spesimen terus meningkat seiring ditambahkan nya lapisan *skin*. Berat spesimen juga mengalami peningkatan yang signifikan, yaitu bertambah 2 kali lipat.

4.3 Analisis dan perhitungan

4.3.1 Hasil uji Spesimen dengan 2 lapis *skin*



Gambar 4. 3 Spesimen komposit *sandwich* 2 lapis *skin* (tampak samping)

Dari gambar 4.3 dapat dilihat modulus kegagalan dari spesimen dengan variasi ketebalan 2 lapis *skin* mengalami kegagalan akibat beban bending. Spesimen 2.1 mengalami kegagalan *core shear* yang diikuti dengan kegagalan debonding, pada spesimen 2.2 mengalami kegagalan *core shear* yang diikuti kegagalan debonding dan spesimen 2.3 juga mengalami kegagalan *core shear* yang diikuti kegagalan debonding.

4.3.2 Hasil uji Spesimen dengan 3 lapis *skin*



Gambar 4. 4 Spesimen komposit *sandwich* 3 lapis *skin* (tampak samping)

Dari gambar 4.4 dapat dilihat modulus kegagalan dari spesimen dengan variasi ketebalan 3 lapis *skin* mengalami kegagalan akibat beban bending. Spesimen 3.1 mengalami kegagalan *core shear* yang diikuti dengan kegagalan debonding, pada spesimen 3.2 mengalami kegagalan *core shear* yang diikuti dengan kegagalan

debonding dan spesimen 3.3 juga mengalami kegagalan core shear yang diikuti dengan kegagalan debonding.

4.3.3 Hasil uji Spesimen dengan 4 lapis *skin*



Gambar 4. 5 Spesimen komposit *sandwich* 4 lapis *skin* (tampak samping)

Dari gambar 4.5 dapat dilihat modulus kegagalan dari spesimen dengan variasi ketebalan 4 lapis *skin* mengalami kegagalan core tearing. Spesimen 4.1 mengalami kegagalan core tearing yang diikuti dengan kegagalan debonding, pada spesimen 4.2 mengalami kegagalan *core* tearing yang diikuti dengan kegagalan debonding sedangkan spesimen 4.3 mengalami kegagalan core tearing yang diikuti dengan kegagalan debonding.

4.3.4 Hasil uji Spesimen 0 lapis *skin*/ tanpa komposit



Gambar 4. 6 Spesimen tanpa lapisan komposit *sandwich* (tampak samping)

Pada spesimen tanpa lapisan komposit dapat dilihat pada gambar 4.6 diatas, semua spesimen mengalami kegagalan core shear.

4.4 Perhitungan

Pada tabel 4.2 merupakan data rata-rata yang didapatkan dari hasil pengujian bending dengan universal testing machine menggunakan *threepoint* bending. selanjutnya yaitu mencari nilai luas penampang, momen inersia, Modulus elastisitas dan kekakuan bending dari spesimen dengan menggunakan rumus pada bab 2 dengan persamaan 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 dan 2.6.

Tabel 4. 4 Hasil perhitungan luas penampang dan momen inersia spesimen

| Spesimen | Tebal (mm) | Lebar (mm) | A_{Sandwich} (m^2) | I_{sandwich} (m^4) |
|---------------------|---------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 2 lapis <i>skin</i> | 10,11 | 12,45 | 48,36 | 863,27 |
| 3 lapis <i>skin</i> | 10,84 | 12,55 | 57,49 | 796,86 |
| 4 lapis <i>skin</i> | 11,57 | 13,39 | 67,93 | 1423,45 |
| 0 lapis <i>skin</i> | 9,96 | 12,15 | 46,95 | 662,84 |

Dari tabel 4.4 dapat dilihat bahwa luas penampang komposit *sandwich* berada pada 4 lapis *skin*, dengan nilai 67,93 mm^2 . Untuk momen inersia komposit *sandwich* tertinggi juga ada di 4 lapisan *skin* yaitu 1.423,45 mm^4 .

Tabel 4. 5 Hasil perhitungan modulus elastisitas dan kekakuan bending spesimen

| Spesimen | Beban Bending | Tegangan Bending | Modulus Bending | Kekakuan Bending |
|---------------------|---------------|------------------|-----------------|------------------|
| | (N) | (MPa) | (MPa) | ($N m^2$) |
| 2 lapis <i>skin</i> | 546,67 | 64,54 | 4785,76 | 4.131.398,63 |
| 3 lapis <i>skin</i> | 343,33 | 34,95 | 3357,69 | 2.675.602,66 |
| 4 lapis <i>skin</i> | 400 | 33,6 | 1212,07 | 1.725.327,81 |
| 0 lapis <i>skin</i> | 156,67 | 19,62 | 594,70 | 394.189,48 |

Dari tabel 4.5 menunjukkan nilai beban bending, tegangan bending, modulus elastisitas bending dan kekakuan bending spesimen. Dapat dilihat bahwa spesimen

dengan nilai kekakuan tertinggi berada pada spesimen komposit dengan 2 lapis *skin* yaitu 4.131.398,63 Nmm^2 .

4.5 Pembahasan

4.5.1 Kegagalan hasil pengujian

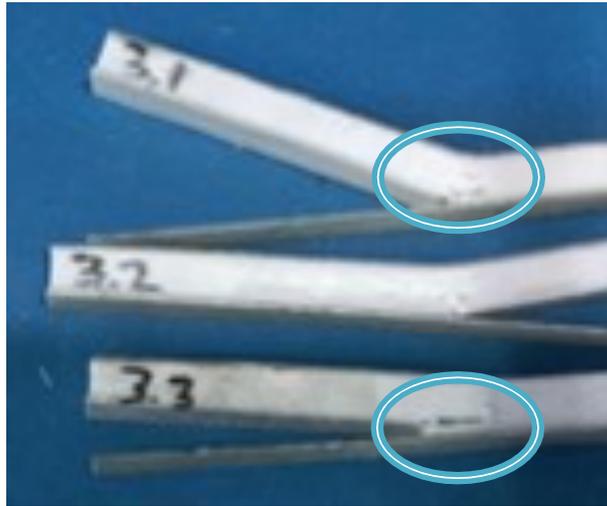
- 2 lapis *skin*



Gambar 4. 7 Jenis kegagalan pada 2 lapis *skin*

Pada variasi 2 lapis *skin* jenis kegagalan yang terjadi adalah kegagalan akibat core shear dan diikuti oleh debonding, tetapi pada spesimen 2.3 terjadi juga patahan pada bagian tengah spesimen yang diakibatkan oleh kegagalan akibat gaya gesek pada bagian tengah spesimen, yang mengakibatkan tinggi nya nilai defleksi pada spesimen 2.3.

- 3 lapis *skin*



Gambar 4. 8 Jenis kegagalan pada 3 lapis *skin*

Pada variasi 3 lapis *skin* jenis kegagalan yang terjadi adalah kegagalan core shear yang diikuti oleh kegagalan debonding, akan tetapi pada spesimen 3.1 dan 3.3 terjadi patahan pada bagian bawah spesimen yang mengakibatkan naiknya nilai defleksi pada spesimen.

- 4 lapis *skin*



Gambar 4. 9 Jenis kegagalan pada 4 lapis *skin*

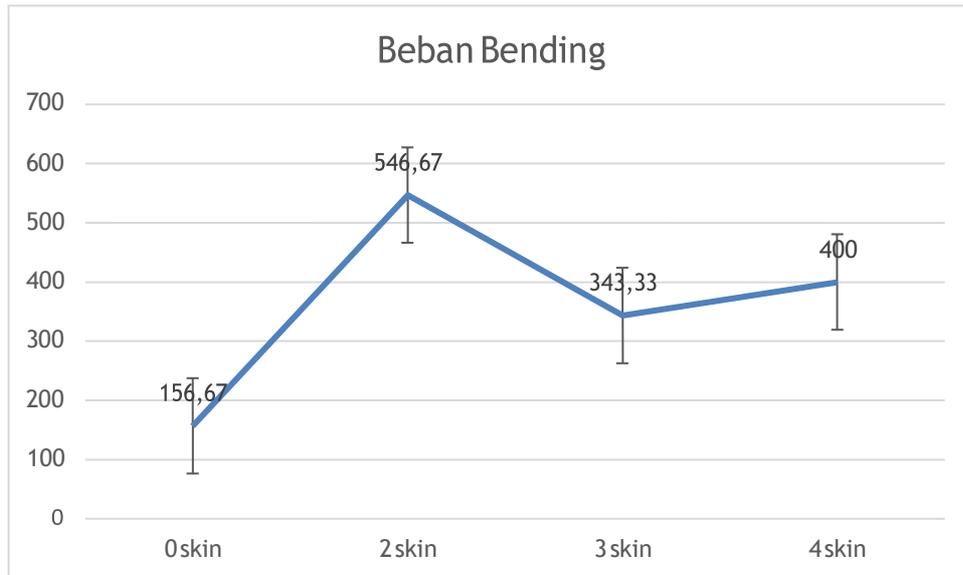
Pada variasi 4 lapis *skin* jenis kegagalan yang terjadi adalah core tear. Jenis kegagalan yang terjadi adalah pecahnya bagian core akibat beban bending, yang mengakibatkan tingginya defleksi yang terjadi pada spesimen. Pada spesimen 4.1 *skin* bagian atas mengalami debonding, dimana bagian atas *skin* terlepas semua akibat *skin* yang lebih kaku tidak dapat mengikuti perubahan core.

4.5.2 Beban Bending

Tabel 4. 6 Perbandingan Beban Bending antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit

| Kode | Beban Bending (N) | | Selisih (N) | Keterangan |
|---------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|------------------------------|
| | Dengan <i>skin</i> | Tanpa <i>skin</i> / 0 <i>skin</i> | | |
| 2 <i>skin</i> | 546,67 | 156,67 | 390 | 2 <i>skin</i> unggul 3,5x |
| 3 <i>skin</i> | 343,33 | | 186,66 | 3 <i>skin</i> unggul 2x |
| 4 <i>skin</i> | 400 | | 243,33 | 4 <i>skin</i> unggul 2,5x |

Dari tabel 4.6 menunjukkan bahwa spesimen yang ditambahkan komposit *sandwich* memiliki nilai yang lebih unggul dibanding dengan spesimen tanpa lapisan komposit.



Gambar 4. 10 Grafik beban bending

Pada gambar 4.7 menunjukkan beban bending yang diberikan kepada spesimen, dengan nilai tertinggi pada spesimen dengan 2 lapis *skin* yaitu 546,67 N. Sedangkan untuk spesimen tanpa lapisan komposit memiliki nilai 156,67 N.

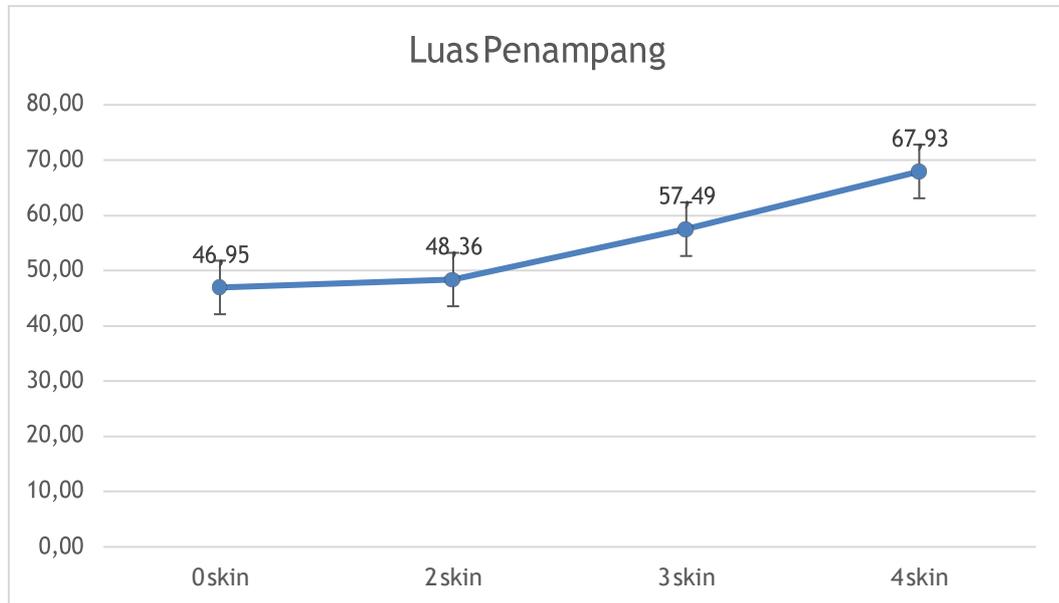
4.5.3 Luas penampang

Tabel 4. 7 Perbandingan Luas Penampang antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit

| Kode | $A_{\text{Sandwich}} (m^2)$ | | Selisih (m^2) | Keterangan |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--|
| | Dengan <i>skin</i> | Tanpa <i>skin</i> / 0 <i>skin</i> | | |
| 2 <i>skin</i> | 48,36 | 46,95 | 1,41 | 2 <i>skin</i> Bertambah 1,41 m^2 |
| 3 <i>skin</i> | 57,49 | | 10,54 | 3 <i>skin</i> Bertambah 10,54 m^2 |

| | | | |
|--------|-------|-------|--|
| | | | m^2 |
| 4 skin | 67,93 | 20,98 | 4 skin Bertambah 20,98 m m^2 |

Dari tabel 4.7 menunjukkan bahwa spesimen yang ditambahkan komposit *sandwich* memiliki luas penampang yang lebih besar karena adanya lapisan *skin*.



Gambar 4. 11 Grafik luas penampang

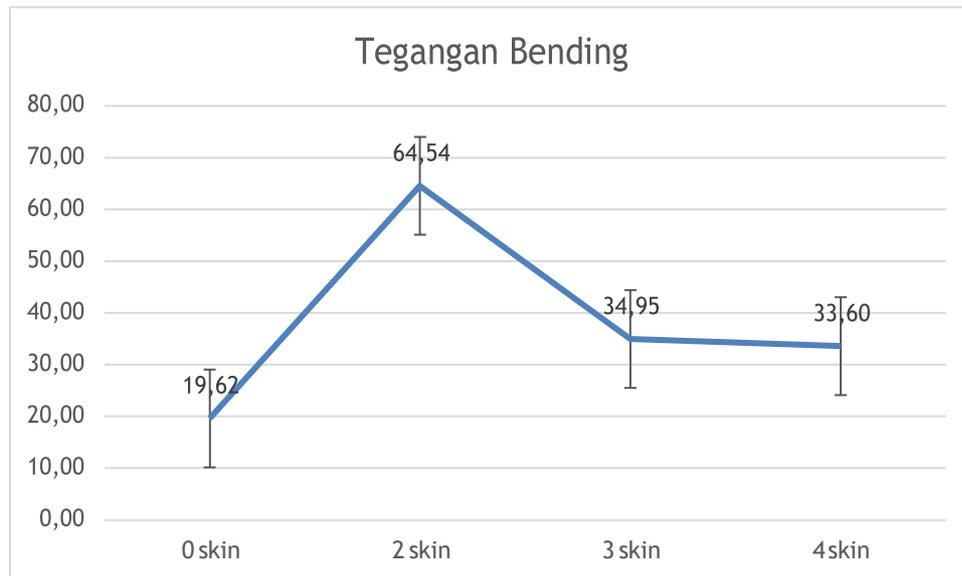
Pada gambar 4.8 menunjukkan bahwa penambahan 2 lapis *skin* hanya menambah 1 mm, sedangkan untuk 3 lapis dan 4 lapis *skin* masing masing bertambah 10 mm pada spesimen komposit *sandwich*.

4.5.4 Tegangan Bending

Tabel 4. 8 Perbandingan Tegangan Bending antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit

| Kode | Tegangan Bending (MPa) | | Selisih (MPa) | Keterangan |
|---------------|------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|
| | Dengan <i>skin</i> | Tanpa <i>skin</i> / 0 <i>skin</i> | | |
| 2 <i>skin</i> | 64,54 | 19,62 | 44,92 | 2 <i>skin</i> unggul 3x |
| 3 <i>skin</i> | 34,95 | | 15,33 | 3 <i>skin</i> unggul 1,7x |
| 4 <i>skin</i> | 33,6 | | 13,98 | 4 <i>skin</i> unggul 1,7x |

Pada tabel 4.8 dapat dilihat bahwa tegangan bending spesimen yang ditambahkan lapisan komposit *sandwich* memiliki nilai yang lebih tinggi dari pada spesimen tanpa lapisan komposit.



Gambar 4. 12 Grafik tegangan bending

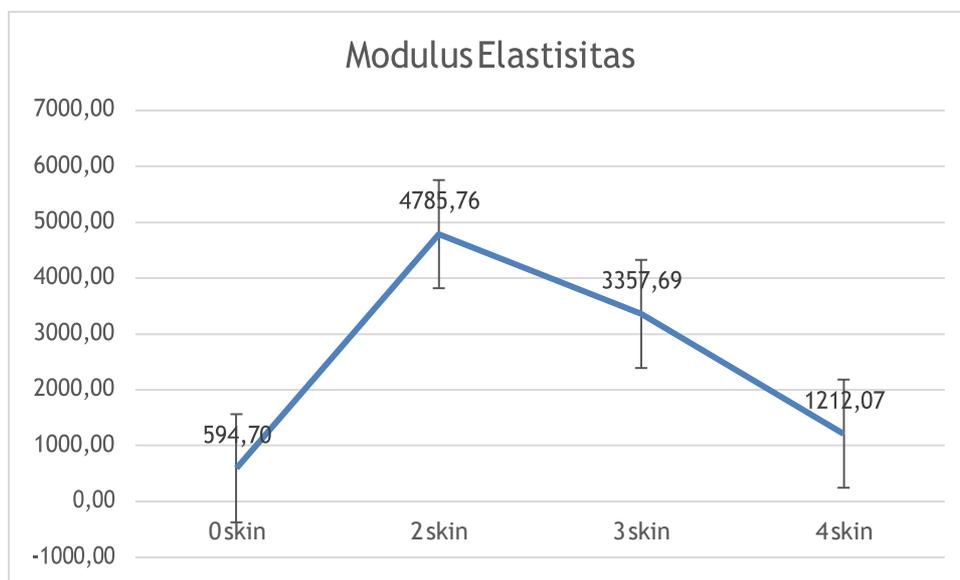
Pada gambar 4.9 dapat dilihat grafik perbandingan tegangan bending spesimen, dimana spesimen dengan ketebalan 2 lapis *skin* memiliki nilai tertinggi yaitu 64,54 MPa dan terus menurun seiring ditambahkan lapisan *skin*. Untuk spesimen tanpa lapisan komposit hanya bernilai 19,62 MPa.

4.5.5 Modulus Elastisitas

Tabel 4. 9 Perbandingan Modulus Elastisitas antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit

| Kode | Modulus Elastisitas (MPa) | | Selisih (MPa) | Keterangan |
|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------|------------------------------|
| | Dengan <i>skin</i> | Tanpa <i>skin/ 0 skin</i> | | |
| 2 <i>skin</i> | 4.785,76 | 594,7 | 4191,06 | 2 <i>skin</i> unggul 7x |
| 3 <i>skin</i> | 3.357,69 | | 2762,99 | 3 <i>skin</i> unggul 4,5x |
| 4 <i>skin</i> | 1212,07 | | 617,37 | 4 <i>skin</i> unggul 1,2x |

Pada tabel 4.9 dapat dilihat bahwa Modulus Elastisitas spesimen yang ditambahkan lapisan komposit *sandwich* memiliki nilai yang lebih tinggi dari pada spesimen tanpa lapisan komposit.



Gambar 4. 13 Grafik modulus elastisitas

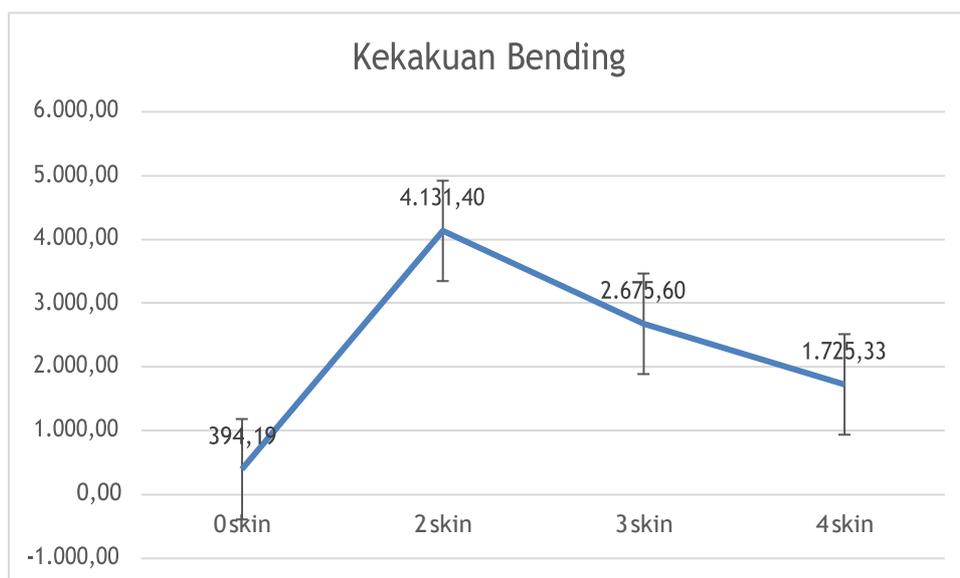
Pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa modulus elastisitas tertinggi berada pada spesimen dengan 2 lapis *skin* yaitu 4.785,76 MPa, sedangkan spesimen tanpa lapisan komposit memiliki nilai 594,7 MPa.

4.5.5 Kekakuan Bending

Tabel 4. 10 Perbandingan Kekakuan Bending antara spesimen dengan lapisan komposit dengan spesimen tanpa lapisan komposit

| Kode | Kekakuan Bending (KNm^2) | | Selisih (KNm^2) | Keterangan |
|---------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| | Dengan <i>skin</i> | Tanpa <i>skin</i> / 0 <i>skin</i> | | |
| 2 <i>skin</i> | 4.131,39 | 394,18 | 3.737,21 | 2 <i>skin</i> unggul 10x |
| 3 <i>skin</i> | 2.675,6 | | 2.281,41 | 3 <i>skin</i> unggul 6x |
| 4 <i>skin</i> | 1.725,32 | | 1.331,13 | 4 <i>skin</i> unggul 4x |

Pada tabel 4.10 menunjukkan bahwa spesimen yang ditambahkan lapisan komposit *sandwich* lebih unggul dari pada spesimen tanpa dilapisi komposit.



Gambar 4. 14 Grafik kekakuan bending

Pada gambar 4.11 dapat dilihat bahwa Kekakuan Bending terbaik berada pada spesimen 2 lapis *skin* yaitu 4.131,39 KNm^2 , sedangkan spesimen tanpa lapisan komposit memiliki nilai 394,18 KNm^2 .

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Hasil penggabungan spesimen 3D *printing* dan komposit *sandwich* dengan metode *vacuum infusion* mengalami perubahan dimensi yaitu pada berat yang bertambah sekitar 12 gram, untuk lebar mengalami perubahan sekitar 0,5 mm dan tebal bertambah 0,1-2 mm jika ditambahkan komposit *sandwich*.
2. Hasil analisis dan perhitungan beban maksimal, luas penampang, tegangan bending, modulus elastisitas dan kekakuan bending pada spesimen yang ditambahkan lapisan komposit *sandwich* memiliki nilai yang lebih unggul dibanding spesimen tanpa lapisan komposit.
3. Kegagalan debonding lebih sering terjadi pada spesimen karena *skin* tidak terlalu melekat pada *core* yang mengakibatkan beban yang diberikan langsung kepada *core*.
4. Penambahan komposit *sandwich* memberikan peningkatan pada Kekakuan Bending, dimana spesimen dengan nilai Kekakuan tertinggi berada pada variasi 2 lapis *skin* komposit yaitu 4.131,39 $KNmm^2$. Sedangkan spesimen tanpa lapisan komposit memiliki nilai kekakuan yaitu 394,18 $KNmm^2$.
5. Penambahan ketebalan *skin* pada komposit *sandwich* tidak memberikan dampak pada kekakuan melainkan semakin tebal penambahan lapisan *skin* maka akan semakin rendah nilai kekakuan karena jenis kegagalan yang terjadi adalah kegagalan *core*.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

1. Perlu dilakukan penelitian tentang interface antara *core* dan *skin* komposit agar ketika diberikan beban uji bending *skin* tidak terlepas dari *core* atau kegagalan debonding.
2. Sebaiknya saat pencampuran antara resin dan katalis harus sesuai dengan standar agar resin tidak cepat mengeras dan panas, tidak boleh juga kurang

karena jika kekurangan katalis maka resin tidak akan mengeras secara sempurna.

3. Sebelum memulai proses vacuum maka sebaiknya dicoba dahulu untuk mengetahui apakah masih ada kebocoran atau tidak.

DAFTAR PUSTAKA

- Azissyukhron, M., & Hidayat, S. (n.d.). *Perbandingan Kekuatan Material Hasil Metode Hand Lay-up dan Metode Vacuum Bag Pada Material Sandwich Composite*. 5.
- Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). *Engineering mechanics of composite materials* (2nd ed). Oxford University Press.
- Marsono, M., Ali, A., & Luwis, N. (2019). Karakteristik Mekanik Panel Honeycomb Sandwich Berbahan Komposit Fibreglass dengan Dimensi Cell-Pitch 40mm dan Cell-Height 30mm. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 3(2). <https://doi.org/10.26760/jrh.v3i2.3144>
- Petras, A. (n.d.). *Design of Sandwich Structures*. 114.
- Prayoga, A. (2018). *PENGARUH KETEBALAN SKIN TERHADAP KEKUATAN BENDING DAN TARIK KOMPOSIT SANDWICH DENGAN hONEYCOMB POLYPROPYLENE SEBAGAI CORE*. 18(1), 6.
- Sari, N. H., & Sinarep, S. (2011). ANALISA KEKUATAN BENDING KOMPOSIT EPOXY DENGAN PENGUATAN SERAT NILON. *Dinamika Teknik Mesin*, 1(1). <https://doi.org/10.29303/d.v1i1.130>
- Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Ueda, M., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2018). 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.029>

- Venkatesan, K., & Bhaskar, G. B. (2020). Evaluation and Comparison of Mechanical Properties of Natural Fiber Abaca-sisal Composite. *Fibers and Polymers*, 21(7), 1523–1534. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-9532-5>
- Yuhazri, M. (2010). *A Comparison Process Between Vacuum Infusion and Hand Lay-Up Method Toward Kenaf/Polyster Composites*. 10(03), 4.

LAMPIRAN



LABORATORIUM BAHAN TEKNIK DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN BENDING

| No. | Spesimen | Tebal (mm) | Lebar (mm) | Pmax (KN) | Defleksi (mm) | Tegangan Bending (MPa) |
|-----|----------|------------|------------|-----------|---------------|------------------------|
| 1 | Kode 2_1 | 10,12 | 12,50 | 0,59 | 2,45 | 69,13 |
| 2 | Kode 2_2 | 10,00 | 12,42 | 0,60 | 2,37 | 72,46 |
| 3 | Kode 2_3 | 10,22 | 12,42 | 0,45 | 3,45 | 52,03 |
| 4 | Kode 3_1 | 10,70 | 12,32 | 0,34 | 2,82 | 36,16 |
| 5 | Kode 3_2 | 10,82 | 12,70 | 0,34 | 2,17 | 34,30 |
| 6 | Kode 3_3 | 11,00 | 12,62 | 0,35 | 3,03 | 34,38 |
| 7 | Kode 4_1 | 11,60 | 12,94 | 0,39 | 4,56 | 33,60 |
| 8 | Kode 4_2 | 11,60 | 13,90 | 0,36 | 5,46 | 28,87 |
| 9 | Kode 4_3 | 11,50 | 13,32 | 0,45 | 4,47 | 38,32 |

Lembar asli, tidak untuk digandakan

Keterangan:

1. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine
2. Standar spesimen menggunakan ASTM D 790
3. Pengujian dilakukan tanggal 20 Desember 2021

Yogyakarta, 20 Desember 2021

Staf Laboratorium Bahan Teknik

Pengujian & Analisa
Materi



Lab. Bahan Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM

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

NIP. 19770312002121002

(Sumber : Lab Bahan Teknik UGM)



LABORATORIUM BAHAN TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL PENGUJIAN BENDING

| No. | Spesimen | Tebal (mm) | Lebar (mm) | Pmax (KN) | Defleksi (mm) | Tegangan Bending (MPa) |
|-----|----------|------------|------------|-----------|---------------|------------------------|
| 1 | Kode 0_1 | 9,98 | 12,17 | 0,19 | 8,42 | 23,51 |
| 2 | Kode 0_2 | 9,96 | 11,96 | 0,20 | 8,39 | 25,29 |
| 3 | Kode 0_3 | 9,93 | 12,08 | 0,08 | 8,03 | 10,07 |
| 4 | Kode 4_3 | 12,70 | 11,90 | 0,15 | 6,41 | 11,72 |

Keterangan:

1. Pengujian menggunakan Universal Testing Machine
2. Standar spesimen menggunakan ASTM D 790
3. Pengujian dilakukan tanggal 29 September 2021

Yogyakarta, 29 September 2021
Staf Laboratorium Bahan Teknik



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

Lembar asli, tidak untuk digandakan

(Sumber : Lab Bahan Teknik UGM)