ANALISIS *FINITE ELEMENT* TERHADAP PENGARUH VARIASI JUMLAH LAPISAN *SKIN* PADA KEKAKUAN BENDING KOMPOSIT SERAT KARBON DAN PLA DENGAN STRUKTUR *HONEYCOMB RIBS*

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin

Disusun Oleh :

Nama : Fachrozy Aprizal Pradana Putra
No. Mahasiswa : 19525154
NIRM : 1907310221

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2024

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya bertanda tangan dibawah ini, Fachrozy Aprizal Pradana Putra selaku penulis Tugas Akhir yang berjudul "ANALISIS FINITE ELEMENT TERHADAP PENGARUH VARIASI JUMLAH LAPISAN SKIN PADA KEKAKUAN BENDING KOMPOSIT SERAT KARBON DAN PLA DENGAN STRUKTUR HONEYCOMB RIBS" menyatakan bahwa karya tulis ilmiah yang saya buat merupaka karya sendiri dan bukan dari plagiasi karya tulis orang lain. Seluruh kutipan atau gambar yang ada pada karya tulis ini telah saya sertakan sitasi dan sumber pustakanya. Apabila dikemudian hari saya dianggap melakukan pelanggaran hak cipta aatau yang saya tulis pada karya ilmiah ini tidak benar, maka saya siap menerima sanksi dan hukuman dengan ketentuan yang berlaku.

Yogyakarta, 13 Agustus 2024

Fachrozy Aprizal P.P

(19525154)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

ANALISIS *FINITE ELEMENT* TERHADAP PENGARUH VARIASI JUMLAH LAPISAN *SKIN* PADA KEKAKUAN BENDING KOMPOSIT SERAT KARBON DAN PLA DENGAN STRUKTUR *HONEYCOMB RIBS*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Fachrozy Aprizal Pradana Putra

No. Mahasiswa : 19525154

NIRM : 1907310221

Yogyakarta, 14 Juli 2024

Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

ANALISIS *FINITE ELEMENT* TERHADAP PENGARUH VARIASI JUMLAH LAPISAN *SKIN* PADA KEKAKUAN BENDING KOMPOSIT SERAT KARBON DAN PLA DENGAN STRUKTUR *HONEYCOMB RIBS*

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Fachrozy Aprizal Pradana Putra
No. Mahasiswa : 19525154
NIRM : 1907310221

Tim Penguji

Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP Ketua	Tanggal : 07/08/2024
Dr. Eng. Ir. Risdiyono, S.T., M.Eng., IPM Anggota I	Tanggal : 05/08 2024
Finny Pratama Putera, S.T., M.Eng. Anggota II	Tanggal : 01 Agustus 2024

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA ★YOGYAKARTA★ FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

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

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 Mohamad Tarmizi dan ibu Nurkholifah S.Pd 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 saya,Tomy Antoni Lapian S dan Zifana Novia Dwi Prakasanty 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 lancer. 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

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

“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)

“Tak ada yang lebih kuat dari kelembutan, tak ada yang lebih lembut dari kekuatan yang tenang”
(Jenderal Soedirman)

“Kegagalan hanya terjadi jika kita menyerah”
(B.J. Habibie)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kita panjatkan kepada tuhan semesta alam Allah SWT yang hanya kepada-Nya penulis memohon pertolongan. Alhamdulillah atas segala pertolongan, rahmat, dan kasih saying-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir, yang berjudul "Analisis *Finite Element* terhadap Pengaruh Variasi Jumlah Lapisan *Skin* pada Kekakuan *Bending* Komposit Serat Karbon dan PLA dengan 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 Mohamad Tarmizi dan Ibu Nurkholifah S.Pd selaku orang tua, dan kakak Tomy Antoni Lapian S, adik Zifana Novia Dwi Prakasanty
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 Ahmad Nizham Royhan, 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 Tuga Akhir ini masih jauh dari kata sempurna karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga laporan ini dapat bermanfaat buat penulis dan semua orang yang membacanya. Akhir kata penulis ucapkan terimakasih. Semoga Allah SWT selalu merahmati dan meridhoi setiap langkah kita dalam menuntut ilmu, Aamiin Ya Robbal'Alamiin.
Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 14 Juli 2024

Fachrozy Aprizal Pradana Putra

ABSTRACT

The rapid and complex growth of the manufacturing industry demands continuous innovation in various aspects, including the materials that are key components in product manufacturing. Research in the field of materials focuses on developing materials with superior mechanical properties such as strength, stiffness, and lightness. For instance, in the production of unmanned aerial drones, the drone's body needs to have high strength and stiffness while also being lightweight. One promising approach in the search for new materials with the desired properties is combining two or more materials to form composite materials. The method for creating specimens with PLA filament 3D print and carbon fiber involves a vacuum bagging process to unite these two materials. Subsequently, bending tests are conducted using two methods: direct testing and finite element analysis to obtain data from the specimens. Adding skin to one flat surface or the core results in an increase in bending stiffness proportional to the number of carbon fiber skin layers added. However, a decrease is observed with the addition of three carbon fiber skin layers in terms of bending stress and specific bending stiffness values. A comparison between the results of direct testing and finite element analysis reveals a small discrepancy in bending stress, bending stiffness, and specific bending stiffness values. These discrepancies arise due to differences in material properties between the software specimens and the actual specimens, as well as testing errors.

Keywords: Bending Test, Finite Element, Composite, Carbon Fiber

ABSTRAK

Pertumbuhan industri manufaktur yang pesat dan kompleks menuntut inovasi terus-menerus dalam berbagai aspek, termasuk material yang menjadi komponen utama dalam pembuatan produk. Penelitian dalam bidang material berfokus pada pengembangan material yang unggul dalam sifat mekanis seperti kekuatan, kekakuan, dan ringan. Pembuatan *drone* pesawat pengintai tanpa awak contohnya, drone yang dibuat dituntut untuk memiliki kekuatan serta kekakuan yang tinggi pada *body drone*, namun juga dituntut untuk memiliki bobot yang ringan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam pencarian material baru dengan sifat yang diinginkan adalah penggabungan dua atau lebih material untuk membentuk material komposit. Metode pembuatan spesimen dengan material *filament* PLA 3D *print* dan serat karbon adalah dengan proses *vacuum bagging* untuk menyatukan kedua material tersebut. Selanjutnya, dilakukan pengujian *bending* dengan dua metode, yaitu pengujian secara langsung dan dengan metode analisis *finite elemen*t untuk memperoleh data dari spesimen. Penambahan *skin* pada satu permukaan yang rata atau pada bagian *core* menghasilkan peningkatan nilai kekakuan bending yang sebanding dengan jumlah *layer skin carbon fibre* yang ditambahkan. Namun penurunan terjadi pada pemberian tiga *layer skin carbon fibre,* untuk nilai tegangan bending dan kekakuan bending spesifik. Berdasarkan perbandingan hasil dari pengujian secara langsung dengan uji analisis *finite element* ditemukan bahwa terdapat selisih yang kecil pada nilai tegangan bending , kekakuan bending , dan kekakuan bending spesifik. Selisih tersebut muncul karena adanya perbedaan sifat material yang ada pada spesimen di *software* dengan spesimen asli dan karena kesalahan penguji pada saat pengujian.
Kata Kunci: Uji bending , *Finite Element* , komposit , Serat Karbon

DAFTAR ISI

Halaman Judul i
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji iv
Halaman Persembahan v
Halaman Motto vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih vii
AbstRact ix
Abstrak x
Daftar Isi xi
Daftar Tabel xiii
Daftar Gambar xiv
Daftar Notasi xvii
Bab 1 Pendahuluan 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan 3
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan 3
1.6 Sistematika Penulisan 4
Bab 2 Tinjauan Pustaka 5
2.1 Kajian Pustaka 5
2.2 Dasar Teori 6
2.2.1 Komposit 6
2.2.2 Komposit *Sandwich* 7
2.2.3 *Carbon Fiber* 8
2.2.4 3D *Print* 8
2.2.5 *Vacuum Bagging* 9
2.2.6 Pengujian *Bending* 9
2.2.7 Modus Kegagalan Pengujian *Bending* 11
2.2.8 Finite Element 12

Bab 3 MetodE Penelitian 14
3.1 Alur Penelitian 14
3.2 Peralatan dan Bahan 15
3.3 Dimensi Spesimen 25
3.4 Susunan Lapisan Komposit 26
3.5 Proses Pengerjaan Spesimen 27
3.5.1 Proses Pembuatann Spesimen dengan 3D Print 27
3.5.2 Proses *Vacuum Bagging* 28
Bab 4 Hasil dan Pembahasan 33
4.1 Pengujian Bending 33
4.2 Hasil Pengujian Bending 34
4.3 Analisis dan Perhitungan 35
4.3.1 Analisis Kegagalan Spesimen Tanpa *Skin* 35
4.3.2 Analisis Kegagalan Spesimen 1 *Layer Skin* 36
4.3.3 Analisis Kegagalan Spesimen 2 *Layer Skin* 39
4.3.4 Analisis Kegagalan Spesimen 3 *Layer Skin* 40
4.3.5 Perhitungan 43
4.4 Pembahasan 44
4.4.1 Perbandingan Variasi *Layer Skin* 44
4.4.2 Grafik Uji antara Gaya Tekan vs Defleksi 48
4.4.3 Analisis *Finite Element* 49
4.4.4 Perbandingan Hasil Pengujian Langsung dan Finite Element 55
Bab 5 Penutup 62
5.1 Kesimpulan 62
5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya 63
Daftar Pustaka 64

DAFTAR TABEL

Tabel 4- 1 Hasil Pengujian Bending 34
Tabel 4- 2 Hasil Perhitungan Spesimen 43
Tabel 4- 3 Data Tegangan *Bending* 44
Tabel 4- 4 Data Hasil Analisis *Finite Element* 52
Tabel 4- 5 Data Hasil Perhitungan *Analisis Finite Element* 53
Tabel 4- 6 Data Presentase Selisisih nilai Tegangan Bending 54
Tabel 4- 7 Data Presentase Selisisih nilai Kekakuan Bending 54
Tabel 4- 8 Data Presentase Selisisih nilai Kekakuan Bending Spesifik 55
Tabel 4- 9 Data perbandingan Tegangan Bending 56
Tabel 4- 10 Data perbandingan Kekakuan Bending 58
Tabel 4- 11 Data perbandingan Kekakuan Bending Spesifik 60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2- 1 Struktur Komposit Sandwich 7
Gambar 2- 2 Skema *Vacuum Bagging* 9
Gambar 2- 3 Pengujian Bending 10
Gambar 2- 4 Modus Kegagalan *Skin* 11
Gambar 2- 5 Modus Kegagalan *Core* 12
Gambar 3- 1 Alur Penelitian 14
Gambar 3- 2 3D Print Creality3D Ender 6 15
Gambar 3- 3 Filament PLA+ 15
Gambar 3- 4 *Vacuum Pump* 16
Gambar 3- 5 Tabung Reservoir 16
Gambar 3- 6 Timbangan 17
Gambar 3- 7 *Vacuum Bag* 17
Gambar 3- 8 *Peel ply* 18
Gambar 3- 9 *Breathe Bleeder Fabric* 18
Gambar 3- 10 Selang 19
Gambar 3- 11 *Sealent Tape* 19
Gambar 3- 12 Serat Karbon 20
Gambar 3- 13 20
Gambar 3- 14 Resin Epoxy 21
Gambar 3- 15 *Hardener* 21
Gambar 3- 16 Jangka Sorong 22
Gambar 3- 17 Mistar 22
Gambar 3- 18 Kuas 23
Gambar 3- 19 *Cutter* 23
Gambar 3- 20 Gunting 24
Gambar 3- 21 Gelas Plastik dan Pengaduk 24
Gambar 3- 22 Lakban Kertas 25
Gambar 3- 23 Laptop 25
Gambar 3- 24 Dimensi spesimen 26
Gambar 3- 25 Susunan Lapisan Komposit 26

Gambar 3- 26 Pembuatan Spesimen 3D *Print* 27
Gambar 3- 27 Skema Susunan *Vacuum Bagging* 28
Gambar 3- 28 Pencampuran Lem ALF dan Katalis 29
Gambar 3- 29 Pemasangan *Sealent Tape* 29
Gambar 3- 30 Pencampuran Resin 30
Gambar 3- 31 Penempelan *Peel Ply* dan *Breathe Bledeer Fabric* 30
Gambar 3- 32 Rangkaian *Vacuum Bagging* 31
Gambar 3- 33 Proses Vakum Udara 31
Gambar 3- 34 Hasil Proses *Vacuum Bagging* 32
Gambar 4- 1 *Universal Testing Machine* 33
Gambar 4- 2 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_1 35
Gambar 4- 3 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_2 36
Gambar 4- 4 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_3 36
Gambar 4- 5 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_1 37
Gambar 4- 6 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_2 38
Gambar 4- 7 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_3 38
Gambar 4- 8 Modus Kegagalan Spesimen 2Layer_1 39
Gambar 4- 9 Modus Kegagalan Spesimen 2Layer_2 40
Gambar 4- 10 Modus Kegagalan Spesimen 2Layer_3 40
Gambar 4- 11 Modus Kegagalan Spesimen 3Layer_1 41
Gambar 4- 12 Modus Kegagalan Spesimen 3Layer_2 42
Gambar 4- 13 Modus Kegagalan Spesimen 3Layer_3 42
Gambar 4- 14 Grafik Tegangan *Bending* 45
Gambar 4- 15 Grafik Kekakuan *Bending* 46
Gambar 4- 16 Grafik Kekakuan *Bending* Spesifik 47
Gambar 4- 17 Grafik Uji Gaya Tekan vs Defleksi 48
Gambar 4- 18 Spesifikasi Material PLA 50
Gambar 4- 19 Spesifikasi Material Serat Karbon 50
Gambar 4- 20 Analisis Stress 51
Gambar 4- 21 Analisis Displacement 51
Gambar 4- 22 Grafik perbandingan tegangan bending 57
Gambar 4- 23 Grafik perbandingan kekakuan bending 59

Gambar 4- 24 Grafik perbandingan kekakuan bending spesifik 61

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 industri manufaktur yang pesat dan kompleks menuntut inovasi terus-menerus dalam berbagai aspek, termasuk material yang menjadi komponen utama dalam pembuatan produk. Penelitian dalam bidang material berfokus pada pengembangan material yang unggul dalam sifat mekanis seperti kekuatan, kekakuan, dan ringan. Pembuatan *drone* pesawat pengintai tanpa awak contohnya, drone yang dibuat dituntut untuk memiliki kekuatan serta kekakuan yang tinggi pada *body drone*, namun juga dituntut untuk memiliki bobot yang ringan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam pencarian material baru dengan sifat yang diinginkan adalah penggabungan dua atau lebih material untuk membentuk material komposit. Material komposit dapat menawarkan kombinasi sifat yang lebih baik dibandingkan material tunggal, menjadikannya solusi ideal untuk aplikasi-aplikasi yang menuntut performa tinggi dan efisiensi.

Komposit adalah material yang tersusun dari dua atau lebih material yang memiliki sifat mekanik antar material berbeda yang diproduksi dengan proses pencampuran. Material komposit memiliki beberapa keunggulan dibanding dengan material yang biasa digunakan seperti kekuatan yang lebih tinggi, tahan korosi, dan berat yang lebih ringan (Prayoga, 2018).

Core pada spesimen dibuat dengan *jenis honeycomb*, dengan meggunakan alat *3D Print* 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 *layer* hasil *print* menggunakan *infill* 100% dengan penambahan serat karbon untuk mengetahui pengaruhnya setelah dilakukan pengujian bending. Serat karbon (*Carbon Fiber*) merupakan salah satu material penguat yang akan digunakan untuk membuat komposit campuran dengan PLA. Material ini memiliki kelebihan dimana rasio antara kekuatan dan beratnya yang baik.

Selanjutnnya peneliti juga ingin menambahkan hasil pengujian bending dengan menggunakan analisis Finite Element kemudian membandingkannya dengan hasil pengujian secara langsung. *Finite element method* digunakan untuk mensimulasikan dan menganalisis perilaku mekanik dari komposit serat karbon dan PLA honeycomb ribs. Dengan menggunakan SolidWorks, simulasi ini bertujuan untuk memperoleh nilai tegangan bending , kekakuan bending , dan kekakuan bending spesifik dari spesimen yang mendekati hasil pengujian secara langsung . Peneliti juga mencari spesifikasi material dalam SolidWorks yang mendekati hasil pengujian aktual, sehingga simulasi yang dilakukan dapat memperoleh nilai tegangan bending , kekakuan bending , dan kekakuan bending spesifik dari spesimen yang mendekati hasil pengujian secara langsung. *Finite element method* merupakan metode numerik untuk penyelesaian fisika matematika . Ruang lingkup permasalahannya adalah aliran fluida, analisis struktur dan masih banyak lagi. *Finite element method* memiliki kemampuan untuk memecahkan masalah statis dan dinamis (Sutisna *et al*, 2019)

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi hasil eksperimen melalui simulasi *Finite element*, mengeksplorasi parameter-parameter yang mungkin sulit diukur secara langsung melalui eksperimen, dan memberikan kontribusi yang signifikan dalam pemilihan dan optimasi material komposit untuk aplikasi industri yang memerlukan material yang kuat, kaku, dan ringan dengan biaya produksi yang efisien.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh penambahan *layer skin carbon fibre* terhadap kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik.
2. Bagaimana nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik tertinggi spesimen ?
3. Bagaimana perbandingan hasil dari pengujian langsung dengan pengujian menggunakan *Finite Element* Solidwork?
4. Bagaimana spesifikasi material yang digunakan saat proses analisis *finite element*?

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 carbon fiber 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 *carbon fiber* dengan variasi 1 *layer*, 2 *layer*, dan 3 *layer*
6. Jenis dan tipe carbon fiber diabaikan
7. Proses analisis Finite Element menggunakan aplikasi berbasis CAD (Solidworks)

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh penambahan *layer skin carbon fibre* terhadap kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik.
2. Mengetahui nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik tertinggi spesimen.
3. Menganalisis perbedaan nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik yang didapat dari pengujian langsung dan dari *Finite Element* solidwork
4. Mengetahui spesifikasi material yang digunakan saat proses analisis *finite element*

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui sifat mekanik spesimen.
2. Mengetahui cara pelapisan *carbon fiber* menggunakan metode *vacuum bagging* dengan baik dan benar.
3. Mengetahui pengaruh pemberian *skin* pada *core 3D print* dengan *infill* 100%.

4. Mengetahui perbedaan hasil pengujian bending spesimen PLA dengan struktur Honeycomb Ribs menggunakan analisis *finite element* dengan pengujian langsung.

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 carbon fiber* dan spesimen dengan pemberian 1 lapis *skin carbon fiber* 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 *carbon fiber* terhadap kekakuan bending dan juga membandingkan spesimen menggunakan *infill* 100% dengan spesimen menggunakan *infill* 20% (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 (Oliviandes, 2021).

Kajian pustaka berikutnya adalah penelitian dengan judul "Perancangan dan Analisis Kekuatan Rangka Cetakan Komposit Kayu-Plastik Mengguakan Finite Element Analysis" Pada penelitian tersebut penulis ingin merancang dan menganalisis cetakan hot press sebagai alat bantu pembuatan material WPC. *Finite Element Analysis* digunakan untuk menganalisis tiap variasi komponen untuk menghasilkan kombinasi komposisi yang sesuai. Empat komponen yang dianalisis yaitu batang penahan, batang penekan, batang pengarah dan cetakan. Variasi simulasi menggunakan dimensi komponen sesuai standar material yang tersedia dipasaran. Simulasi yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan nilai tegangan, *displacement, strain* dan *safety factor* (Waluyo *et al*, 2020)

Kajian pustaka berikutnya adalah penelitian dengan judul "Analisis Numerik *Part Spar* Pada *Sub System Wing To Fuselage Joinner Assembly* Pesawat berkategori *Utility* Menggunakan Metode Hingga" Pada penelitian tersebut peneliti melakukan analisis numerik *part spar* untuk pesawat berkategori *utility* dengan load sebesar 6G menggunakan material komposit. Tujuan dari penelitian tersebut adalah untuk mengetahui keamananstruktur berdasarkan kriteria kegagalan dan mendapatkan berat yang optimal pada spar. Proses penyelesaian masalahh menggunakan metode elemen hingga atau *finite element* dengan bantuan *software CAE* (Jayadi *et al*, 2021)

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Komposit

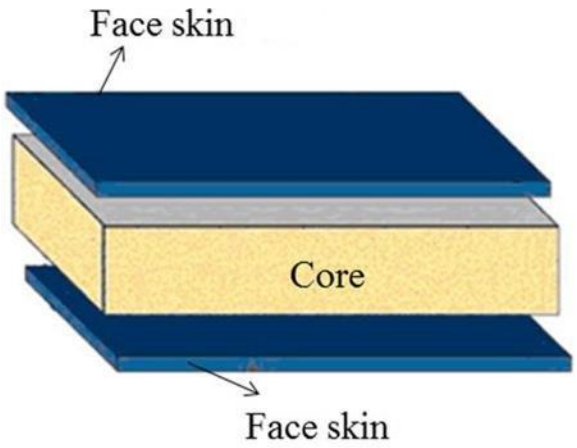
Didalam dunia industri kata komposit dalam pengertian bahan komposit berarti terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda yang digabung atau dicampur menjadi satu. Menurut Kaw (1997) komposit adalah sruktur material yang terdiri dari 2 kombinasi bahan atau lebih, yang dibentuk pada skala makroskopik 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 Komposit *Sandwich*

Komposit *sandwich* 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 impak, 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 alumunium, baja, logam, polymer dan stainless steel (Nugroho, 2011).

2.2.3 *Carbon Fiber*

Carbon fiber atau yang biasa disebut serat karbon adalah serat sintesis dengan kekuatan tarik dan konduktivitas listrik yang tinggi, massa jenis serta koefisien ekspansi termal yang rendah membuatnya sangat popular 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*

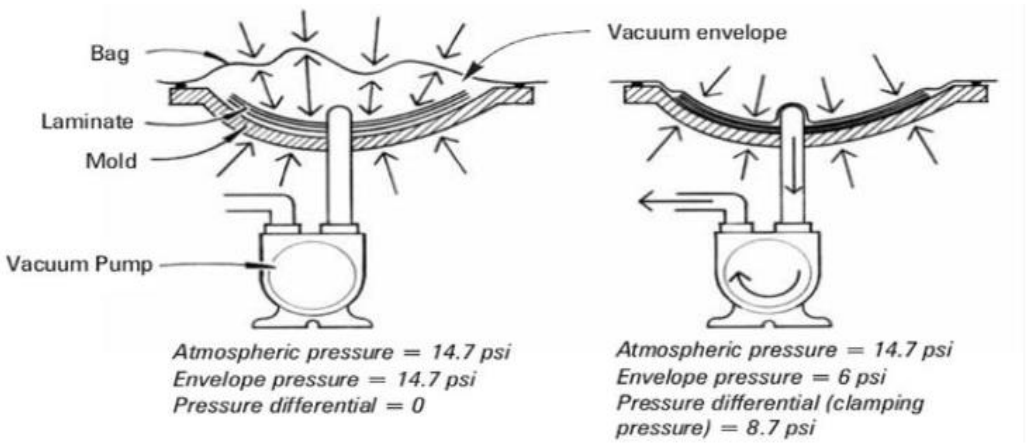
3D *printing* atau dikenal juga sebagai *additive manufacturing* adalah proses membuat objek 3D atau bentuk apapun dari model digital. Dengan prinsipnya menggunakan *additive manufacturing*, 3D *printing* menkonversi desain digital tiga dimensi dari *computer aided design* (CAD) kemudian dikonversi ke 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 filamen. Filamen 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 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 proses ini digunakan pompa vakum untuk menghisap udara yang ada dalam wadah atau *mold* tempat diletakannya 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).



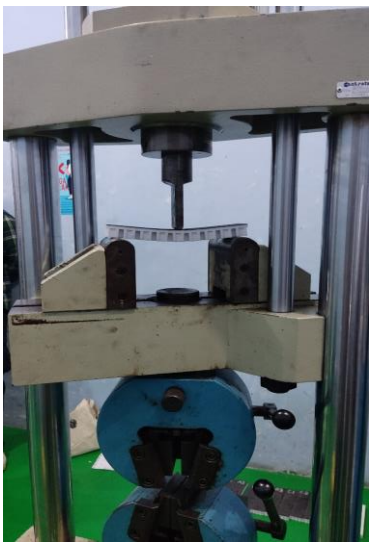
Gambar 2- 2 Skema *Vacuum Bagging*

2.2.6 Pengujian *Bending*

Uji lengkung (*Bending Test*) 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- 3 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

$$\sigma = \frac{3.P.L}{2.\mathrm{b}.h^2} \tag{2.1}$$

- Kekakuan *Bending*

$$D = E.I_{sandwich} = \frac{\mathrm{P}.L^3}{48.\delta} \tag{2.2}$$

- Kekakuan *Bending* Spesifik

$$D\ spesifik = \frac{D}{\mathrm{W}} \tag{2.3}$$

Keterangan:

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)

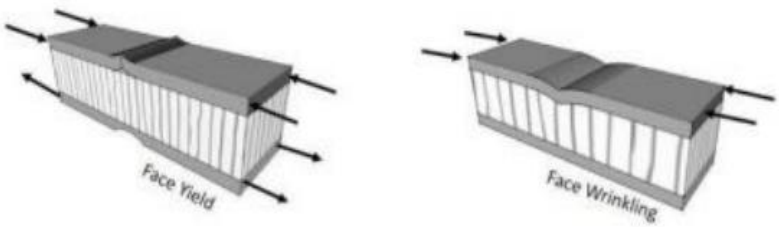
W = Berat spesimen (gram)

D = Kekakuan *bending* (Nmm^2)

2.2.7 Modus Kegagalan Pengujian *Bending*

Menurut (Petras, 1998), modus kegagalan dari struktur *honeycomb sandwich* komposit terdiri dari kegagalan *skin* dan kegagalan *core*. Yang dimana kegagalan *skin* antara lain:

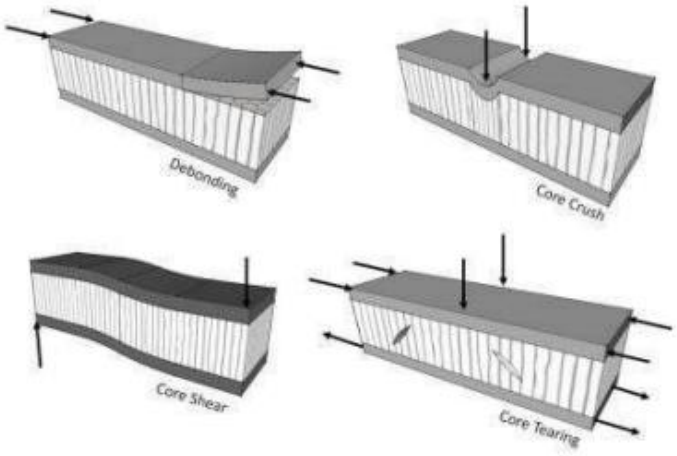
1. *Face yield* yang terjadi akibat tegangan normal nilainya lebih besar dari tegangan luluh material dan apabila material dari skin memiliki sifat getas, maka kegagalan *face yield* kemungkinan besar dapat terjadi pada bagian atas disebabkan bagian atas lebih rentan terhadap tegangan tekan.
2. *Face 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- 4 Modus Kegagalan *Skin*

Selain itu, untuk modus kegagalan *core* terdiri dari 4 jenis 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- 5 Modus Kegagalan *Core*

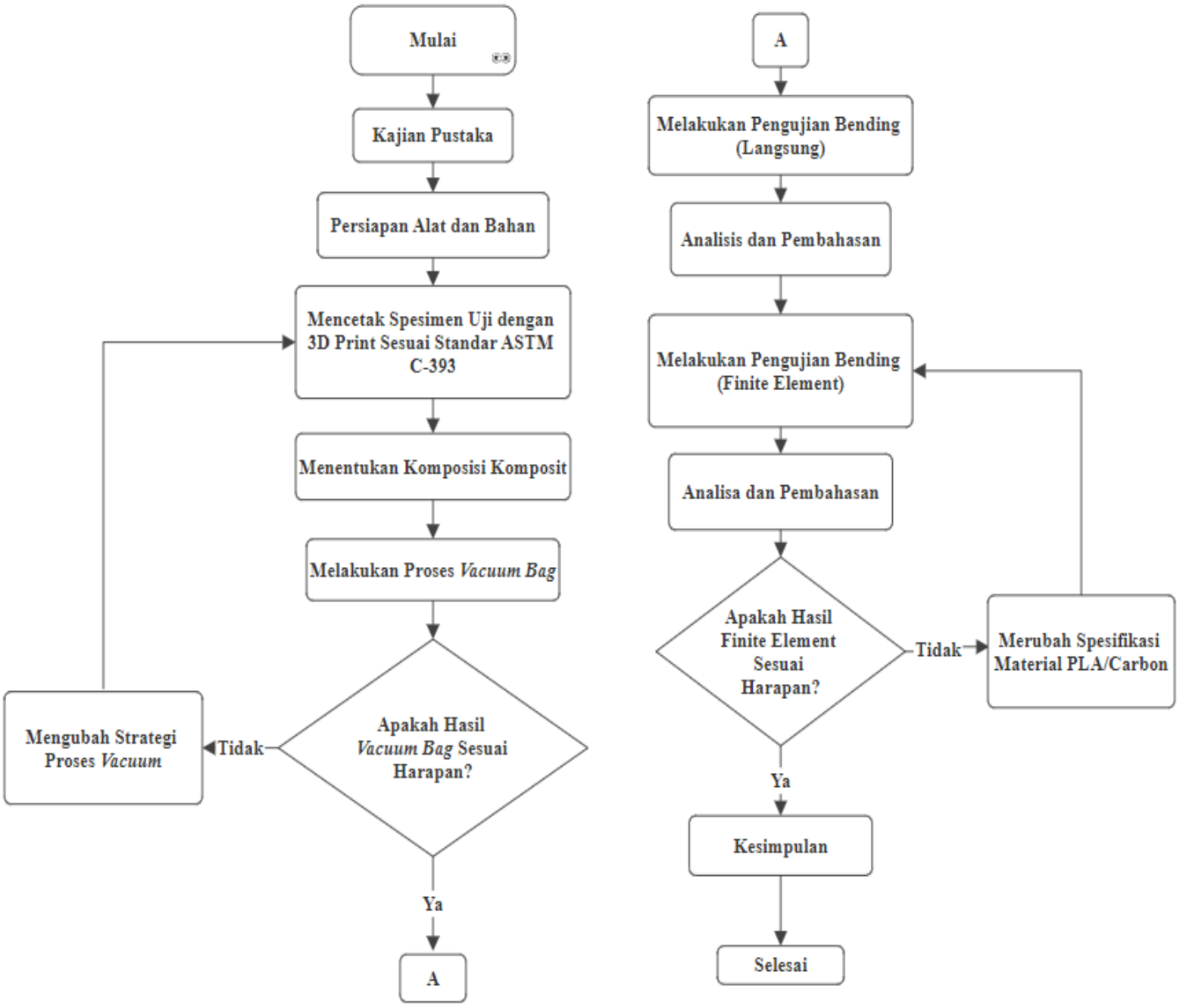
2.2.8 Finite Element

Menurut (Mulyadi, 2011) Metode elemen hingga adalah cara untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan persamaan matematika rumit dan kondisi batas tertentu. Dalam metode ini, bentuk geometri masalah dipecah menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen hingga. Persamaan matematika tersebut diterapkan pada setiap bagian kecil setelah diubah menjadi bentuk yang lebih sederhana.

Untuk menggambarkan variabel utama yang belum diketahui dalam setiap bagian, digunakan fungsi-fungsi tertentu. Dari sini, diperoleh satu set persamaan untuk setiap bagian kecil dalam masalah tersebut. Setelah itu, semua bagian kecil disusun menjadi satu sistem besar. Metode elemen hingga dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah fisik. Beberapa jenis masalah yang dapat dipecahkan dengan metode ini antara lain masalah tegangan, tekukan, dan analisis getaran. Metode elemen hingga (*finite element method*) telah memberikan kontribusi besar dalam penemuan-penemuan di bidang riset dan industri karena dapat digunakan sebagai alat penelitian dalam eksperimen numerik.

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3- 1 Alur Penelitian

3.2 Peralatan dan Bahan

1. 3D *Printing*

   Pada gambar 3-2 dibawah ini merupakan mesin 3D *Print* dengan merk Creality3D seri Ender 6. Mesin ini digunakan untuk mencetak spesimen yang akan di uji.

Gambar 3- 2 3D Print Creality3D Ender 6

2. Filamen PLA+

   Pada gambar 3-3 dibawah ini merupakan filamen PLA+ (*Polylactid Acid*) bahan yang digunakan dalam mencetak bagian core pada spesimen.

Gambar 3- 3 Filament PLA+

3. *Vacuum Pump*

   Vacuum Pump merupakan alat yang berfungsi sebagai penghisap udara di dalam *vacuum bag* sekaligus memberi tekanan agar nantinya bentuk dari *vacuum bag* akan mengikuti bentuk benda.Vacuum Pump ini bermerk Krisbow seperti gambar 3-4 dibawah ini.

Gambar 3- 4 *Vacuum Pump*

4. Tabung Reservoir

   Tabung Reservoir memiliki fungsi untuk menampung sisa resin yang berlebih agar nantinya tidak ikut tersedot ke dalam pompa yang dapat memberikan kerusakan pada pompa. Pada tabung reservoir juga terdapat barometer yang berfungsi untuk mengukur tekanan yang terjadi. Bentuk tabung reservoir dapat dilihat pada gambar 3-5 dibawah ini.

Gambar 3- 5 Tabung Reservoir

5. Timbangan

   Timbangan digunakan untuk mengukur berat dari spesimen sebelum di beri serat karbon serta sesudah di beri lapisan serat karbon. Timbangan juga digunakan sebagai alat untuk mengukur takaran dari resin dan hardener. Timbangan yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3-6 di bawah ini.

Gambar 3- 6 Timbangan

6. *Vacuum bag*

   Pada gambar 3-7 dibawah ini merupakan *vacuum bag* yang berfungsi sebagai tempat untuk meletakan spesimen untuk proses *Vacuum bagging*. *Vacuum Bag* juga berfungsi untuk mencegah udara masuk atau keluar selama proses pemvakuman.

Gambar 3- 7 *Vacuum Bag*

7. *Peel ply*

   Peel ply merupakan kain yang digunakan agar resin dapat menyebar secara merata pada permukaan *skin. Peel* ply juga berfungsi agar nantinya memudahkan proses pencopotan spesimen dengan kain *breathe bleeder fabric.* Bentuk dari kain *peel ply* dapat dilihat pada gambar 3-8 dibawah ini.

Gambar 3- 8 *Peel ply*

8. *Breathe Bleeder Fabric*.

   Pada gambar 3-9 dibawah ini merupakan kain *Breathe Bleeder Fabric* yang fungsinya untuk menyerap resin berlebih pada *skin*.

Gambar 3- 9 *Breathe Bleeder Fabric*

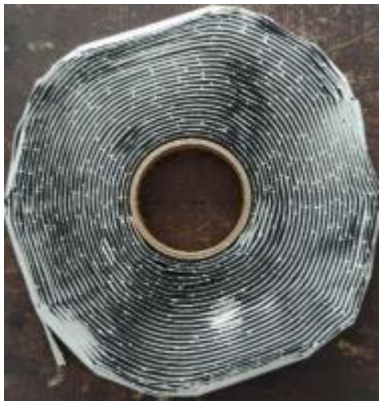
9. Selang

   Pada gambar 3-10 dibawah ini merupakan selang yang berfungsi untuk menyedot udara dari *vacuum bag* oleh *vacuum pump.*

Gambar 3- 10 Selang

10. *Sealent Tape*

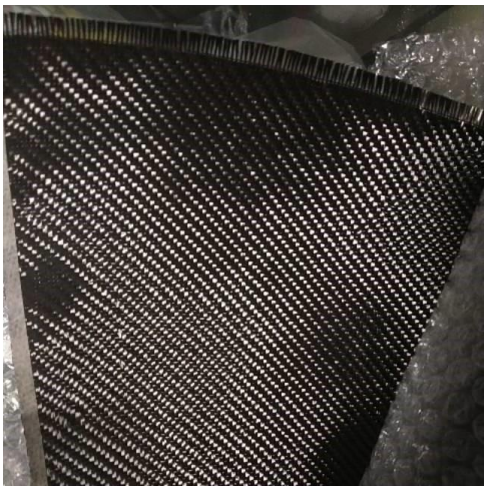
    Pada gambar 3-11 dibawah ini merupakan *sealent tape* yang memiliki fungsi untuk merekatkan plastik *vacuum bag*, sealent tape juga memiliki peran agar mencegah kebocoran udara pada proses pemvakuman.



Gambar 3- 11 *Sealent Tape*

11. Serat Karbon

Pada gambar 3-12 dibawah merupakan serat karbon yang digunakan sebagai skin pada struktur komposit.



Gambar 3- 12 Serat Karbon

12. Lem ALF

Lem ALF merupakan lem yang digunakan untuk menempelkan *skin* serat karbon dengan core. Lem ALF sendiri merupakan lem yang berbasis resin sehingga lem ini dapat menjadi perekat yang kuat antara *skin* dengan *core* . Bentuk lem ALF dapat dilihat dari gambar 3-13 dibawah ini.

Gambar 3- 13

13. Resin *Epoxy*

Gambar 3-14 dibawah ini menunjukan resin *epoxy* yang digunakan untuk merekatkan lapisan serat karbon dengan *core* yang berbahan PLA+ pada tahap proses *Vacuum bagging*.

Gambar 3- 14 Resin Epoxy

14. *Hardener*

Pada gambar 3-15 dibawah ini merupakan hardener yang berfungsi sebagai campuran dari resin *epoxy*. *Hardener* juga memiliki peran agar proses pengerasan dari resin menjadi maksimal dan cepat

Gambar 3- 15 *Hardener*

15. Jangka Sorong

Pada gambar 3-16 dibawah ini merupakan jangka sorong yang digunakan untuk mengukur panjang, lebar, tinggi dari spesimen. Satuan dari jangka sorong yang digunakan adalah milimeter.

Gambar 3- 16 Jangka Sorong

16. Mistar

Pada gambar 3-17 dibawahh ini merupakan mistar atau penggaris yang digunakan untuk mengukur panjang spesimen jika jangka sorong tidak mampu mengukur panjang spesimen.

Gambar 3- 17 Mistar

17. Kuas

Kuas pada gambar 3-18 digunakan untuk mengoles dan meratakan lem ALF saat proses penempelan *skin* dan *core.*

Gambar 3- 18 Kuas

18. *Cutter*

Cutter pada gambar 3-19 digunakan untuk memotong serta merapihkan serat karbon yang telah di tempelkan.

Gambar 3- 19 *Cutter*

19. Gunting

Gunting pada gambar 3-20 digunakan untuk memotong kain , serat karbon , *peel ply* dan *vacuum bag* agar sesuai dengan ukuran yang di inginkan.

Gambar 3- 20 Gunting

20. Gelas Plastik dan Stik pengaduk

Gelas plastik dan stik pengaduk pada gambar 3-21 digunakan sebagai wadah dan untuk mengaduk campuran dari resin *epoxy* dan hardenernya agar tercampur secara baik.

Gambar 3- 21 Gelas Plastik dan Pengaduk

21. Lakban Kertas

Lakban kertas pada gambar 3-22 di bawah ini digunakan untuk membantu proses pencetakan spesimen saat proses 3D *print*.

Gambar 3- 22 Lakban Kertas

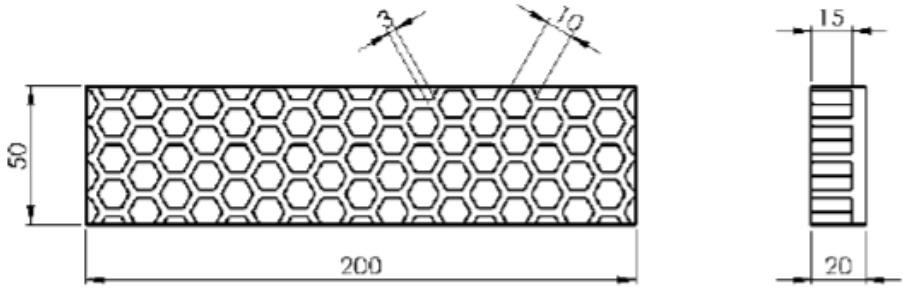
22. Laptop

Laptop pada gambar 3-23 digunakan untuk membuat desain spesimen dan digunakan untuk melakukan uji analisis *finite element* pada aplikasi *solidwork*.

Gambar 3- 23 Laptop

3.3 Dimensi Spesimen

Dimensi spesimen yang akan dibuat dan diuji pada penelitian ini menggunakan standar ASTM C393. Bahan yang digunakan pada *core* adalah PLA+ dengan infill cetak nya adalah 100%.

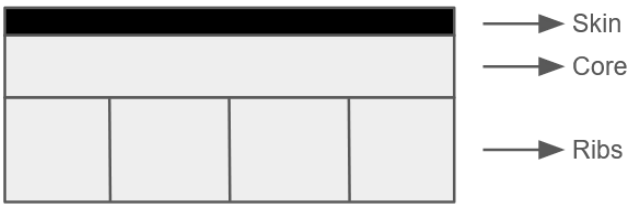


Gambar 3- 24 Dimensi spesimen

Pada Gambar 3-24 diatas dapat dilihat bahwa panjang dari spesimen adalah 200 mm, dengan lebar 50 mm dan tebal secara keseluruhannya adalah 20 mm. Pada bagian *ribs* tebalnya sebesar 15 mm dan untuk *honeycomb* yang berbentuk heksagonal memiliki ukuran berdiameter 10 mm dengan jarak antar *honeycomb* sebesar 3 mm. Spesimen yang dibuat adalah sebanyak 12 spesimen dimana diantaranya terdiri dari 3 spesimen *non skin* atau tanpa *skin* , 3 spesimen dengan *skin* 1 lapis , kemudian 3 spesimen dengan 2 lapis *skin* dan 3 spesimen dengan 3 lapis *skin* serat karbon untuk dijadikan pembanding dari hasil pengujian.

3.4 Susunan Lapisan Komposit

Pada spesimen komposit terdiri dari 3 bagian lapisan diantaranya adalah *skin, core,* dan *ribs*. Bagian skin merupakan serat karbon yang nantinya terdapat 3 variasi *layer skin* yang di tempelkan pada bagian *core*. Terakhir adalah bagian *ribs* yang berbentuk heksagonal atau berbentuk seperti sarang lebah yang disebut juga *honeycomb*. Pada bagian *core* dan bagian *ribs* dicetak menggunakan filamen PLA+ melalui proses *print* 3D. *Ribs* juga dapat disbut *core* karena, *core* dan *ribs* menjadi satu sehingga bisa disebut satu kesatuan.

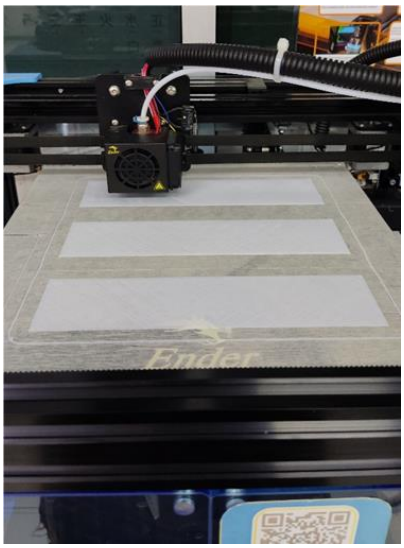


Gambar 3- 25 Susunan Lapisan Komposit

3.5 Proses Pengerjaan Spesimen

Proses pembuatan spesimen dikerjakan dengan beberapa langkah yang telah dibagi menjadi beberapa tahap pembuatan spesimen. Tahap pertama adalah pembuatan *core* spesimen menggunakan proses printing oleh mesin 3D, tahap selanjutnya adalah pelapisan *core* dengan *skin caorbon fibre* . Tahap terakhir adalah proses *vacuum bagging* untuk menyatukan *core* dan lapisan *skin carbon fibre.*

3.5.1 Proses Pembuatann Spesimen dengan 3D Print



Gambar 3- 26 Pembuatan Spesimen 3D *Print*

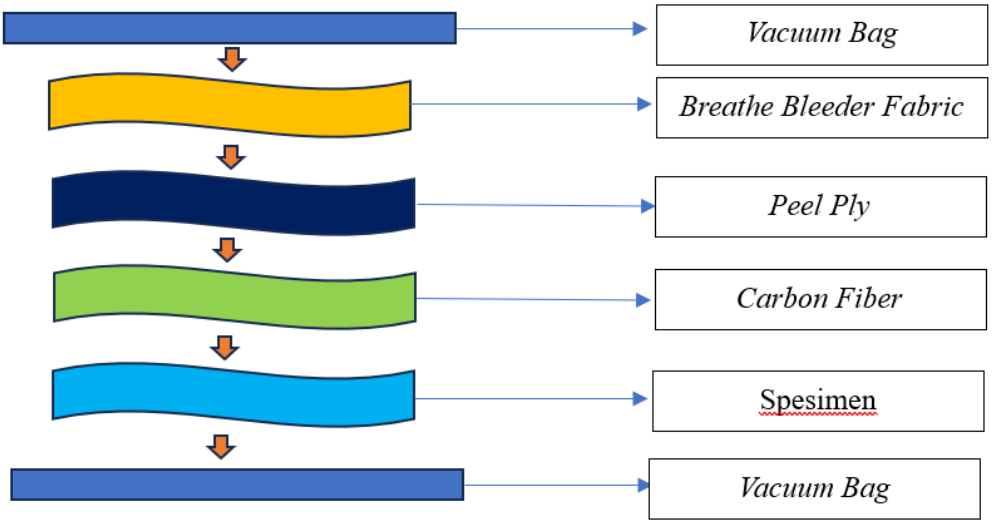
Seperti pada gambar 3-26 di atas pembuatan spesimen menggunakan mesin 3D *prin*t dengan bahan yang digunakan adalah filament PLA+. Dimensi spesimen yang di buat berdasarkan dengan standar pengujian *bending* ASTM C393.

Tabel 3- 1 Parameter Pencetakan 3D *Print*

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

Seperti yang dapat dilihat berdasarkan tabel 3-1 parameter yang digunakan pada saat mencetak spesimen menggunakan bahan filamen PLA+ dengan *infill* atau kerapatan 100% , ketebalan *layer* dari spesimen yang di cetak adalah 0,4 mm. Pencetakan dilakukan dengan suhuu *nozzle* sebesar 215°C dan suhu meja cetak sebesar 60°C. kemudian kecepatan mesin saat mencetak adalah 100 mm/s.

3.5.2 Proses *Vacuum Bagging*



Gambar 3- 27 Skema Susunan *Vacuum Bagging*

Seperti yang di perlihatkan pada gambar 3-27 skema dari susunan *vacuum bagging* menunjukan urutan dari lapisan yang digunakan dalam proses vakum dimana pada lapisan terluar merupakan vacuum bag yang kemudian dilanjutkan dengan *breathe bleeder fabric*, lalu kemudian dilanjutkan dengan *peel ply* , lapisan selanjutnya ada *skin* berupa serat karbon dengan variasi layer 1 lapis, 2 lapis, 3 lapis sesuai dengan variasi layer *skin* yang telah direkatkan pada spesimen dan lapisan paling bawah akan ditutup dengan *vacuum bag*.

Berikut ini merupakan tahapan pengerjaan proses *vacuum bagging*:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam proses *vacuum bagging*
2. Mencampurkan lem ALF dengan katalis menggunakan perbandingan 1:1 , kemudian mengoleskan lem yang sudah tercampur dengan katalis pada bagian core spesimen lalu ditempelkan dengan skin yaitu serat karbon. Langkah ini akan diulangi pada variasi 2 *layer* dan 3 *layer skin.*

Gambar 3- 28 Pencampuran Lem ALF dan Katalis

3. Menyiapkam *vacuum bag* sebagai alas kemudaian menempelkan *sealent tape*.

Gambar 3- 29 Pemasangan *Sealent Tape*

4. Mencampurkan resin *epoxy* dan *hardener* dengan perbandingan 2:1 kemudian di aduk hingga tercampur merata, kemudian dioleskan ke lapisan serat karbon yang sudah menempel pada spesimen.

Gambar 3- 30 Pencampuran Resin

5. Menempelkan *peel ply* pada bagian serat karbon yang telah dioles campuran resin dan *hardener*, campuran resin dan *hardener* kembali di oles di atas *peel ply* agar resin merata pada lapisan karbon lalu kemudian menempelkan *breathe bleeder fabric* diatas *peel ply*.

Gambar 3- 31 Penempelan *Peel Ply* dan *Breathe Bledeer Fabric*

6. Meletakan spesimen diatas vacuum bag , spesimen diletakan pada bagian dalam dari sealent tape yang sudah ditempelkan pada *vacuum bag* sebelumnya. Posisi core dari spesimen berada di paling bawah kemudian bagian dari skin serat karbon , *peel ply* dan *breathe bledeer fabric* menghadap keatas.
7. Menutup seluruh area spesimen dengan *vacuum bag* kemudian di tempelkan pada *sealent tape*. Pastikan seluruh area *vacuum bag* yang sudah menempel

pada *sealent tape* tertutup rapat sehingga tidak ada celah untuk udara keluar , lalu sisakan sedikit celah untuk memasukan selang yang berguna untuk proses *vacuum*.

Gambar 3- 32 Rangkaian *Vacuum Bagging*

8. Mulai melakukan proses *vacuum* dengan menyalakan pompa *vacuum*, biarkan hingga udara di dalam *vacuum bag* tidak ada yang tersisa. Kemudian memastikan proses *vacuum* berjalan sempurna dengan tidak ada udara yang bocor masuk ke dalam *vacuum bag*. Proses *vacuum* akan dibiarkan selama 24 jam agar resin dapat mengeras dengan sempurna.

Gambar 3- 33 Proses Vakum Udara

9. Membuka rangkaian *vacuum bag* setelah di diamkan selama 24 jam, kemudian melepaskan lapisan *breathe bledeer fabric* dan *peel ply* dari spesimen. Kemudian melakukan pengecekan apakah terjadi kegagalan selama proses *vacuum bagging*.

Gambar 3- 34 Hasil Proses *Vacuum Bagging*

3.5.3 Hasil Pengerjaan

Pada proses selanjutnya adalah mengukur tiap spesimen, pengukuran dilakukan menggunakan alat jangka sorong. 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	1.40	8.6
2	NonLayer_2	19.74	19.74	50.08	1.36	7.51
3	NonLayer_3	19.60	19.60	50.18	1.41	8.10
4	1Layer_1	19.72	20.22	50.18	1.66	7.86
5	1Layer_2	19.7	20.20	50.10	1.66	8.40
6	1Layer_3	19.64	20.22	50.08	1.54	9.26
7	2Layer_1	19.62	20.46	50.20	1.68	7.12
8	2Layer_2	19.61	20.44	50.10	1.68	7.15
9	2Layer_3	19.66	20.54	50.12	1.79	7.56
10	3Layer_1	19.66	20.70	50.20	1.74	6.39
11	3Layer_2	19.68	20.72	50.10	1.61	7.03
12	3Layer_3	19.60	20.70	50.08	1.61	7.64

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* karbon, 3 spesimen dengan 1 lapis *skin* karbon, 3 spesimen dengan 2 lapis *skin* karbon, dan 3 spesimen dengan 3 lapis *skin* 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 kegagalan pada spesimen dan data hasil 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 Bending
		(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 *layer 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 *layer skin* dengan kode 2Layer_3 sebesar 1,79 KN. Tegangan *bending* terbesar ada pada spesimen 2 *layer skin* dengan kode 2Layer_3 sebesar 21,59 MPa. Kedua nilai tertinggi tersebut

dimiliki oleh spesimen yang sama dengan penggunaan 2 *layer 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

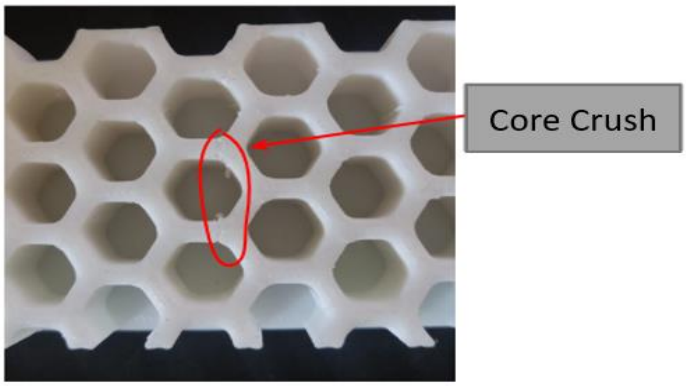
Pengujian bending yang telah dilakukan menyebabkan spesimen mengalami kegagalan atau kerusakan akibat pemberian beban pada spesimen yang melebihi kemampuan materialnya. Berdasarkan hasil pengamatan dari 12 spesimen yang telah dilakukan uji *bending*, pada umumnya spesimen mengalami kegagalan *ribs* atau *core crush* akibat adanya pembebanan bada bagian tengah spesimen dan kegagalan *face wrinkling* akibat *skin* komposit yang relatif tipis terhadap tebal *core.* Kegagalan ini dapat mengakibatkan penurunan kekuatan *bending* secara drastis.

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)

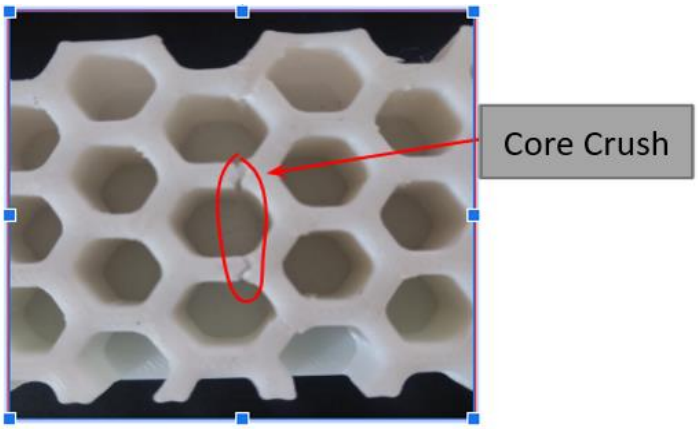
   Pada spesimen NonLayer_1 yang terlihat pada gambar 4-2 spesimen mengalami kegagalan *core crush,* pada bagian *ribs* mengalami retakan akibat pembebanan tapi tidak sampai patah.



Gambar 4- 2 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_1

2. Spesimen tanpa *skin* 2 (NonLayer_2)

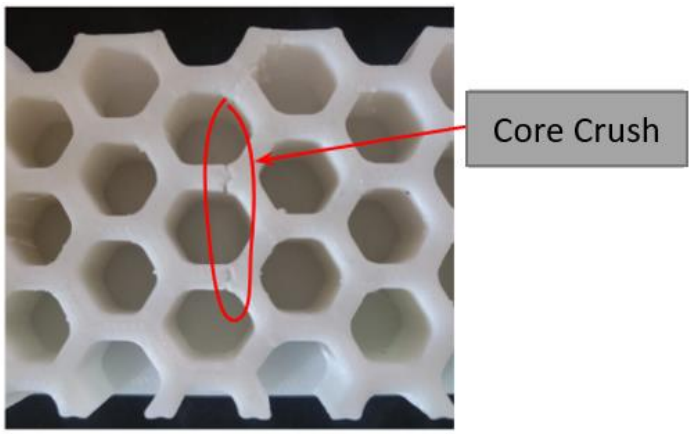
Pada spesimen NonLayer_2 yang terlihat pada gambar 4-3 spesimen mengalami kegagalan *core crush*, pada bagian ribs mengalami retakan akibat pembebanan tapi tidak sampai patah.



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 *core* crush, pada bagian ribs mengalami retakan akibat pembebanan tapi tidak sampai patah.



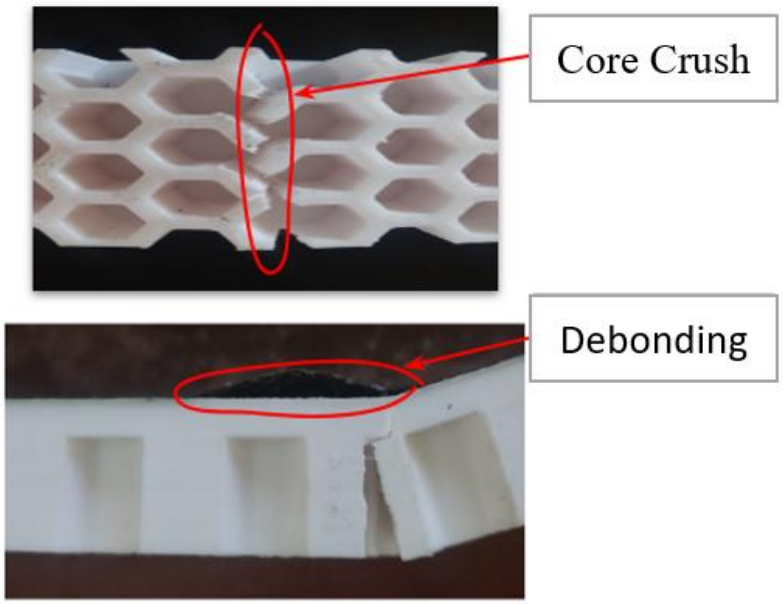
Gambar 4- 4 Modus Kegagalan Spesimen NonLayer_3

4.3.2 Analisis Kegagalan Spesimen 1 *Layer 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)

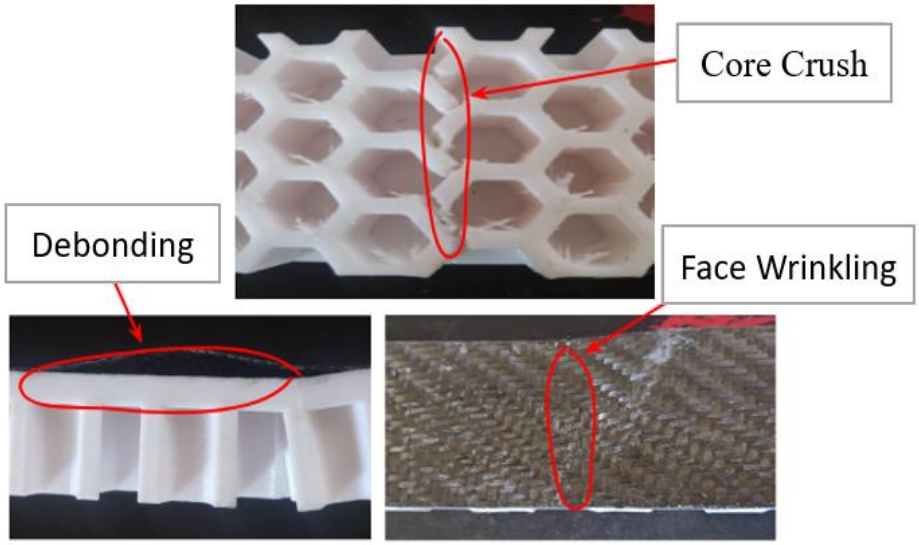
Pada spesimen 1Layer_1 yang terlihat pada gambar 4-5 spesimen mengalami kegagalan *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah diikuti kegagalan *debonding* pada lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen karena ikatan antar *skin* dan *core* yang tidak terlalu kuat.



Gambar 4- 5 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_1

2. Spesimen 1 layer 2 (1Layer_2)

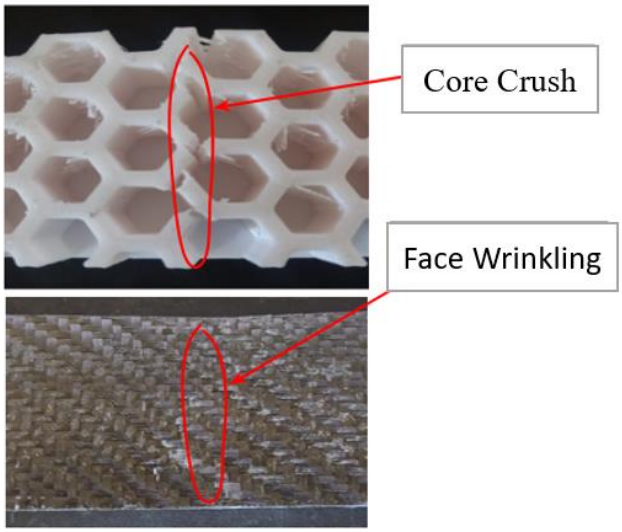
Pada spesimen 1Layer_2 yang terlihat pada gambar 4-6 spesimen mengalami kegagalan *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah, diikuti kegagalan *debonding* pada lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen karena perekat tidak mampu 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 *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah 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*.



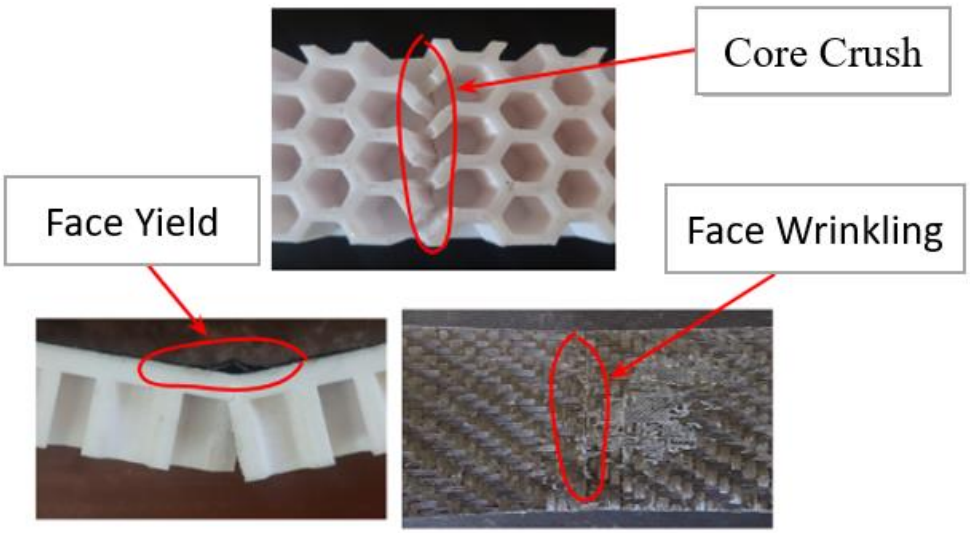
Gambar 4- 7 Modus Kegagalan Spesimen 1Layer_3

4.3.3 Analisis Kegagalan Spesimen 2 *Layer Skin*

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

1. Spesimen 2 layer 1 (2Layer_1)

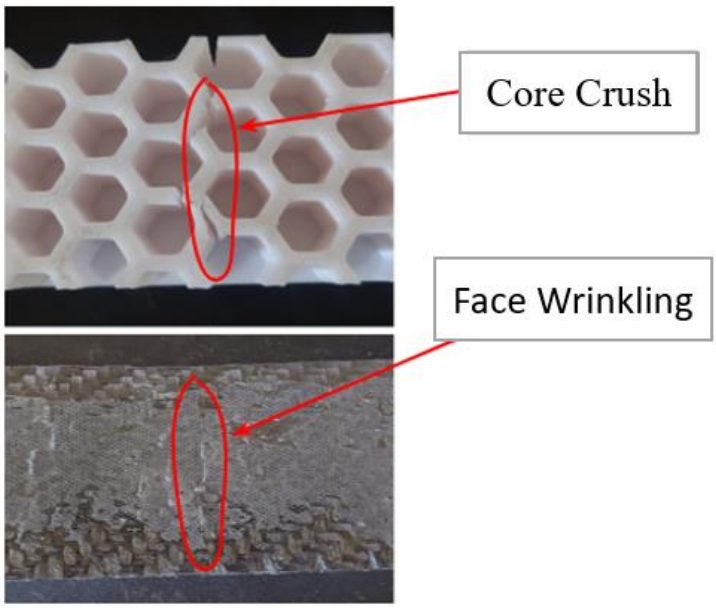
   Pada spesimen 2Layer_1 yang terlihat pada gambar 4-8 spesimen mengalami kegagalan *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah, diikuti kegagalan *face yield* dimana kegagalan ini terjadi pada *skin* komposit bagian atas lebih kritis menerima 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)

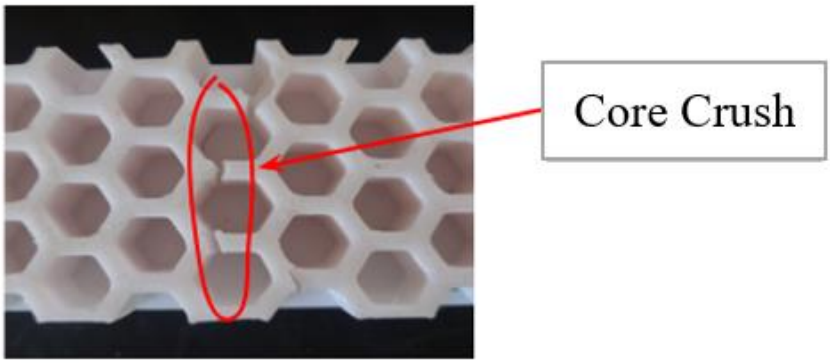
   Pada spesimen 2Layer_2 yang terlihat pada gambar 4-9 spesimen mengalami kegagalan *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada *skin* dimana terjadi kerutan akibat fenomena *buckling* dan kurangnya *support* 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 *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah.



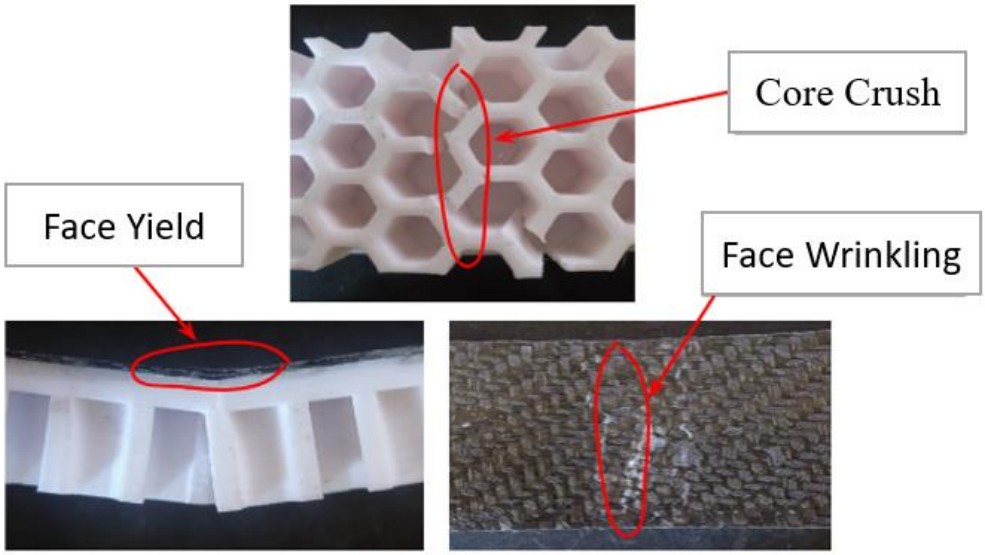
Gambar 4- 10 Modus Kegagalan Spesimen 2Layer_3

4.3.4 Analisis Kegagalan Spesimen 3 *Layer Skin*

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

1. Spesimen 3 layer 1 (3Layer_1)

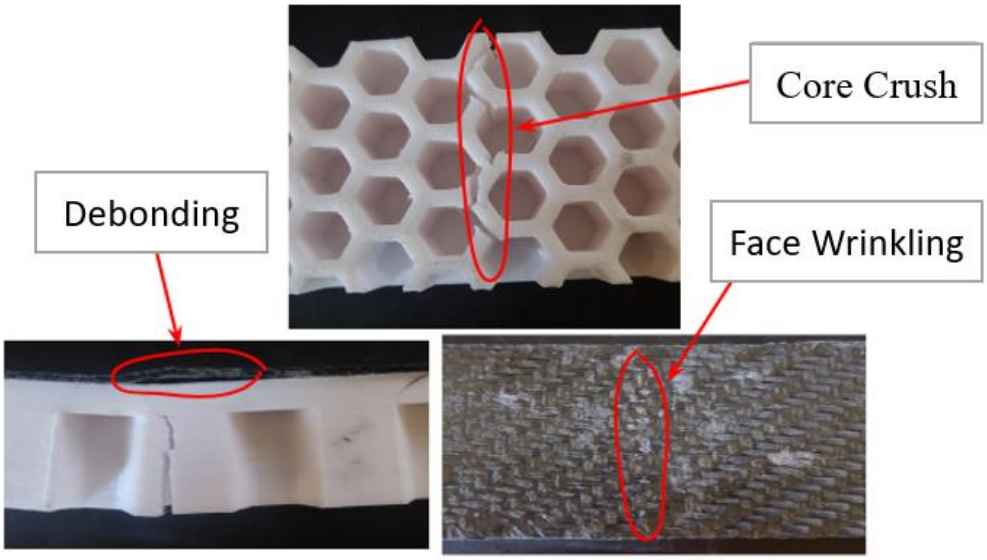
Pada spesimen 3Layer_1 yang terlihat pada gambar 4-11 spesimen mengalami kegagalan *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah, diikuti kegagalan *face wrinkling* pada *skin* dimana terjadi kerutan akibat fenomena *buckling* dan kurangnya *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)

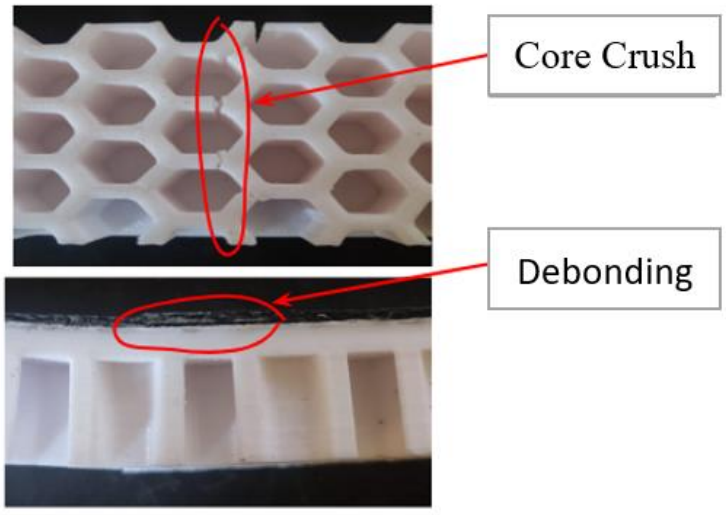
Pada spesimen 3Layer_2 yang terlihat pada gambar 4-12 spesimen mengalami kegagalan *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah, diikuti kegagalan *debonding* pada lapisan *skin* terlepas dari bagian *core* spesimen karena perekat tidak mampu 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 *core crush* yang dimana pada bagian ribs mengalami retakan akibat beban tekan tapi tidak sampai terbelah, 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, kemudian data akan diolah untuk mencari nilai kekakuan *bending* dan kekakuan *bending* spesifik dari setiap spesimen menggunakan persamaan 2.1, 2.2, dan 2.3 seperti 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.mm^2 dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 128.990 N.mm^2/gr. Pada spesimen dengan 1 *layer skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata kekakuan *bending* sebesar 19.622.033 N.mm^2 dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 139.432 N.mm^2/gr. Pada spesimen dengan 2 *layer skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata kekakuan

bending sebesar 24.145.095 N.mm^2 dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 165.377 N.mm^2/gr. Pada spesimen dengan 3 *layer skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata kekakuan *bending* sebesar 24.293.828 N.mm^2 dan kekakuan *bending* spesifik sebesar 163.046 N.mm^2/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 *layer skin,* 2 *layer skin,* dan 3 *layer skin.*

4.4.1 Perbandingan Variasi *Layer Skin*

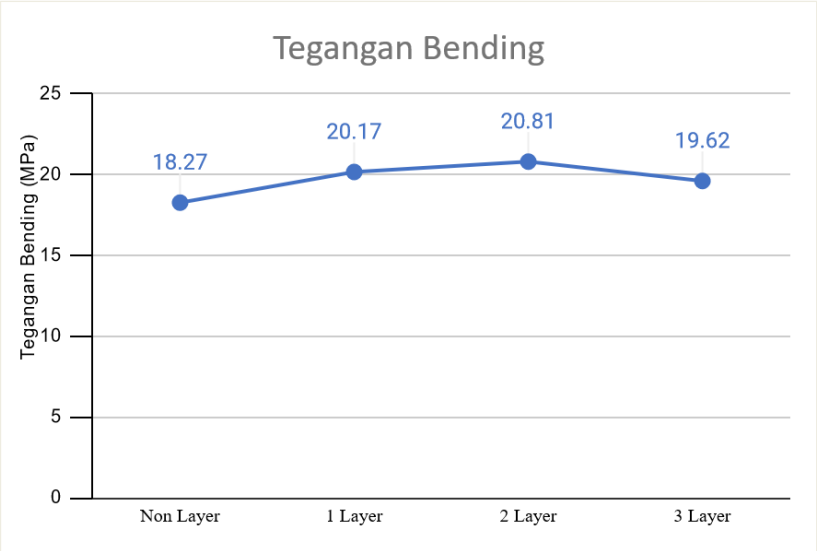
1. Tegangan *Bending*

Tabel 4- 3 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 4-3 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 *layer skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata tegangan bending sebesar 20,17 MPa. Pada spesimen dengan 2 *layer skin* serat karbon memiliki nilai rata-rata tegangan bending sebesar 20,81 MPa. Pada spesimen dengan 3 *layer 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 *layer skin* serat karbon dan nilai terendah pada spesimen dengan tanpa pelapisan *skin*.



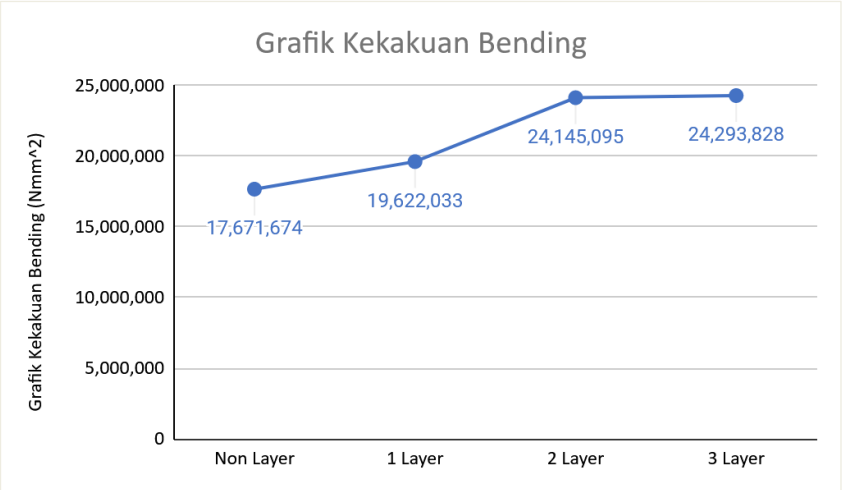
Gambar 4- 14 Grafik Tegangan *Bending*

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

kayu balsa variasi 2 layer skin memiliki sifat *ductile* yang lebih baik dibandingkan variasi 4 layer skin dan 6 layer skin.

2. Kekakuan *Bending*

Dari hasil pengolahan data spesimen dengan variasi *layer skin* serat karbon didapatkan nilai kekakuan *bending* yang disajikan dalam grafik pada gambar 4-16 didapatkan bahwa kenaikan nilai kekakuan bending berbanding lurus dengan penambahan *layer skin*. Nilai kekakuan *bending* tertinggi ada pada spesimen dengan 3 *layer skin* sebesar 24.293.827,85 Nmm^2, nilai ini tidak naik signifikan yang hanya naik sebanyak 1,0061 kali lipat dari spesimen dengan 2 *layer skin*. Nilai kekakuan *bending* terendah ada pada spesimen dengan tanpa pelapisan *skin* sebesar 17.671.673,73 Nmm^2, nilai ini naik sebanyak 1,1103 kali lipat dari spesimen dengan pemberian *skin* atau 1 *layer skin*, kenaikan nilai kekakuan *bending* tertinggi terjadi pada spesimen dengan 2 *layer skin* sebanyak 1,2305 kali lipat lebih besar dari spesimen dengan 1 *layer skin*.



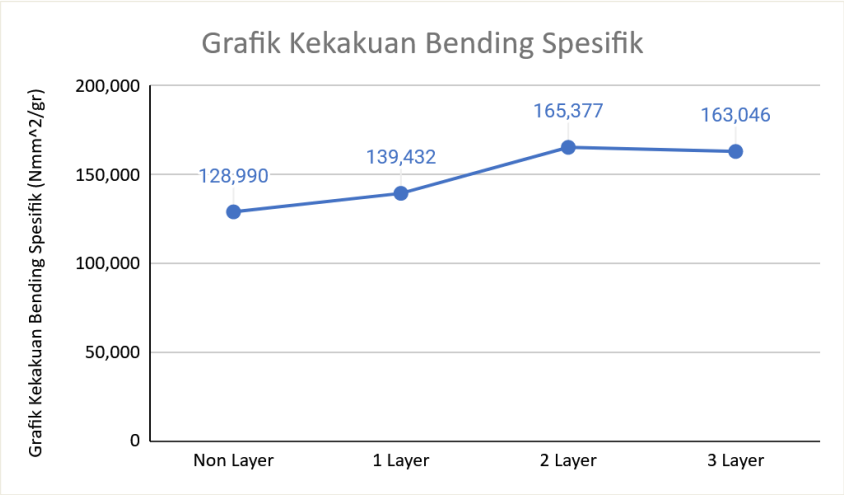
Gambar 4- 15 Grafik Kekakuan *Bending*

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 *layer skin* tidak terlalu signifikan dan cenderung memiliki nilai yang hampir sama dengan spesimen dengan 2

layer skin hal ini disebabkan oleh beban maksimal dan defleksi yang menurun. Beban maksimal yang mampu ditahan spesimen dengan 3 *layer 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

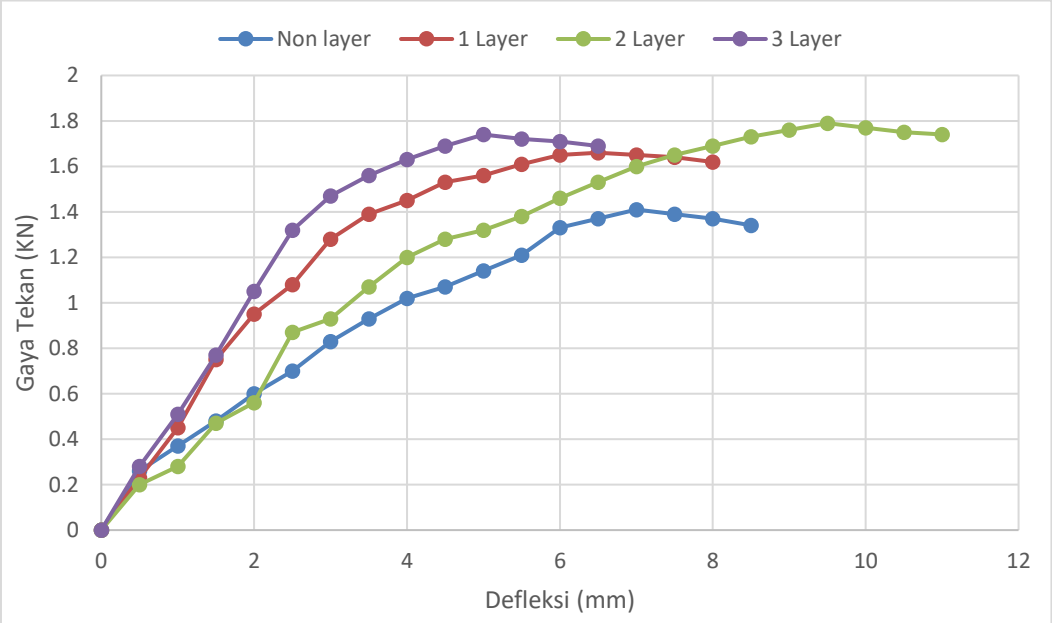
Dari hasil pengolahan data spesimen dengan variasi *layer skin* serat karbon didapatkan nilai kekakuan *bending* spesifik atau nilai kekakuan dari tiap gram spesimen yang disajikan dalam grafik pada gambar 4-16 didapatkan bahwa kenaikan nilai kekakuan bending spesifik spesimen mulai dari tanpa *skin* 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 Nmm^2/gr dan nilai kekakuan *bending* spesifik terendah ada pada spesimen dengan tanpa pelapisan *skin* sebesar 128.990,32 Nmm^2/gr.



Gambar 4- 16 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 kesemua bagian (Leite, 2013). Berdasarkan pernyatan tersebut penurunan dari kekakuan *bending* spesifik pada spesimen 3 *layer skin* berkaitan dengan nilai kekakuan *bending* dan penjelasan kekakuan *bending* pada gambar 4-15 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 diimbangin dengan tegangan *tarik* yang mampu ditahan sehingga pendistribusian beban yang diterima core tidak merata ke semua bagian.

4.4.2 Grafik Uji antara Gaya Tekan vs Defleksi



Gambar 4- 17 Grafik Uji Gaya Tekan vs Defleksi

Seperti yang dapat dilihat dari gambar 4-17 menunjukan grafik gaya tekan vs defleksi yang diambil dari spesimen yang memiliki nilai gaya tekan tertinggi dengan nilai defleksi yang rendah dari masing masing spesimen. Dari hasil grafik menyatakan bahwa spesimen dengan *non layer skin carbon fibre* memiliki beban sebesar 1,34 KN dengan defleksi 8,5 mm sebelum mengalami deformasi plastis. Spesimen dengan satu *layer skin carbon fibre* memiliki beban sebesar 1,62 KN

dengan defleksi 8 mm sebelum deformasi plastis. Spesimen dengan dua *layer skin carbon fibre* memiliki beban sebesar 1,74 KN dengan 11 mm defleksi Spesimen dengan tiga *layer skin carbon fibre* memiliki beban sebesar 1,70 KN dengan defleksi 6,5 mm sebelum mengalami deformasi plastis.

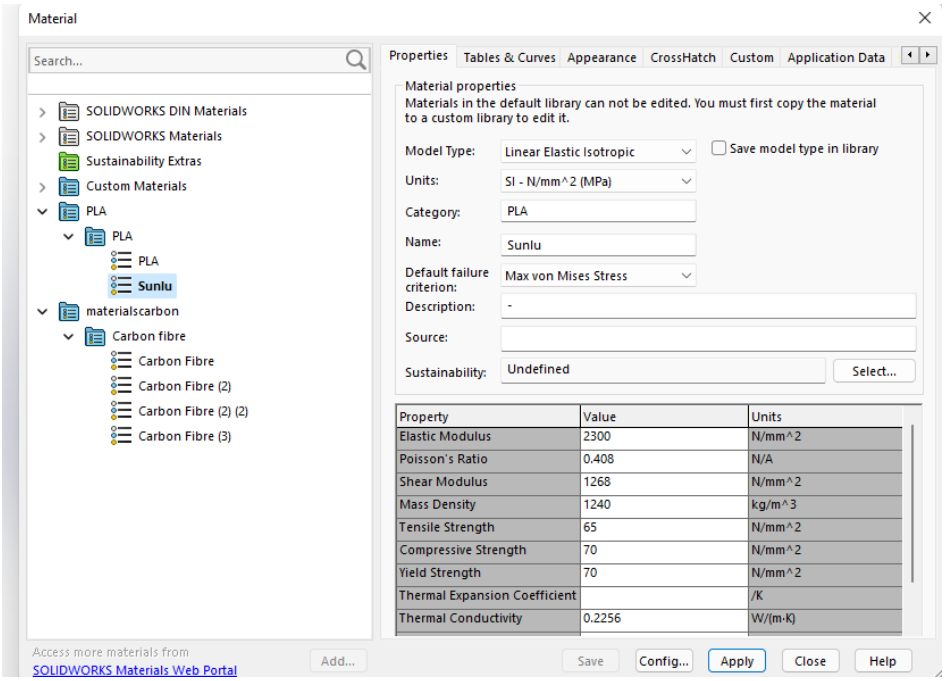
4.4.3 Analisis *Finite Element*

Dalam proses analisis Finite Element yang dilakukan terhadap spesimen menggunakan aplikasi solidworks. Solidworks adalah perangkat lunak untuk membantu proses desain suatu benda atau elemen mesin dengan mudah. Solidworks mampu menyediakan sketsa 2D yang dapat dikembangkan menjadi bentuk 3D. Analisa kekuatan desain juga dapat dilakukan dengan sederhana kemudian bisa dibuat dalam bentuk desain animasi dengan fitur-fitur yang telah disediakan (Sigarlaki *et al*, 2015)

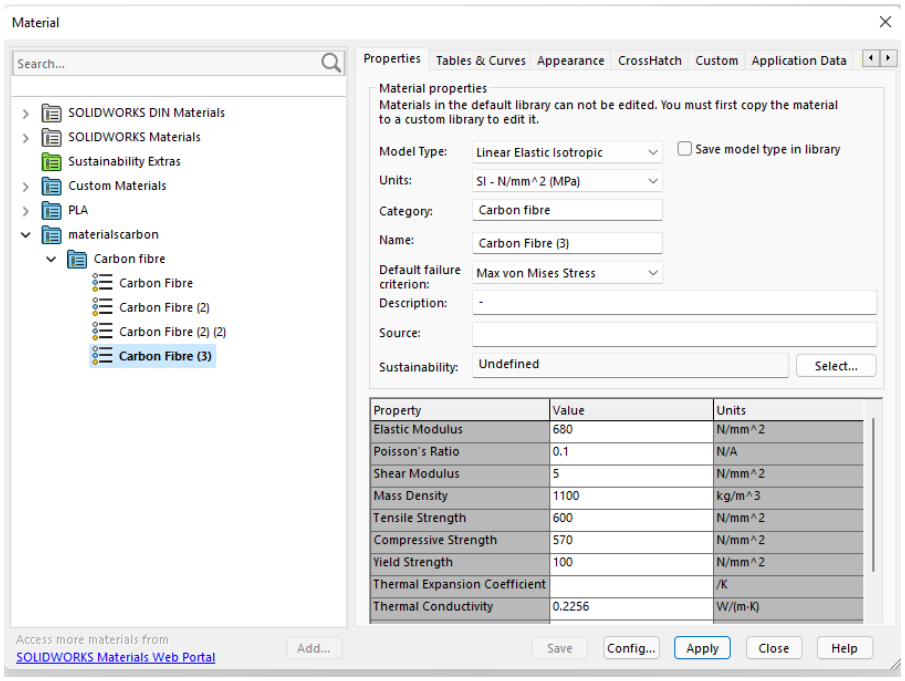
4.4.3.1 Spesifikasi Material

Dalam melakukan analisis *finite element* terdapat dua material yang diaplikasikan pada spesimen yaitu PLA dan *carbon*. Pada material PLA spesifikasi yang digunakan seperti yang ditunjukan pada Gambar 4-17. Spesifikasi material PLA di dapat dari situs resmi dari merk PLA yang digunakan dalam hal ini merk PLA yang digunakan adalah sunlu.

Dalam melakukan analisis *finite element* salah satu material karbon yang digunakan harus melewati tahap kualifikasi terlebih dahulu untuk memperoleh spesifikasi yang sesuai dengan material yang digunakan pada spesimen rill. Seperti yang ditunjukan pada Gambar 4-17 merupakan spesifikasi material karbon yang diperoleh untuk di aplikasikan pada material.



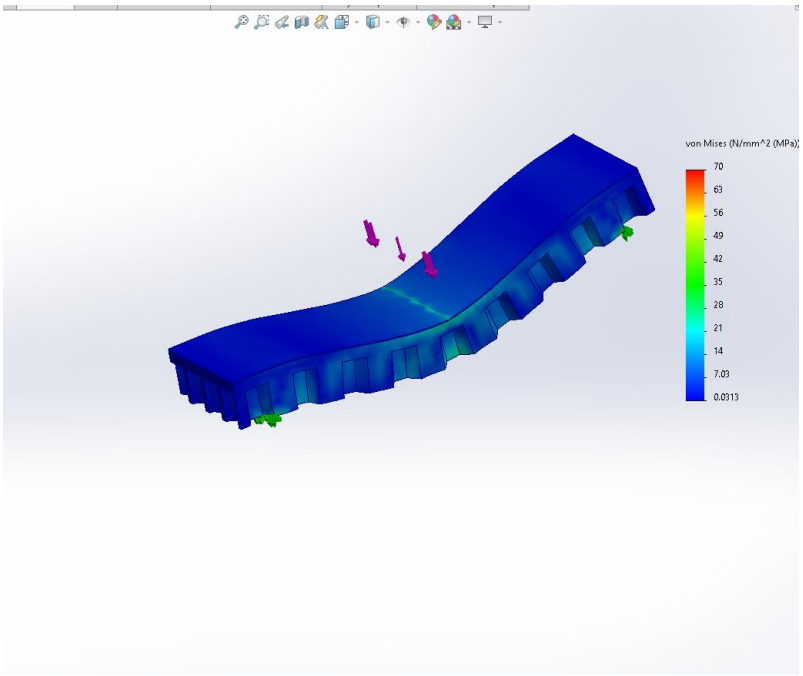
Gambar 4- 18 Spesifikasi Material PLA



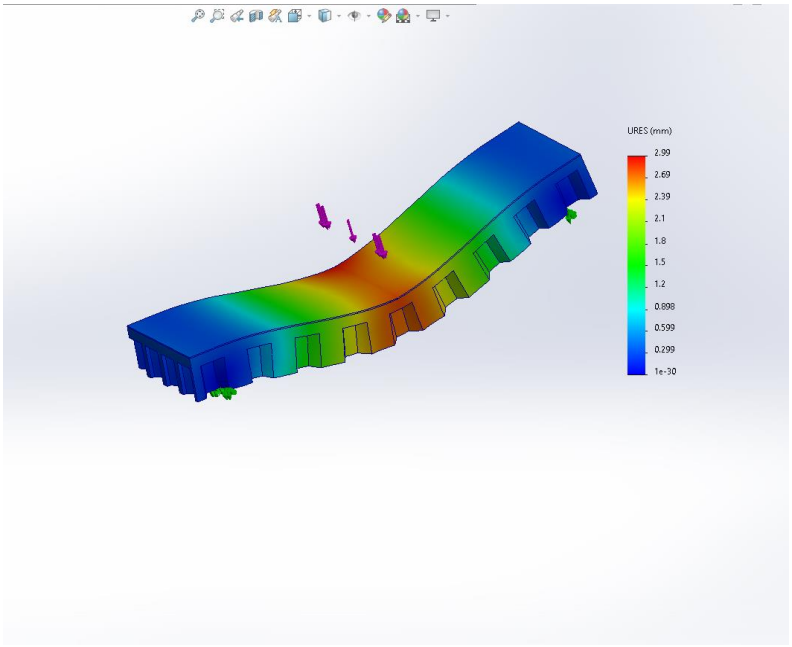
Gambar 4- 19 Spesifikasi Material Serat Karbon

4.4.3.2 Hasil Analisis *Finite Element*

Analisis uji bending pada spesimen 3D *print* komposit menggunakan pendekatan metode analisis *finite element*. Hasil dari analisis *finite element* di solidworks dapat dilihat di gambar dibawah ini.



Gambar 4- 20 Analisis Stress



Gambar 4- 21 Analisis Displacement

Gambar diatas menunjukan nilai dari stress serta displacement spesimen uji , setelah melakukan pengujian terhadap seluruh spesimen maka nilai dari pengujian dikumpulkan di dalam sebuah tabel dibawah ini .

Tabel 4- 4 Data Hasil Analisis *Finite Element*

No.	**Variasi Spesimen**	**Berat**	**Defleksi**	**Tegangan Bending**
		(gram)	**(mm)**	**(MPa)**
1	NonLayer_1	138	2.70	24.90
2	NonLayer_2	138	2.63	25.00
3	NonLayer_3	138	2.73	25.80
4	1Layer_1	144	2.99	28.00
5	1Layer_2	144	2.99	27.40
6	1Layer_3	144	2.77	26.80
7	2Layer_1	147	2.94	30.50
8	2Layer_2	147	2.94	30.50
9	2Layer_3	147	3.19	32.90
10	3Layer_1	150	3.06	25.30
11	3Layer_2	150	2.82	27.30
12	3Layer_3	150	2.83	26.20

Berdasarkan data yang telah di dapatkan dari pengujian bending dengan menggunakan pendekatan metode analisis *finite element* , data kemudian akan diolah untuk mencari nilai kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik dari setiap spesimen dengan menggunakan persamaan 2.2 dan 2.3 yang tertera pada bab2.

Tabel 4- 5 Data Hasil Perhitungan *Analisis Finite Element*

Kode Spesimen	Tegangan Bending (FE)	Tegangan Max (Uji Langsung)	Kekakuan Bending (FE)	Kekakuan Bending (Uji Langsung)	Kekakuan Bending Spesifik (FE)	Kekakuan Bending Spesifik (Uji Langsung)
	(MPa)	(MPa)	($N.mm^2$)	($N.mm^2$)	($N.mm^2/gr$)	($N.mm^2/gr$)
NonLayer_1	24,90	18,40	53.072.531	16.662.306	384.584	121.623
NonLayer_2	25,00	17,77	52.928.390	18.535.508	383.539	135.296
NonLayer_3	25,80	18,65	52.864.240	17.817.207	383.074	130.053
1Layer_1	28,00	20,63	56.825.390	21.616.783	394.621	152.231
1Layer_2	27,40	20,71	56.825.390	20.227.133	394.621	144.480
1Layer_3	26,80	19,18	56.904.483	17.022.183	395.170	121.587
2Layer_1	30,50	20,39	58.488.095	24.150.983	397.878	165.418
2Layer_2	30,50	20,47	58.408.628	24.049.650	397.338	164.724
2Layer_3	32,90	21,59	57.433.843	24.234.651	390.706	165.991
3Layer_1	25,30	20,63	58.201.389	27.871.088	388.009	187.054
3Layer_2	27,70	19,09	58.436.244	23.440.997	389.575	157.322
3Layer_3	26,20	19,13	58.229.756	21.569.399	388.198	144.761

Hasil data yang sudah diolah kemudian di sajikan dalam bentuk tabel 4-5 yang kemudian di tambahkan nilai tegangan bending , kekakuan bending , dan kekakuan bending spesifik dari pengujian secara langsung sebagai perbandingan. Seperti yang dapat dilihat dari tabel 4-5 hasil dari analisis finite element memiliki nilai tegangan bending , kekakuan bending , dan kekakuan bending spesifik yang jauh dari hasil uji langsung. Untuk mendapatkan nilai *finite element* yang mendekati dari nilai dari uji langsung maka perlu dilakukan koreksi. Koreksi yang dilakukan adalah dengan mengalikan nilai koreksi dengan hasil dari *finite element*. Nilai koreksi merupakan rata-rata persentase selisih yang terdapat antara pengujian langsung dengan hasil analisis *finite element*. Rata-rata persentase selisih hasil pengujian langsung dan hasil analisis *finite element* dapat dilihat di tabel 4-6, 4-7, 4-8 di bawah ini.

Tabel 4- 6 Data Presentase Selisisih nilai Tegangan Bending

Kode Spesimen	Tegangan Bending (MPa)		
	Uji Langsung	FE	Persentase selisih (%)
NonLayer_1	18,40	24,90	73,90
NonLayer_2	17,77	25,00	71,08
NonLayer_3	18,65	25,80	72,29
1Layer_1	20,63	28,00	73,68
1Layer_2	20,71	27,40	75,58
1Layer_3	19,18	26,80	71,57
2Layer_1	20,39	30,50	66,85
2Layer_2	20,47	30,50	67,11
2Layer_3	21,59	32,90	65,62
3Layer_1	20,63	25.30	81,54
3Layer_2	19,09	27,70	68,92
3Layer_3	19,13	26,20	73,02
RATA-RATA			71,76

Tabel 4- 7 Data Presentase Selisisih nilai Kekakuan Bending

Kode Spesimen	Kekakuan Bending ($N.mm^2$)		
	Uji Langsung	FE	Persentase Selisih (%)
NonLayer_1	16.662.306	53.072.531	31,40
NonLayer_2	18.535.508	52.928.390	35,02
NonLayer_3	17.817.207	52.864.240	33,70
1Layer_1	21.616.783	56.825.390	38,04
1Layer_2	20.227.133	56.825.390	35,60
1Layer_3	17.022.183	56.904.483	29,91
2Layer_1	24.150.983	58.488.095	41,29
2Layer_2	24.049.650	58.408.628	41,17
2Layer_3	24.234.651	57.433.843	42,20
3Layer_1	27.871.088	58.201.389	47,89
3Layer_2	23.440.997	58.436.244	40,11
3Layer_3	21.569.399	58.229.756	37,04
RATA-RATA			37,78

Tabel 4- 8 Data Presentase Selisisih nilai Kekakuan Bending Spesifik

Kode Spesimen	Kekakuan Bending Spesifik ($N.mm^2/gr$)		
	Uji Langsung	FE	Persentase selisih (%)
NonLayer_1	121.623	384.584	31,62
NonLayer_2	135.296	383.539	35,28
NonLayer_3	130.053	383.074	33,95
1Layer_1	152.231	394.621	38,58
1Layer_2	144.480	394.621	36,61
1Layer_3	121.587	395.170	30,77
2Layer_1	165.418	397.878	41,58
2Layer_2	164.724	397.338	41,46
2Layer_3	165.991	390.706	42,48
3Layer_1	187.054	388.009	48,21
3Layer_2	157.322	389.575	40,38
3Layer_3	144.761	388.198	37,29
RATA-RATA			38,18

4.4.4 Perbandingan Hasil Pengujian Langsung dan Finite Element

Untuk mendapatkan hasil akhir dari analisis finite element perlu dilakukan koreksi, yang mana dalam hal ini adalah mengalikan nilai koreksi dengan hasil *finite element*. Nilai koreksi di dapat dari rata-rata selisih yang terdapat antara pengujian langsung dengan hasil dari analisis *finite element.* Setelah melakukan perhitungan tersebut maka di dapatkan hasil akhir dari analisis *finite element* yang kemudian di bandingkan dengan hasil dari pengujian langsung.

1. Tegangan Bending

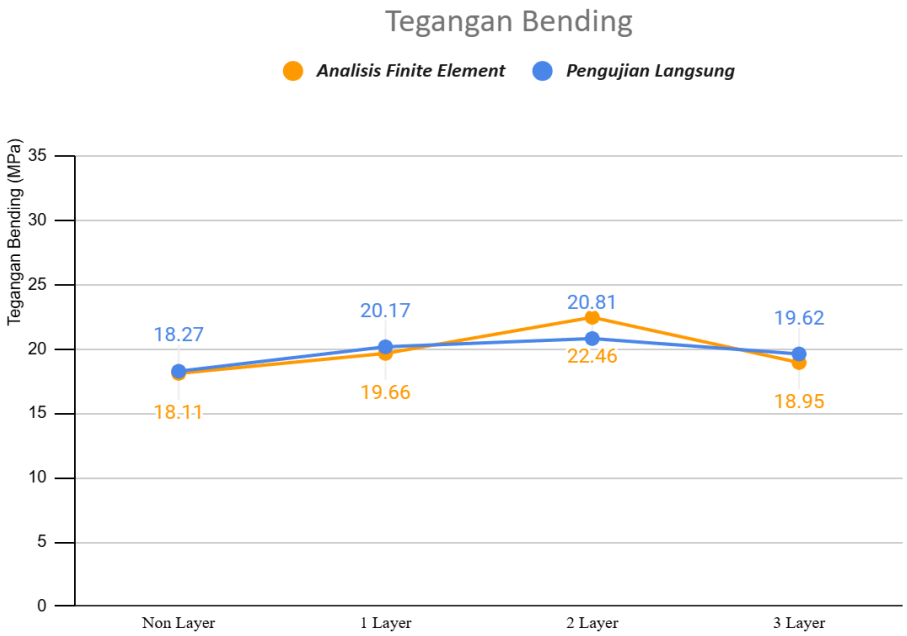
Setelah melakukan koreksi pada hasil analisis *finite element* untuk nilai tegangan bending, maka didapatkan data dari hasil akhir *finite element* untuk nilai tegangan bending, yang kemudian di bandingkan dengan nilai tegangan bending dari penguujian secara langsung. Seperti yang dapat dilihat dari tabel 4-9 dimana nilai tegangan bending yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) memiliki selisih yang terpaut kecil. Dapat dilihat bahwa spesimen yang memiliki nilai tegangan bending paling besar dimiliki oleh spesimen dengan 2 layer *skin carbon fibre,* dimana untuk nilai tegangan bending yang di dapat dari hasil pengujian

secara langsung adalah 20,81 Mpa sedangkan nilai dari tegangan bending yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) adalah 22,46 Mpa.

Tabel 4- 9 Data perbandingan Tegangan Bending

Kode Spesimen	Tegangan Bending (MPa)			
	Uji Langsung	Rata-Rata	FE (Akhir)	Rata-Rata
NonLayer_1	18,40	18,27	17.87	18,11
NonLayer_2	17,77		17.94	
NonLayer_3	18,65		18.51	
1Layer_1	20,63	20,17	20.09	19,66
1Layer_2	20,71		19.66	
1Layer_3	19,18		19.23	
2Layer_1	20,39	20,81	21.89	22,46
2Layer_2	20,47		21.89	
2Layer_3	21,59		23.61	
3Layer_1	20,63	19,62	18.16	18,95
3Layer_2	19,09		19.88	
3Layer_3	19,13		18.80	

Data dari perbandingan nilai tegangan bending antara hasil uji langsung dengan hasil *finite element* (akhir) , kemudian dibuat menjadi grafik yang dapat dilihat seperti pada gambar 4-21. Seperti yang dilihat pada grafik nilai tegangan bending yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) mengalami kenaikan seiring pada *layer skin carbon fibre* yang di tambahkan, namun terjadi penurunan pada nilai tegangan bending untuk spesimen dengan tiga *layer skin carbon fibre*. Hal ini sejalan dengan grafik yang ditunjukan pada nilai tegangan bending yang di dapat dari hasil uji langsung, dimana nilai tegangan bending pada spesimen mengalami peningkatan seiring pada *layer skin carbon fibre* yang ditambahkan, namun mengalami penurunan pada nilai tegangan bending untuk spesimen dengan tiga *layer skin carbon fibre*.



Gambar 4- 22 Grafik perbandingan tegangan bending

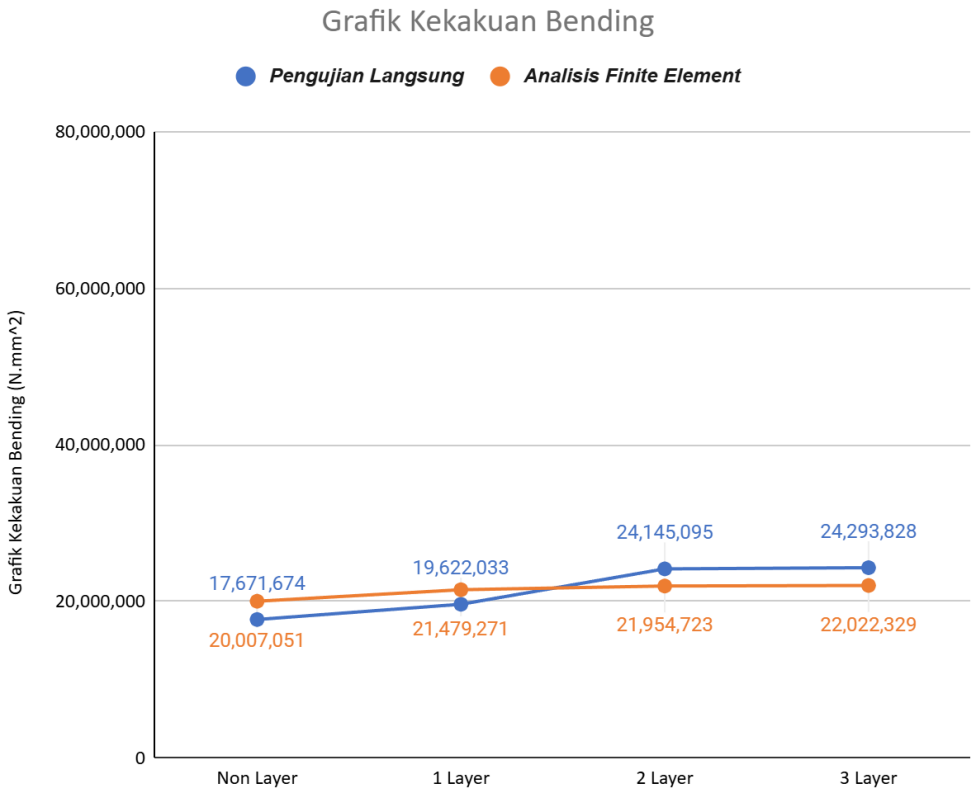
2. Kekakuan Bending

Setelah melakukan koreksi pada hasil analisis *finite element* untuk nilai kekakuan bending, maka didapatkan data dari hasil akhir *finite element* untuk nilai kekakuan bending, yang kemudian di bandingkan dengan nilai kekakuan bending dari penguujian secara langsung. Seperti yang dapat dilihat dari tabel 4-10 dimana nilai kekakuan bending yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) memiliki selisih yang terpaut kecil. Dapat dilihat bahwa spesimen yang memiliki nilai kekakuan bending paling besar dimiliki oleh spesimen dengan 3 layer *skin carbon fibre*, dimana untuk nilai kekakuan bending yang di dapat dari hasil pengujian secara langsung adalah 24.293.828 N.mm^{2}sedangkan nilai dari kekakuan bending yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) adalah 22.022.329 N.mm^2.

Tabel 4- 10 Data perbandingan Kekakuan Bending

Kode Spesimen	Kekakuan Bending (N.mm^2)			
	Uji Langsung	Rata-Rata	FE (Akhir)	Rata-Rata
NonLayer_1	16.662.306	17.671.674	20.051.435	20.007.051
NonLayer_2	18.535.508		19.996.977	
NonLayer_3	17.817.207		19.972.741	
1Layer_1	21.616.783	19.622.033	21.469.310	21.479.271
1Layer_2	20.227.133		21.469.310	
1Layer_3	17.022.183		21.499.193	
2Layer_1	24.150.983	24.145.095	22.097.500	21.954.723
2Layer_2	24.049.650		22.067.477	
2Layer_3	24.234.651		21.699.191	
3Layer_1	27.871.088	24.293.828	21.989.179	22.022.329
3Layer_2	23.440.997		22.077.910	
3Layer_3	21.569.399		21.999.897	

Data dari perbandingan nilai kekakuan bending antara hasil uji langsung dengan hasil *finite element* (akhir) , kemudian dibuat menjadi grafik yang dapat dilihat seperti pada gambar 4-22. Seperti yang dilihat pada grafik nilai kekakuan bending yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) mengalami kenaikan seiring pada *layer skin carbon fibre* yang di tambahkan. Hal ini sejalan dengan grafik yang ditunjukan pada nilai kekakuan bending yang di dapat dari hasil uji langsung, dimana nilai kekakuan bending pada spesimen mengalami peningkatan seiring pada *layer skin carbon fibre* yang ditambahkan.



Gambar 4- 23 Grafik perbandingan kekakuan bending

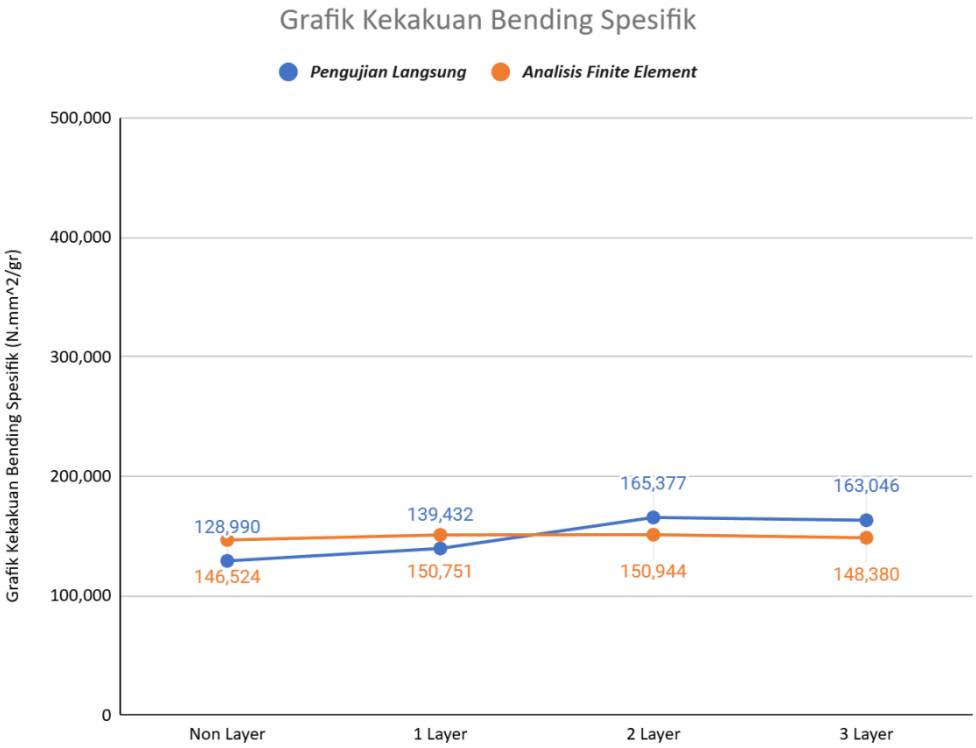
3. Kekakuan Bending Spesifik

Setelah melakukan koreksi pada hasil analisis *finite element* untuk nilai kekakuan bending spesifik, maka didapatkan data dari hasil akhir *finite element* untuk nilai kekakuan bending spesifik, yang kemudian di bandingkan dengan nilai kekakuan bending spesifik dari penguujian secara langsung. Seperti yang dapat dilihat dari tabel 4-11 dimana nilai kekakuan bending spesifik yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) memiliki selisih yang terpaut kecil. Dapat dilihat bahwa spesimen yang memiliki nilai kekakuan bending spesifik paling besar dimiliki oleh spesimen dengan 2 layer *skin carbon fibre*, dimana untuk nilai kekakuan bending spesifik yang di dapat dari hasil pengujian secara langsung adalah 165.377 $N.mm^2/gr$ sedangkan nilai dari kekakuan bending spesifik yang di dapat dari analisis finite element (akhir) adalah 150.994 $N.mm^2/gr$.

Tabel 4- 11 Data perbandingan Kekakuan Bending Spesifik

Kode Spesimen	Kekakuan Bending Spesifik (N.mm^2/gr)			
	Uji Langsung	Rata-Rata	FE (Akhir)	Rata-Rata
NonLayer_1	121.623	128.990	146.849	146.524
NonLayer_2	135.296		146.450	
NonLayer_3	130.053		146.272	
1Layer_1	152.231	139.432	150.681	150.751
1Layer_2	144.480		150.681	
1Layer_3	121.587		150.891	
2Layer_1	165.418	165.377	151.925	150.994
2Layer_2	164.724		151.719	
2Layer_3	165.991		149.187	
3Layer_1	187.054	163.046	148.157	148.380
3Layer_2	157.322		148.755	
3Layer_3	144.761		148.229	

Data dari perbandingan nilai kekakuan bending spesifik antara hasil uji langsung dengan hasil *finite element* (akhir) , kemudian dibuat menjadi grafik yang dapat dilihat seperti pada gambar 4-23. Seperti yang dilihat pada grafik nilai kekakuan bending spesifik yang di dapat dari analisis *finite element* (akhir) mengalami kenaikan seiring pada *layer skin carbon fibre* yang di tambahkan, namun terjadi penurunan pada nilai kekakuan bending spesifik untuk spesimen dengan tiga *layer skin carbon fibre*. Hal ini sejalan dengan grafik yang ditunjukan pada nilai kekakuan bending spesifik yang di dapat dari hasil uji langsung, dimana nilai kekakuan bending spesifik pada spesimen mengalami peningkatan seiring pada *layer skin carbon fibre* yang ditambahkan, namun mengalami penurunan pada nilai kekakuan bending spesifik untuk spesimen dengan tiga *layer skin carbon fibre*.



Gambar 4- 24 Grafik perbandingan kekakuan bending spesifik

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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 *layer skin carbon* fiber. Namun Penurunan terjadi pada pemberian 3 lapisan serat karbon untuk nilai tegangan bending dan kekakuan bending spesifik hal ini disebabkan karena pemberian *skin* hanya pada 1 permukaan tidak menambah kekuatan terhadap tegangan tarik.
2. Nilai kekakuan bending tertinggi terdapat pada spesimen dengan 3 layer *skin* serat karbon sebesar 24,293,828 Nmm2. Nilai kekakuan bending spesifik tertinggi terdapat pada spesimen dengan 2 *layer skin* serat karbon sebesar 165,377 Nmm2/gr
3. Berdasarkan perbandingan hasil dari pengujian secara langsung dengan uji analisis *finite element* ditemukan bahwa terdapat selisih yang kecil pada nilai tegangan bending , kekakuan bending , dan kekakuan bending spesifik. Selisih tersebut muncul karena adanya perbedaan sifat material yang ada pada spesimen di *software* dengan spesimen asli. Material spesimen yang terdapat pada *software* cenderung bersifat solid yang mana hal ini tidak sama dengan material asli . Kemudian kesalahan pada saat pengujian langsung juga dapat menjadi salah satu faktor selisih yang terjadi , kesalahan yang dimaksud adalah kesalahan penguji dalam meletakan spesimen uji.
4. Spesifikasi material yang digunakan pada analisis *finite element* di solidworks ini merupakan sepesifikasi material yang nilainya paling mendekati dari material yang digunakan dari pengujian secara langsung, hal ini dapat dilihat dengan pola trend grafik yang berbanding lurus antara tegangan bending , kekakuan bending dan kekakuan bending spesifik dari

spesimen yang telah diuji secara langsung dan diuji dengan menggunakan metode *finite element* analisis.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

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

1. Perlunya mencari spesifikasi material yang tepat sebelum akan melakukan analisis FEA
2. Perlunya menggunakan software yang memang diperuntukan untuk melakukan analisis FEA

DAFTAR PUSTAKA

Aprillio, Y. (2022). Pengaruh Diameter Honeycomb Ribs Pada Produk Acrylonitrile Butadiene Styrene (Abs) 3d Printing Fused Filament Fabrication (Fff) Yang Diperkuat Komposit Carbon Fiber. https://dspace.uii.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.

Jayadi Muhamad., Afandi Sahril., Suprianto Agus., Nurhadi Pramana., Yuniarti Endah. (2021). Analisis numerik part spar pada sub sytem wing to fuselage joinner assembly pesawat berkategori utility menggunakan metode elemen hingga. Jurnal Teknologi Kerdigantaraan Vol. 6 No.1

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 architectured sandwich panels for multifunctional propertis. *Saint-martin-d'heres, prancis : thesis Universitas de Grenoble.*

Mulyadi Santoso (2011) Analisa tegangan-regangan produk tongkat lansia dengan menggunakan metode elemen hingga. Jurnal ROTOR, Volume 4 Nomor 1

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.

Prayoga, D. A., Eryawanto., B., dan Hadi, Q. (2018). Pengaruh ketebalan skin terhadap kekuatan *bending* dan tarik komposit *sandwich* dengan *honeycomb polypropylane* 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 Teknika*, 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*.

Sigarlaki, H. H., Tangkuman. S., Arungpadang. T., (2015) Aplikasi metode elemen hingga pada perancangan poros belakang gokar listrik. Jurnal Online Poros Teknik Mesin Volume 4 Nomor 2

Sutisna. A. N., Hardianto. A., (2019) Finite element simulation of acceleration pedal on xx vehicle. Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics Vol. 4 No. 2 , pp. 45-60

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.

Waluyo. R., Ahmad. R. A., Pramono. E. G., Fahrulrizal (2020) Perancangan dan analisis kekuatan rangka cetakan komposit kayu-plastik menggunakan finite element analisys. Jurnal Teknologi Rekayasa. Vol. 5, No.1

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

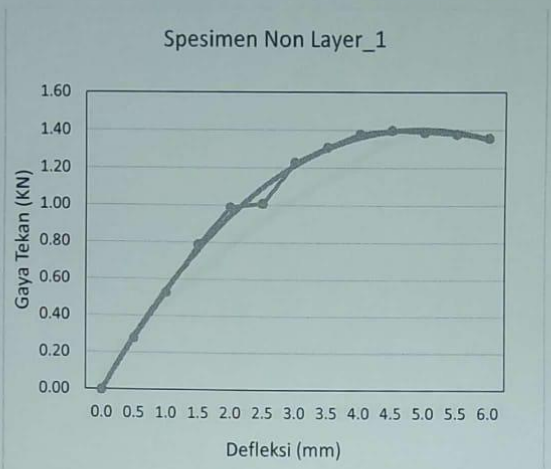
Yogyakarta, 8 Desember 2023
Staf Laboratorium Bahan Teknik

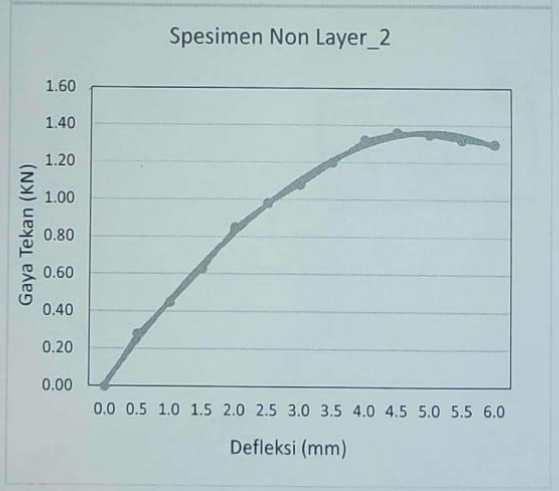
Pengujian & Analisa Material
Laboratorium Bahan Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM

Dr. Lilik Dwi Setyana, S.T., M.T
NIP. 19770331200212100 2

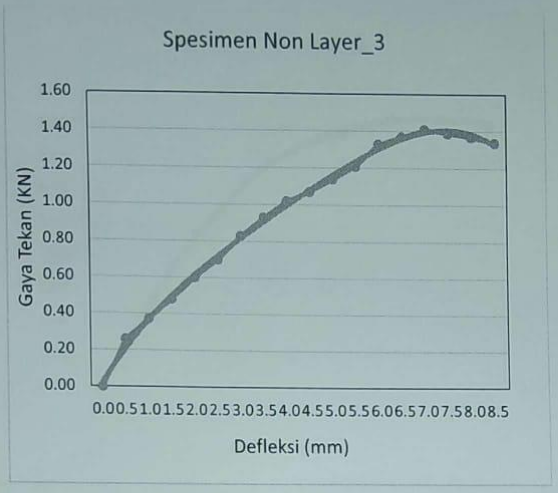
Kampus : Jl. Grafika 2A Yogyakarta 55281

Lembar asli, tidak untuk digandakan

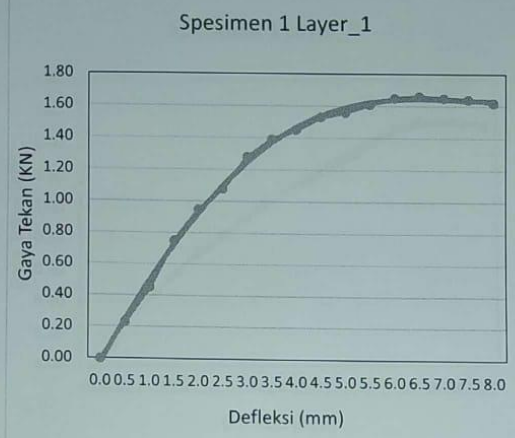

Spesimen Non Layer_1
Gaya Tekan (KN)
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0
Defleksi (mm)

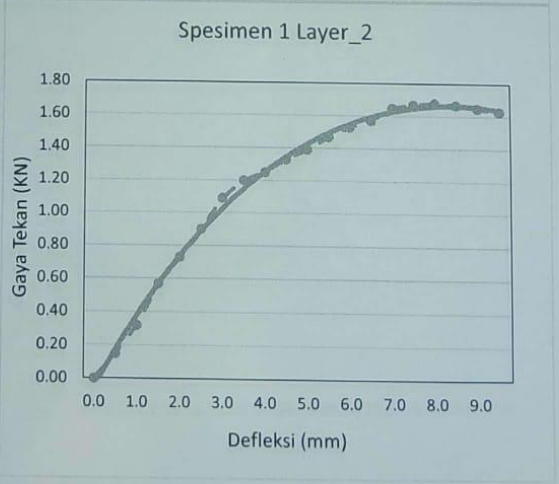

Spesimen Non Layer_2
Gaya Tekan (KN)
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0
Defleksi (mm)

Pengujian & Analisa
Material
Lab.
Teknik
Mesin
Vokasi UGM

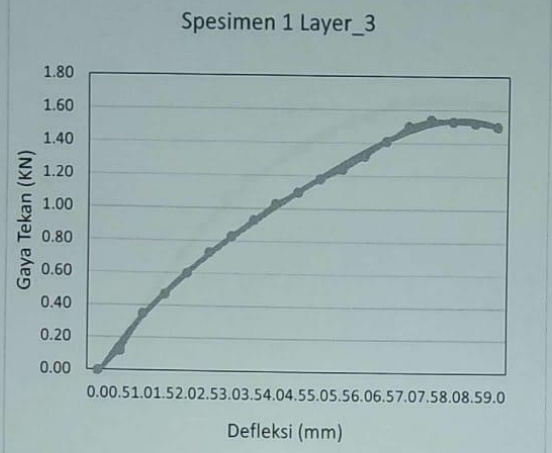


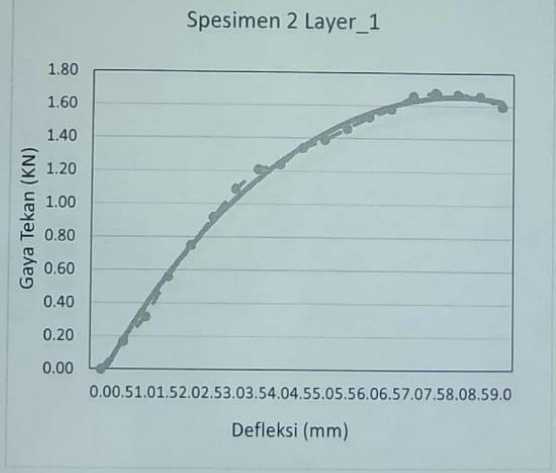
Pengujian & Analisa Material
Lab. Bahan Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM


Spesimen 1 Layer_1
Gaya Tekan (KN)
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0
Defleksi (mm)

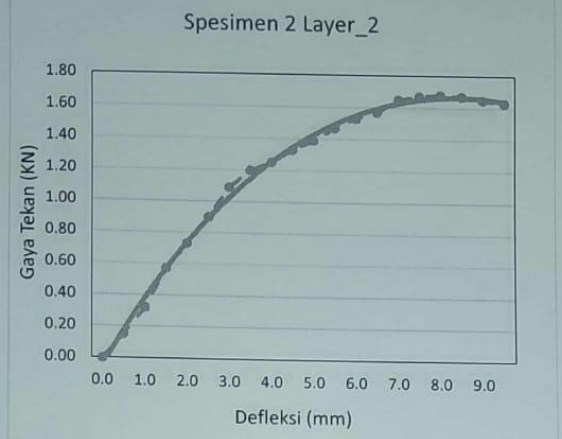

Spesimen 1 Layer_2
Gaya Tekan (KN)
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0
Defleksi (mm)

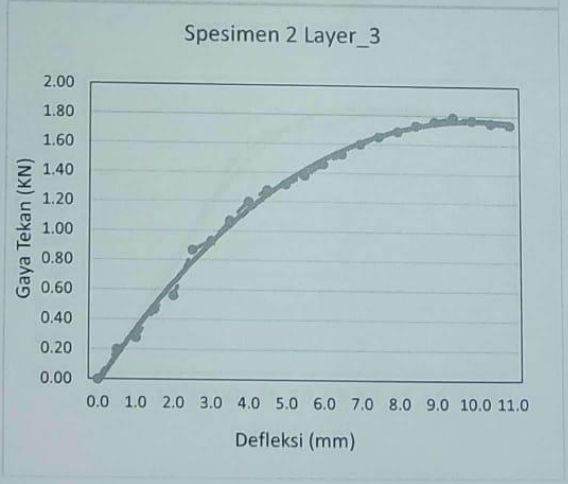
Pengujian & Analisa Material
Laboratorium Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM


Spesimen 1 Layer_3
Gaya Tekan (KN)
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.00.51.01.52.02.53.03.54.04.55.05.56.06.57.07.58.08.59.0
Defleksi (mm)

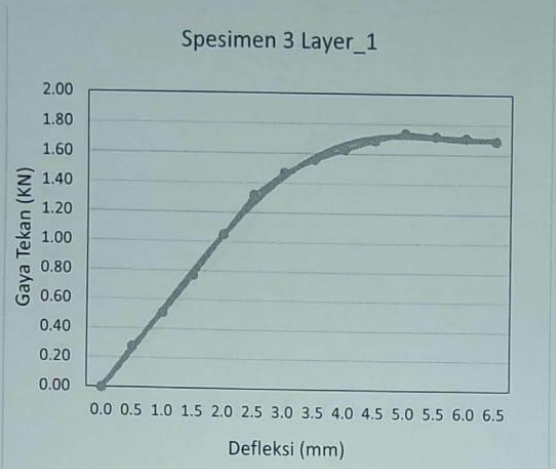

Spesimen 2 Layer_1
Gaya Tekan (KN)
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.00.51.01.52.02.53.03.54.04.55.05.56.06.57.07.58.08.59.0
Defleksi (mm)

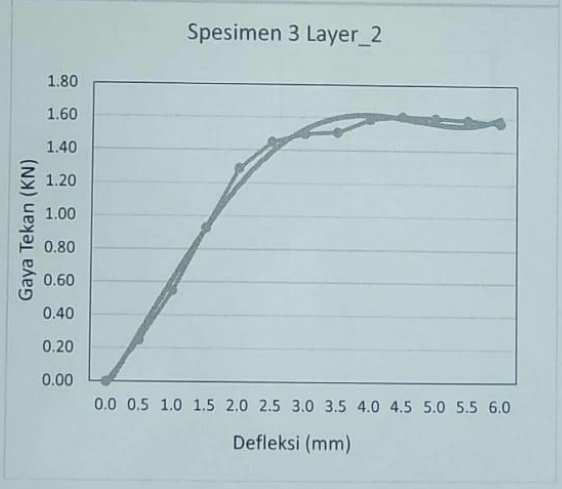
Pengujian & Analisa
Material
Lab. Bahan Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM


Spesimen 2 Layer_2
Gaya Tekan (KN)
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0
Defleksi (mm)

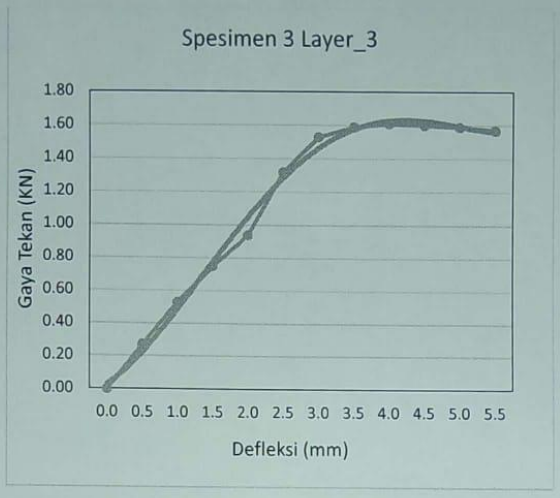

Spesimen 2 Layer_3
Gaya Tekan (KN)
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0 11.0
Defleksi (mm)

Pengujian & Analisa
Material
Lab. Bahan Teknik
Sekolah Vokasi UGM


Spesimen 3 Layer_1
Gaya Tekan (KN)
2.00
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5
Defleksi (mm)


Spesimen 3 Layer_2
Gaya Tekan (KN)
1.80
1.60
1.40
1.20
1.00
0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0
Defleksi (mm)

Pengujian & Analisa
Material
Sekolah Vokasi UGM



Pengujian & Analisa Material
Laboratorium Teknik
Departemen Teknik Mesin
Sekolah Vokasi UGM