BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara global, material komposit telah berkembang pesat karena kemampuannya menggabungkan dua atau lebih material dengan sifat berbeda sehingga menghasilkan karakteristik mekanik dan fungsional yang lebih unggul dibandingkan material tunggal. Dalam dua dekade terakhir, komposit polyester menjadi fokus utama karena, ringan, tahan korosi, dan mudah dibentuk. Tren terkini menunjukkan peningkatan penggunaan serat alam sebagai penguat dalam komposit polyester untuk menggantikan serat sintetis yang kurang ramah lingkungan. Serat alam seperti, sisal, jute, dan kenaf menarik perhatian karena ketersediaannya yang melimpah, sifat mekaniknya yang kompetitif, serta potensi biogradabilitasnya yang tinggi (Hamdi dkk., 2024).

Sejalan dengan tuntutan global terhadap material berkelanjutan, penelitian terhadap komposit polyester berbasis serat alam terus dikembangkan untuk meningkatkan sifat kimia, sifat fisis, dan sifat mekanis melalui optimasi perlakuan kimia serta pengaturan arah orientasi laminae.

Penggunaan material komposit berbasis serat alami dianggap lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan dengan komposit berbasis serat sintetis. Salah satu jenis serat alami yang memiliki potensi besar adalah serat sisal *(Agave sisalana)*. Serat ini dikenal memiliki kekuatan tarik yang cukup tinggi, tahan terhadap suhu sedang, serta mudah diperoleh di negara tropis seperti di Indonesia. Dengan demikian, pemanfaatan serat sisal sebagai bahan penguat dalam komposit

polimer dapat menjadi solusi alternatif dalam pengembangan material yang kuat sekaligus ramah lingkungan (Madueke dkk., 2023).

Secara alami, serat sisal tersusun atas komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berperan dalam membentuk kekuatan strukturalnya. Namun, lapisan permukaan serat yang masih mengandung senyawa non-selulosa tersebut dapat mengurangi keterikatan dengan matriks polimer. Oleh karena itu, diperlukan peroses perlakuan permukaan agar serat lebih mudah berikatan dengan resin saat proses pembuatan komposit. Salah satu metode yang efektif dan banyak digunakan adalah perlakuan alkali menggumakan larutan Natrium hidroksida (NaOH). Proses ini dapat meningkatkan kekasaran permukaan serat dan menghilangkan lapisan pengotor seperti pektin atau lilin, sehingga meningkatkan kemampuan adhesi antara serat dan matriks. Perlakuan alkali mampu meningkatkan kekuatan tarik komposit serat alami hingga 25-45% karena adanya peningkatan interaksi antarmuka (Yimer & Gebre, 2023).

Faktor penting lainnya yang memengaruhi hasil perlakuan adalah lama waktu perendaman serat dalam larutan NaOH. Waktu perendaman yang terlalu singkat menyebabkan pembersihan permukaan kurang optimal, sedangkan waktu yang terlalu lama dapat merusak struktur selulosa akibat reaksi kimia berlebih. (Murwamadala dkk., 2024a) Mengemukakan bahwa waktu perendaman optimal mampu menjaga keseimbangan antara kebersihan permukaan dan kekuatan serat, sedangkan waktu diatas 300 menit dapat menurunkan kekuatan hingga 18%.

Dari sisi mekanik, orientasi sudut atau laminae serat juga berperan besar terhadap kekuatan komposit, di mana orientasi serat sejajar arah pembebanan

(0°/0°/0°) akan menghasilkan nilai tegangan tarik tertinggi. Dengan adanya perlakuan alkali dan pengaturan arah orientasi, peningkatan antara serat dan matriks akan menjadi lebih kuat setelah permukaan serat dibersihkan oleh proses alkali (Suyuti dkk., 2025).

Pengamatan struktur makro setelah uji tarik menunjukkam bahwa setiap orientasi laminae, baik sejajar maupun miring, memiliki karakteristik kerusakan yang khas, seperti retak matriks, fiber pull-out, dan delaminasi. Orientasi serat miring, seperti 45° maupun kombinasi multiarah, dapat menghasilkan pola distribusi serat dan matriks yang berbeda dan memberi peluang terjadinya fenomena mekanis tertentu seperti fleksibilitas material atau karakteristik perpindahan tegangan yang unik. Variasi sudut laminae serta perlakuan permukaan serat melalui perendaman alkali berkontribusi dalam membentuk morfologi makro komposit yang adaptif, sehingga pemilihan orientasi dapat di sesuaikan dengan kebutuhan aplikasi dan target kinerja spesifik (Mohamed & Abdelbary, 2023)

Berdasarkan latar belakang di atas maka penelitian ini di beri judul **Studi Experimen Pengaruh Lama Perendaman Serat Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Makro Laminae Komposit**, untuk menganalisa pengaruh lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH terhadap kekuatan tarik dan struktur makro komposit berbasis resin polyester.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh lama perendaman serat sisal dalam larutan NaOH

terhadap kekuatan tarik komposit serat sisal?

2. Bagaimana pengaruh lama perendaman dan variasi orientasi laminae terhadap struktur makro komposit serat sisal?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui lama pengaruh perendaman serat sisal dalam larutan NaOH terhadap kekuatan tarik komposit serat sisal.
2. Untuk mengetahui pengaruh lama perendaman dan variasi orientasi laminae terhadap struktur makro komposit serat sisal.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, maka penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Tanaman sisal yang saya gunakan berasal dari Lembang Pengkaroan Manuk, Kecamatan Buntu Pepasan, Kabupaten Toraja Utara.
2. Penelitian ini menggunakan resin polyester dan katalis yang saya dapatkan dari online shop di toko kimia. id.
3. Serat disusun secara *continuous fiber composite.*
4. Menggunakan perendaman dalam larutan NaOH 5% per 1 liter air.
5. Lama perendaman serat sisal (1, 2, 3, 4, dan 5 jam).
6. Orientasi sudut laminae (0°, 60°, 90°, 120°, dan 0°).
7. Di cetak menggunakan metode Handlayup.
8. Penelitian ini hanya berfokus pada uji tarik dan pengamatan struktur makro.

9. Tidak memperhitungkan reaksi kimia yang terjadi selama proses pembentukan spesimen.

1.5 Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, yaitu:

1. Bagi Peneliti Serupa

   Sebagai referensi ilmiah dalam pengembangan penelitian lanjutan tentang pengaruh perlakuan kimia dan orientasi laminae terhadap sifat mekanik komposit berbasis serat alam.

2. Bagi Masyarakat

   Memberikan pengetahuan tentang potensi pemanfaatan serat alam lokal seperti sisal sebagai bahan ramah lingkungan pengganti material sintetis.

3. Bagi Industri

   Menyediakan dasar ilmiah bagi peningkatan kualitas dan efisiensi produksi material komposit serat alam yang dapat diterapkan pada sektor otomotif, kontruksi, dan manufaktur ringan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material

Material adalah segala sesuatu yang digunakan untuk membuat suatu benda atau objek, seperti kayu, logam, kain, batu, atau plastik. Material dapat berupa bahan mentah yang belum diproses atau bahan yang sudah mengalami pengolahan. Mereka memiliki sifat fisika dan kimia yang berbeda-beda sehingga berperilaku secara unik, dan diklasifikasikan berdasarkan sumbernya (alami atau buatan) atau komposisinya (logam, non-logam, komposit).

Material teknik dapat didefinisikan sebagai substansi yang digunakan untuk menghasilkan struktur atau komponen teknik, dan karakteristik mekanik, termal, listrik, atau kimianya sangat menentukan performa dan keandalan dari produk tersebut. Sebagai bidang ilmu, pengkajian tentang material mencakup hubungan antara struktur mikro, proses fabrikasi, dan kegunaannya dalam aplikasi nyata (Findik, 2025). Material teknik secara umum dibagi menjadi tiga kelompok utama, yaitu material logam, non-logam dan Komposit. Masing-masing memiliki karakteristik dan aplikasi yang berbeda sesuai dengan kebutuhan teknik.

2.1.1 Logam

Logam adalah material dengan ikatan logam dan struktur kristal yang memungkinkan deformasi plastis seblum patah. Logam umumnya memiliki konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, kekuatan yang baik dan keuletan tinggi. Contoh aplikasi logam adalah aluminium, baja, dan titanium, yang sering digunakan pada kerangka kendaraan dan komponen mesin. Penelitian (Pooja dkk.,

2025) menyebutkan bahwa logam matriks komposit *(metal matrix compositer/ MMC)* berkembang sebagai material revolusioner untuk aplikasi struktural tinggi.

2.1.2 Non-Logam

Secara umum, pengelompokan material non-logam dapat dibedakan berdasarkan struktur dan komposisinya menjadi beberapa kategori utama, yaitu :

1. Keramik

   Keramik adalah material anorganik, non-logam, yang biasanya dihasilkan melalui proses sintering dan memiliki structural, Kristal atau amorf. Keramik unggul dalam hal kekerasan, ketahanan suhu tinggi, dan korosi, namun cenderus getas karena keterbatasan deformasi plastic. Sebagai contoh, alumina dan silikon karbida sering digunakan pada aplikasi suhu ekstrim. Artikel klasifikasi material mencatat keramik sebagai salah satu contoh kategori utama material teknik karena sifat suhu tinggi dan ketahanan ausnya (Findik, 2025).

2. Polimer

   Polimer adalah material organik dengan rantai molekuler panjang dan sering memiliki densitas rendah, sifat isolasi Listrik, dan kemampuan dibentuk ulang (terutama pada termoplastik). Polimer dan komposit polimer telash berkembang pesat dalam berbagai aplikasi ringan seperti otomotif dan aerospace. Sebagai contoh, penelitian oleh (Wu dkk., 2023) membahas teknologi fabrikasi komposit polimer dan menunjukkan kemajuan signifikan dalam proses pembuatan dan aplikasi structural.

3. Kaca

   Kaca adalah padatan amorf anorganik berbasis silika yang dibentuk dari

pendinginan lelehan tanpa kristalisasi, dengan sifat utama transparansi optik tinggi, ketahanan korosi, isolasi listrik, namun getas secara mekanik. Komposisi umum kaca soda–lime meliputi SiO_2 sebagai glass former, Na_2O/K_2O sebagai modifier untuk menurunkan titik lebur, dan CaO untuk meningkatkan ketahanan kimia serta stabilitas, sedangkan penyesuaian komposisi mengendalikan viskositas, titik pelunakan, dan performa optic (Ridha Alhamdani, 2014).

2.1.3 Sifat Material

Sifat material adalah karakteristik atau perilaku suatu material ketika terkena berbagai kondisi lingkungan maupun gaya eksternal, baik berupa beban mekanik, pengaruh panas, reaksi kimia, maupun proses fabrikasi tertentu. Sifat ini merupakan sifat intensif, yaitu tidak bergantung pada banyaknya material, melainkan dari komposisi dan struktur internalnya. Sifat material terbagi menjadi beberapa bagian, yaitu :

1. Sifat Fisis

Sifat fisis adalah karakteristik suatu material yang dapat diukur atau diamati tanpa mengubah komposisi kimia atau identitas material identitas material tersebut, seperti densitas, porositas, warna, konduktivitas termal serta kemampuan material untuk menyerap air. Karakter fisis dari komposit, misalnya, sangat dipengaruhi oleh homogenitas bahan penyusunnya dan gaya adhesif antar komponen, yang secara langsung berdampak pada distribusi massa jenis, porositas, dan tingkat penyerapan air (Regita dkk., 2024)

2. Sifat Mekanis

Sifat mekanis menunjukkan bagaimana suatu material merespon gaya-gaya mekanik atau beban yang diterapkan. Karakter mekanis sangat dipengaruhi oleh struktur mikro, komposisi kimaa, dan proses fabrikasi termasuk perlakuan panas dan pengerolan (Shalwan dkk., 2022). Dengan demikian, dalam aplikasi teknik struktur maupun komponen mesin, sifat mekanis menjadi dasar dalam perancangan dan pemilihan bahan agar dapat menahan beban tanpa kegagalan.

3. Sifat Kimia

Sifat kimia membahas bagaimana material bereaksi dengan lingkungan atau zat lain, termasuk ketahanan terhadap korosi, oksidasi, dan perubahan struktur mokuler. Komposisi kimia sangat menentukan perilaku dan kegunaan material, misalnya, pada komposit maupun logam, perbedaan susunan atom dapat menghasilkan sifat konduktivitas dan kekerasan yang berbeda, seperti yang tampak pada grafit dan intan, serta dapat diidentifikasikan melalui analisis struktur mikro dan komposisi kimia secara mendalam (Mawarsih & Pramono, 2019).

4. Sifat Teknologi

Sifat teknologi merupakan kemampuan material untuk diproses melalui metode produksi tertentu, seperti pengecoran, pengelasan, pemesinan, atau penempaan tanpa mengalami kerusakan atau cacat. Kategori sifat teknologi ini sangat berperan dalam penentuan efisiensi dan kemudahan fabrikasi produk teknik, karena material tang memiliki sifat mampu mesin, mampu las, dan mampu bentuk yang baik dapat diproses lebih efektif dan menghasilkan bentuk serta dimensi yang presisi sesuai spesifikasi desain (Shalwan dkk., 2022).

2.2 Komposit

Komposit merupakan gabungan dua atau lebih material yang memiliki sifat fisik dan kimia berbeda untuk menghasilkan material baru dengan karakteristik lebih unggul. Komposit tersusun atas dua komponen utama, yaitu matriks dan penguat (reinforcement). Matriks berfungsi sebagai pengikat dan penyalur beban, sedangkan penguat memberikan peningkatan kekuatan dan kekakuan struktural (Nesimnasi dkk., 2015).

Menurut (Fahmi & Hermansyah, 2011)material komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih material penyusun yang memiliki perbedaan sifat mekanik, sehingga menghasilkan material baru dengan karakteristik mekanik yang lebih unggul dibandingkan masing-masing material asalnya. Komposit berbasis serat umumnya memiliki kekuatan mekanik tinggi dan massa yang ringan, sehingga sering digunakansebagai alternatif pengganti bahan logam. Komposit dapat dibedakan menjadi dua yaitu komposit berdasarkan matriksnya dan komposit berdasarkan penguatnya.

2.2.1 Klasifikasi Komposit Berdarsakan Matriks

Secara umum komposit berdasarkan jenis matriksnya dibedakan menjadi 3 yaitu, Komposit Matriks Polimer (PMC), Komposit Matriks Logam (MMC), dan Komposit Matriks Keramik (CMC). Setiap jenis ini memiliki keunggulan dan karakteristik yang berbeda, tergantung pada material matriks yang digunakan untuk mengikat penguatnya.

1. Polymer Matrix Composite (PMC)

Komposit berbasis polimer (Polymer Matrix Composites/ PMC) merupakan

jenis material komposit yang menggunakan resin polimer sebagai fase matriks utama, sedangkan penguatnya berupa serat, partikel, atau bahan pengisi lainnya. Penggabungan antara matriks polimer dan bahan penguat ini menghasilkan material dengan sifat mekanik, termal, dan kelistrikan yang lebih baik. PMC mengombinasikan keunggulan polimer seperti fleksibilitas, kemudahan proses, dan biaya rendah, dengan kekuatan, kekakuan, dan daya tahan dari material penguatnya. Matriks yang umum digunakan antara lain epoxy, polyester, dan vinil ester (jenis termoset), serta polipropilena dan poliamida (jenis termoplastik). Aplikasi PMC banyak dijumpai pada sektor aerospace, otomotif, olahraga, dan konstruksi, karena sifatnya yang ringan, mudah dibentuk, dan tahan korosi. Namun, keterbatasannya terletak pada daya tahan terhadap suhu tinggi dan kerentanan terhadap sinar UV (Tanriverdiyev Yusif Alovsat, 2024).

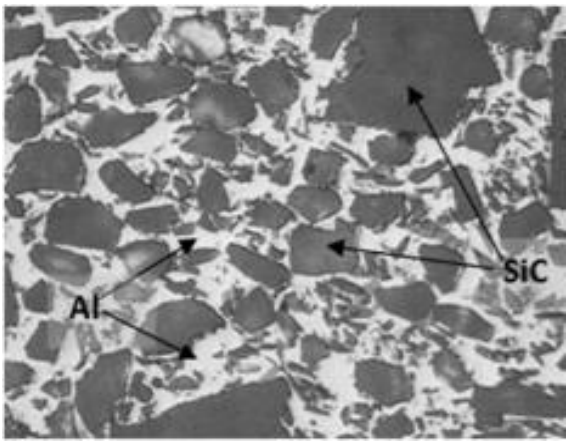


Gambar 2. 1 Polymer Matrix Composite
Sumber : (Tanriverdiyev Yusif Alovsat, 2024)

2. Metal Matrix Composite (MMC)

Metal Matrix Composites (MMC) adalah material komposit canggih yang menggunakan logam atau paduan logam sebagai matriks, serta diperkuat dengan

serat atau partikel keramik seperti SiC, Al_2O_3, atau B_4C. Kombinasi ini menghasilkan material dengan kekuatan, kekakuan, dan ketahanan aus yang jauh lebih baik dibanding logam konvensional. Logam ringan seperti aluminium, magnesium, dan titanium sering digunakan sebagai matriks karena memiliki densitas rendah dan sifat mekanik baik. MMC juga menunjukkan konduktivitas termal dan listrik tinggi, tahan terhadap radiasi, serta tahan api. Namun, MMC memiliki kekurangan pada biaya produksi yang tinggi dan proses manufaktur yang kompleks. Material ini banyak dimanfaatkan di industri otomotif, pertahanan, dan kedirgantaraan, di mana rasio kekuatan terhadap berat menjadi faktor penting (Tanriverdiyev Yusif Alovsat, 2024).



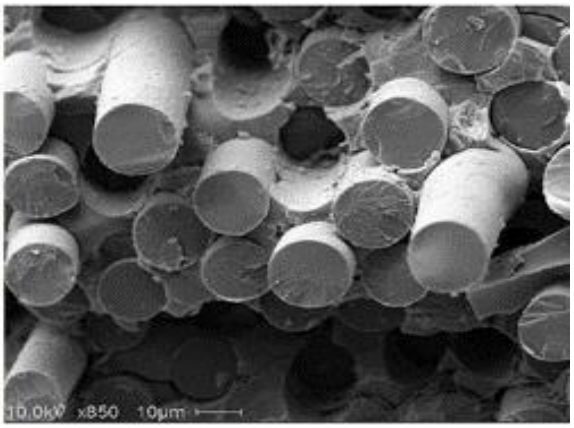
Gambar 2. 2 Metal Matrix Composite

Sumber : (Tanriverdiyev Yusif Alovsat, 2024)

3. Polymer Matrix Composite (CMC)

Ceramic Matrix Composites (CMC) adalah material komposit dengan matriks berbasis keramik, seperti SiC, Al_2O_3, ZrO_2, atau Si_3N_4, yang diperkuat dengan serat atau partikel keramik maupun karbon. Tujuan utama pembuatan CMC adalah untuk mengurangi kerapuhan alami keramik monolitik, sekaligus meningkatkan ketangguhan, ketahanan aus, dan ketahanan terhadap kejut termal.

CMC memiliki daya tahan suhu tinggi, stabil terhadap oksidasi, serta ringan, menjadikannya cocok untuk aplikasi ekstrem seperti bilah turbin gas, perisai panas pesawat luar angkasa, sistem rem, dan reaktor nuklir. Meski begitu, material ini memiliki kendala berupa biaya produksi tinggi dan teknik fabrikasi yang rumit seperti *chemical vapor infiltration (CVI)* atau *liquid silicon infiltration (LSI)*. Namun, dengan kemajuan teknologi manufaktur, CMC semakin banyak digunakan dalam industri aerospace, pertahanan, dan energi, terutama untuk komponen yang bekerja di lingkungan bersuhu sangat tinggi (Tanriverdiyev Yusif Alovsat, 2024).



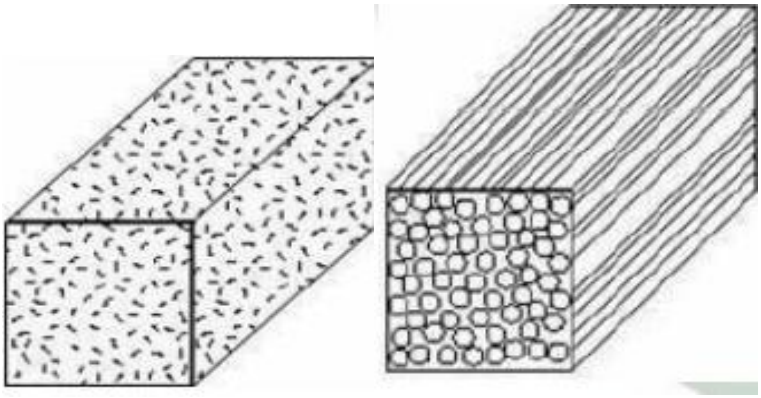
Gambar 2. 3 *Ceramic Matrix Composite*
Sumber : (Tanriverdiyev Yusif Alovsat, 2024)

2.2.3 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Penguat

Secara umum komposit berdasarkan penguatnya dibedakan menjadi 4, yaitu:

1. Komposit Serat (Fiber composite)

Komposit serat (*fiber composite*) adalah jenis material komposit yang menggunakan serat sebagai elemen penguat utama. Dalam proses pembuatannya, serat dapat disusun searah atau sejajar (*unidirectional composite*), maupun dipotong menjadi bagian-bagian kecil yang kemudian ditempatkan secara acak (*random fiber composite*).



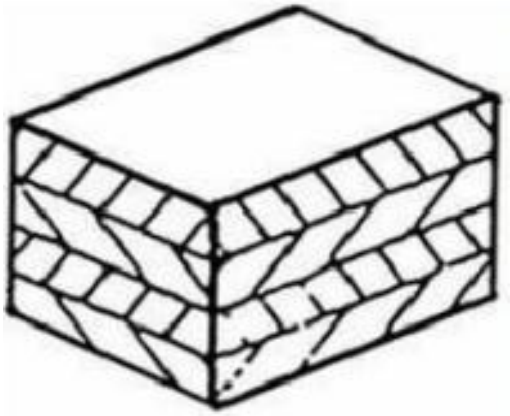
b. *Random fiber composite* *b. Unidirectional fiber composite*

Gambar 2. 4 a. Serat Acak b. Serat diatur Memanjang

Sumber : (Lumintang, 2019)

2. Komposit Laminar (Laminar Composite)

Komposit laminar (*laminar composite*) merupakan jenis komposit yang tersusun atas dua atau lebih lapisan (*layer*), di mana setiap lapisan dapat memiliki perbedaan dalam jenis material, bentuk, maupun arah penguat yang digunakan.

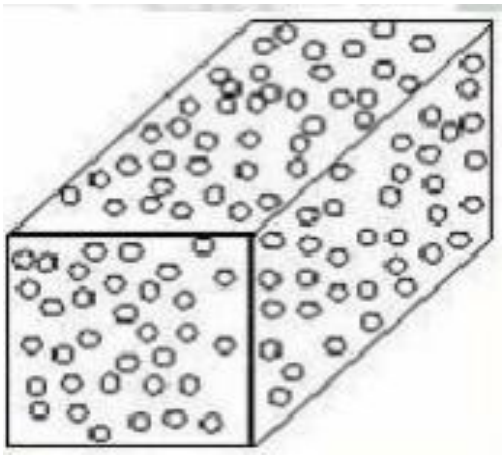


Gambar 2. 5 Komposit Laminar

Sumber : (Lumintang, 2019)

3. Komposit Serpih (Flake Composite)

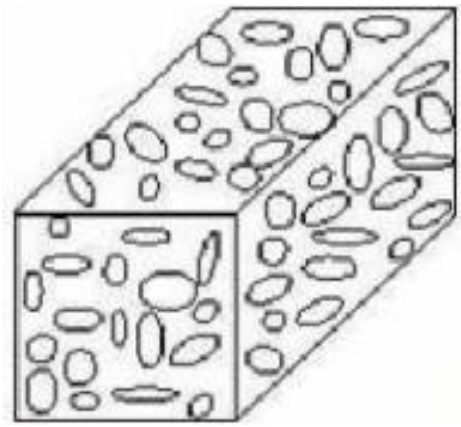
Komposit serpih (*flake composite*) merupakan jenis komposit yang dibuat dengan menambahkan material berbentuk serpihan ke dalam matriksnya. Serpihan (*flake*) yang digunakan dapat berupa potongan mika atau logam.



Gambar 2. 6 Komposit Partikel
Sumber : (Lumintang, 2019)

4. Filled (Skeletal) Composites

Filled (skeletal) composites merupakan jenis komposit yang dibuat dengan menambahkan material pengisi ke dalam matriks yang memiliki struktur tiga dimensi.



Gambar 2. 7 *Filled (skeletal) composites*
Sumber : (Lumintang, 2019)

2.3 Serat

Serat merupakan material berbentuk filamen panjang ysng memiliki rasio panjang terhadap diameter *(aspect ratio)* tinggi, serta digunakan secara luas sebagai bahan penguat *(reinforcement)* dalam pembuatan material komposit. Secara umum,

serat berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tarik, kekakuan, dan ketahanan aus suatu material matriks, sehingga kombinasi antara serat dan matriks dapat menghasilkan material dengan sifat mekanik yang jauh lebih unggul disbanding material Tunggal. Dalam konteks rekayasa material modern, serat tidak hanya berfungsi secara struktural, tetapi juga memiliki peran fungsional seperti konduktivitas, penyerapan energi, dan ketahanan terhadap degradasi termal maupun kimia (Sharma dkk., 2023). Berdasarkan asal dan sifatnya, serat dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu serat sintetis dan serat alami.

2.3.1 Serat Alam *(Natural Fiber)*

Serat alam merupakan material penguat yang diperoleh dari sumber daya hayati seperti hewan dan tumbuhan. Serat ini banyak digunakan sebagai pengganti serat sintetis karena memiliki keunggulan dari segi keberlanjutan dan ramah lingkungan. Secara umum, serat alam tersusun dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin, di mana selulosa berperan penting dalam memberikan kekuatan mekanik, sedangkan lignin dan hemiselulosa memberikan kekauan serta stabilitas structural (Siagian dkk., 2024).

Di antara berbagai jenis serat alam, serat tumbuhan merupakan yang paling umum digunakan dalam indusrti komposit karena karakteristik mekaniknya yang baik dan kemudahan pengolahannya. Serat tumbuhan dapat diperoleh dari berbagai bagian tanaman seperti batang (misalnya rami, kenaf, jute), daun (misalnya sisal dan nenas), maupun buah (misalnya sabut kelapa). Masing-masing serat memiliki kandungan selulosa dan lignin yang berbeda, yang berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik komposit komposit yang dihasilkan (Siagian dkk., 2024).

Tabel 2. 1 Sifat Serat Alami

Serat	Density (g/cm^3)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Jute	1,23	325-770	37,5-55	2,5
Flax	1,38	700-1000	60-70	2,3
Hemp	1,35	530-1110	45	3
Ramie	1,44	915	23	3,7
Banana	1,35	721,5-910	29	2
Pincaple	1,5	1020-1600	71	0,8
Kenaf	1,2	745-930	41	1,6
Coir	1,2	140,5-175	6	27,5
Sisal	1,5	460-855	15,5	8
Abaca	1,5	410-810	41	3,4
Cotton	1,21	250-500	6-10	7

Sumber : (Siagian dkk., 2024)

2.3.2 Serat Buatan *(Synthetic Fiber)*

Serat sintetis adalah material penguat yang dibuat melalui proses kimia dengan bahan dasar polimer sintetis, seperti polyester, nilon, akrilik, dan polyolefin, yang memiliki sifat mekanik unggul serta kestabilan kimia dan termal yang tinggi. Serat ini banyak digunakan pada industri teknik dan tekstil karena konsistensi kualitas dan kemampuan disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Keunggulan lain serat sintetis adalah daya tahan terhadap kelembaban dan jamur serta elastisitas yang cukup baik pada beberapa jenis, sehingga meningkatkan umur layanan produk komposit dan tekstil yang dibuat.

Namun, serat sintetis relatif kurang ramah lingkungan karena sulit terurai

secara alami, dan proses produksinya masih bergantung pada sumber energi fosil, sehingga memunculkan tantangan keberlanjutan. Upaya pengembangan serat sintetis berbasis bio *(biobased synthetic fibers)* menjadi focus utama riset saat ini, yang bertujuan mengurangi jejak karbon dan meningkatkan biodegrabilitas tanpa mengorbankan performa mekanik dan fungsional serat. Biobased fibers tersebut memiliki potensi besar untuk aplikasi yang ramah lingkungan dengan sifat antibakteri dan biokompatibel, serta mampu digunakan di bidang medis, tekstil, dan packaging (Tian dkk., 2022).

2.4 Serat Sisal *(Agave Sisalana)*

Tanaman sisal merupakan tanaman tropis yang banyak tumbuh di wilayah beriklim kering dan semi-kering seperti Nusa Tenggara Timur dan Sulawesi Selatan. Tanaman ini memiliki daun Panjang berdaging tebal yang mengandung serat kuat dan fleksibel. Serat sisal diperoleh dari jaringan vascular daun dengan peroses ekstraksi mekanik atau kimia. Biasanya, selembar daun sisal mempunyai berat sekitar 600 gram yang dapat menghasilkan 3% berat serat atau 1000 helai serat (Adhi Kusumastuti, 2009).



Gambar 2. 8 Tanaman Sisal
Sumber : (Fikran dkk., 2022)

Serat sisal memiliki karakteristik mekanik yang baik seperti kekuatan tarik tinggi, modulus elastisitas besar, dan ketahanan aus yang baik. Berdasarkan penelitian (Hamdi dkk., 2024), kekuatan tarik serat sisal berkisar 400-700 MPa, sedangkan modulus elastisitasnya mencapai 10-20 GPa, tergantung pada metode ekstraksi dan perlakuan permukaan. Komposisi kimia utama serat sisal adalah selulosa (65%), hemiselulosa (12%), lignin (9,9%), dan pektin (2%) (Sathishkumar dkk., 2025).

Kandungan selulosa yang tinggi berperan dalam kekuatan tarik, sementara lignin meningkatkan kekauan dan ketahanan terhadap kelembapan, Namun, permukaan serat sisal alami biasanya dilapisi lilin dan lignin yang menurunkan daya lekat terhadap resin. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi permukaan melalui perlakuan alkali atau kimia lainnya untuk meningkatkan kekuatan antarmuka dengan matriks. Selain meningkatkan adhesi, perlakuan alkali juga mampu mengurangi diameter serat sehingga meningkatkan aspek rasio serat, yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi transfer tegangan dari matriks ke serat



Gambar 2. 9 Serat Sisal
Sumber : (Adhi Kusumastuti, 2009)

Tabel 2. 2 Sifat Serat Sisal

Densitas (kg/m^3)	Moisture Content (%)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus (GPa)	Maximum Strain (%)	Diameter (µm)
1450	11	604	9,4-15,8	-	50-200
1450	-	530-640	9,4-22	3-7	50-300
-	-	347	14	5	-
1030	-	500-600	16-21	3,6-5,1	-
1410	-	400-700	9-20	5-14	100-300
1400	-	450-700	7-13	4-9	-
-	-	530-630	17-22	3,64-5,12	100-300
1450	-	450-700	7-13	4-9	-

Sumber : (Adhi Kusumastuti, 2009)

Proses ekstraksi serat sisal bertujuan untuk memisahkan serat dari jaringan daun tanpa merusak struktur mikronya. Ekstraksi dapat dilakukan secara mekanik menggunakan decortirator atau secara kimia dengan perendaman dalam larutan basa seperti NaOH. Metode mekanik menghasilkan serat kasar, sementara metode kimia memberikan serat yang lebih halus lebih bersih dan homogen (Bekele dkk., 2024).

Selain itu, kemajuan penelitian terkini juga menyoroti pentingnya pengembangan teknik ekstraksi yang ramah lingkungan dan efisiensi sumber daya untuk meningkatkan keberlanjutan produksi serat sisal. Studi terbaru, mengusulkan integrasi proses mekanik dan kimia yang dioptimalkan serta penggunaan agen ekstraksi alternatif untuk mengurangi dampak limbah dan penggunaan bahan kimia

berbahaya. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan yield dan kualitas serat sisal sekaligus menurunkan biaya produksi, selaras dengan kebutuhan industri material komposit berkelanjutan. Selain itu, evaluasi siklus hidup *(life cycle assessment)* terhadap proses ekstraksi serat sisal mengindikasikan potensi pengurangan emisi karbon dan penggunaan air dengan pengelolaan yang tepat, mendukung implementasi serat sisal sebagai alternatif ramah lingkungan dalam komposit modern (Kahigi dkk., 2025).

2.5 Orientasi Laminae

Laminae merupakan lapisan penyusun utama dalam struktur material komposit berlapis *(Laminated composites)*, di mana setiap lapisan terdiri atas serat yang tertanam dalam matriks dengan orientasi tertentu. Setiap lamina memiliki ketebalan, arah serat, dan sifat mekanik yang dapat berbeda, tergntung pada rancangan struktur yang dinginkan. Kombinasi dari beberapa lamina dengan orientasi berbeda (misalnya 0°, 45°, 60°, 90°) membentuk struktur laminate yang memiliki kekuatan dan kekakuan anisotropic, artinya sifat mekaniknya bergantung pada arah pembebanan (Fajarudin & Doni Widodo, 2021)

Secara mekanis, perilaku laminae dalam komposit sangat dipengaruhi oleh orientasi serat, ketebalan lapisan, serta kualitas ikatan antar muka antara lamina satu dengan lainnya. Perubahan orientasi serat dapat mengubah distribusi tegangan di dalam struktur dan menentukan arah utama beban yang dapat ditahan. Selain itu, kualitas ikatan antar lamina memengaruhi ketahanan terhadap delaminasi, yaitu fenomena pemisahan antar lapisan akibat tegangan antar muka yang berlebihan (Joshi & Tamboli, 2017).

2.6 Resin Polyester

Resin polyester merupakan jenis resin thermoset yang banyak digunakan dalam pembuatan komposit karena mudah diperoleh dan memiliki sifat mekanik yang baik. Resin ini memiliki viskositas rendah sehingga mudah menyelimuti serat penguat selama proses fabrikasi. Setelah di campur dengan katalis, resin polyester akan mengalami reaksi polimerisasi yang menghasilkan struktur tiga dimensi yang kaku dan kuat ((Nesimnasi dkk., 2015).

Tabel 2. 3 Sifat Mekanik Resin Polyester

Properties	Values
Density	0,601 – 2,20 g/cc
Tensile Strength	10,0 – 123 MPa
Elongtion at Break	0,50 – 2,4 %
Modulus of Elasticity	1,00 – 10,6 GPa
Izod Impact	1,23 – 9,08 J/cm
Charpy Impact	0,300 – 4,50 J/cm^2

Sumber : (Herlina Sari dkk., 2023)

2.7 Katalis

Katalis digunakan untuk mempercepat polimerisasi pada resin thermoset. Dalam komposit berbasis resin polyester, katalis yyang umum digunakan Adalah *metil etil keton peroksida* (MEKP). Katalis ini berfungsi memicu reaksi eksotermik yang mengubah resin cair menjadi padat (Bekele dkk., 2024). Pemilihan konsentrasi katalis MEKP harus disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi proses manufaktur, karena kadar yang terlalu tinggi dapat menyebabkan reaksi

polimerisasi berlangsung sangat cepat sehingga menimbulkan peningkatan suhu yang ekstrim dan berpotensi menimbulkan cacat termal pada komposit.

2.8 Perlakuan Alkali ((NaOH Treatment)

Perlakuan alkali merupakan salah satu metode kimia untuk memodifikasi permukaan serat alam agar terjadi peningkatan ikatan kimia antarmuka dengan resin. Proses ini menggunakan natrium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi tertentu untuk menghilangkan lignin, hemiselulosa, serta kotoran pada permukaan serat. Reaksi ini dikennal sebagai *mercerization* yang menghasilkan permukaan lebih kasar dan area kontak lebih luas (Murwamadala dkk., 2024b).

Dalam penelitian ini, proses perendaman dilakukan dalam larutan NaOH dengan variasi waktu 1, 2, 3, 4, dan 5 jam. Waktu perendaman memengaruhi derajat penghilangan lignin dan hemiselulosa, yang berdampakk langsung pada kekuatan tarik dan daya rekat serat terhadap resin polyester.

2.9 Metode Pencetakan Press *(Compression Molding)*

Metode press atau compression molding adalah proses pencetakan komposit di mana campuran serat dan resin ditempatkan dalam cetakan, kemudian diberikan tekanan sampai resin mengalami proses curing dan membentuk laminasi komposit sesuai bentuk cetakan. Pada komposit matriks polimer berbasis resin polyester, metode ini banyak digunakan karena mampu menghasilkan ketebalan yang lebih seragam, kandungan void yang rendah, dan pemadatan serat yang baik dibanding metode hand lay-up. Proses ini cocok untuk pembuatan komposit laminae dengan orientasi serat teratur, sehingga sifat mekanik seperti kekuatan tarik dan kekakuan dapat lebih terkendali.

Secara umum tahapan compression molding meliputi penataan serat dalam cetakan, impregnasi resin yang telah dicampur katalis, penutupan cetakan, pemberian tekanan dengan alat press, kemudian penahanan tekanan hingga resin mengeras. Tekanan yang diberikan berfungsi untuk mendorong resin masuk ke sela-sela serat dan mengeluarkan udara, sehingga ikatan antarmuka serat–matriks menjadi lebih baik dan cacat seperti void, delaminasi awal, dan daerah kering dapat diminimalkan. Pada beberapa aplikasi, cetakan juga dipanaskan untuk mempercepat curing dan meningkatkan kualitas struktur komposit, khususnya untuk resin termoset.

2.10 ASTM D638

ASTM D638 adalah standar uji tarik yang banyak digunakan untuk menentukan sifat mekanik material, baik yang diperkuat maupun tidak diperkuat. Standar ini menetapkan prosedur uji mennggunakan spesimen berbentuk dumbbell dengan dimensi dan ketebalan tertentu, di mana spesimen diuji hingga patah di mesin uji arik *(universal testing machine)* dengan laju tarikan yang terkontrol. Parameter utama yang diuukur meliputi kekuatan tarik maksimum, modulus elastisitas tarik, elongsi patah, dan rasio poisson, yang sangat penting untuk menilai performa mekanik material dalam berbagai aplikasi Teknik dan manufaktur.

Dalam penelitian ini digunakan standar ASTM D638 tipe 3, karena jenis speismen uji tarik yang memiliki dimensi khusus untuk pengujian material komposit. Spesimen tipe 3 memiliki ukuran Panjang sekitar 115 mm dengan lebar bagian uji 19 mm dan ketebalan 12,7 mm, sehingga cocok digunakan untuk material dengan ketebalan lebih tipis atau saat sample terbatas.

Penggunaan ASTM D638 Type 3 dalam pengujian tarik komposit serat sisal berbasis poliester dalam penelitian ini diharapkan memberikan hasil yang representatif dan dapat dibandingkan dengan standar internasional. Standar ini memastikan bahwa prosedur uji, mulai dari persiapan spesimen, kecepatan uji, hingga pengukuran hasil uji, dilakukan secara sistematis untuk meminimalkan variasi dan kesalahan eksperimental, sehingga validitas dan reliabilitas data mekanik yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan.

2.11 Uji Tarik

Uji tarik *(tensile test)* dilakukan untuk mengetahuai kekuatan mekanik material terhadap gaya tarik yang diberikan. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh parameter seperti kekuatan tarik maksimum, modulus elastisitas, dan regangan patah. Prosedur uji dilakukan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) dengan standar ASTM D638 untuk komposit berbasis resin polyester (Hamdi dkk., 2024). Hasil uji tarik digunakan untuk menganalisis pengaruh lama perendaman serat dalam NaOH dan orientasi laminae terhadap performa mekanik komposit sisal-polyester. Rumus yang digunakan pada penelitian ini menggunakan standar ASTM D638 tipe 3.

a. Luas penampang awal (A_0)

$$A_0 = t \times w \quad \text{.....(2.1)}$$

Dimana :

A_0 = luas penampang awal spesimen (mm^2)

t = tebal spesimen (mm)

w = lebar bagian pengukur spesimen (mm)

b. Pertambahan Panjang (ΔL)

$$\Delta L = L - L_0 \quad \text{(2.2)}$$

Dimana :

ΔL = pertambahan panjang (mm)

L = Panjang spesimen setelah di uji (mm)

L_0 = panjang awal spesimen (mm)

c. Tegangan Tarik (σ)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{(2.3)}$$

Dimana :

σ = tegangan tarik (MPa)

F = gaya maksimum (N)

A_0 = luas penampang awal spesimen (mm^2)

d. Regangan (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad \text{(2.4)}$$

Dimana :

ε = regangan (%)

ΔL = pertambahan panjang

L_0 = panjang awal spesimen

e. Modulus Elastisitas (E)

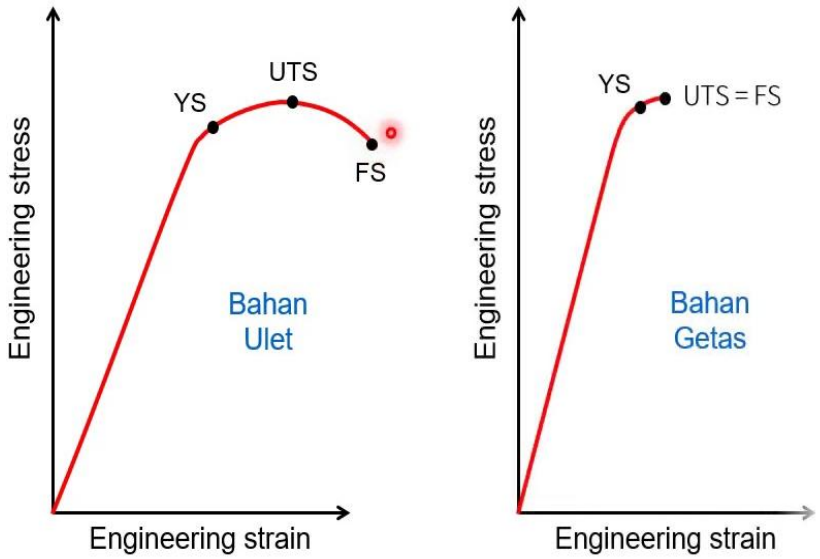
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{.....(2.5)}$$

Dimana :

E = modulus elastisitas (MPa)

σ = tegangan tarik (MPa)

ε = regangan (%)



Gambar 2. 10 Hubungan Tegangan dan Regangan
Sumber : (Nesimnasi dkk., 2015)

2.12 Uji Struktur Makro

Uji struktur makro bertujuan untuk mengamati morfologi permukaan dan distribusi serat pada komposit setelah proses pengujian mekanik. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran tertentu untuk melihat retak matriks (*matrix crack)*, delaminasi, debonding, void, *fiber pull out*, dan *fiber*

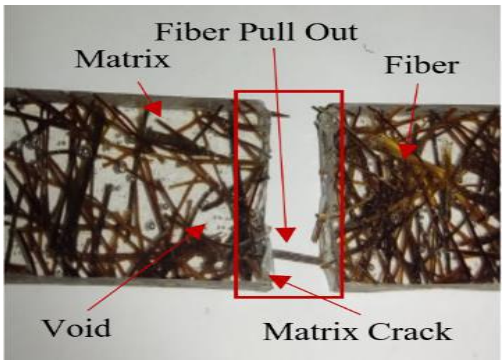
breaking (Sari dkk., 2025).

Metode ini memungkinkan identifikasi berbagai mode kegagalan pada permukaan patahan komposit, dimana mikroskop optik memberikan akses cepat terhadap data mikrostruktur dan menampilkan fitur serat serta matriks dalam konteks kualitatif dan kuantitatif. Pengamatan struktur makro dilakukan pada area patahan untuk mengindikasikan adanya void dan fiber break pada bagian internal bahan mikrokomposit, dimana beberapa serat mengalami pull-out saat uji tarik dan bending dilakukan (Zeiss, 2019).

Berikut beberapa fenomena kerusakan pada komposit :

1. Retak Matriks *(Matriks crack)*

   M*atrix crack* merupakan suatu jenis kegagalan material dimana matrix mengalami keretakan setelah diberi pembebanan.

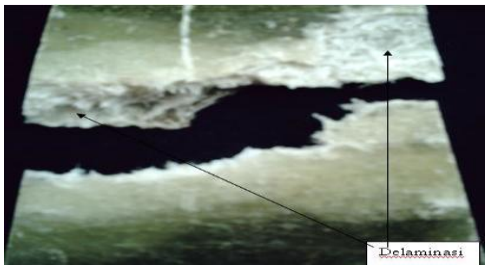


Gambar 2. 11 Retak Matriks
Sumber : (Millenio dkk., 2022)

2. Delaminasi

   Delaminasi adalah pemisahan antar lapisan lamina dalam komposit berlapis yang biasanya diakibatkan oleh tegangan antar lapisan, impak, atau ketidaksempurnaan dalam proses laminasi. Delaminasi dapat berkembang menjadi retakan besar selama pembebanan, yang pada akhirnya mempercepat

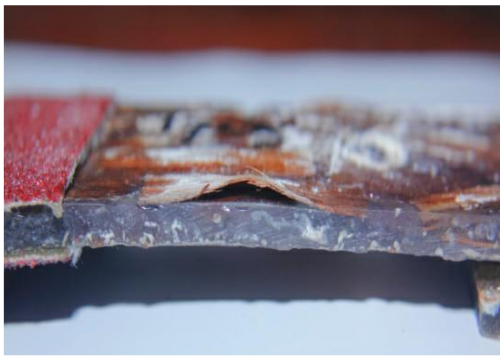
kegagalan structural (Huang & Bobyr, 2023).



Gambar 2. 12 Delaminasi
Sumber : (Made Astika, 2009)

3. Debonding

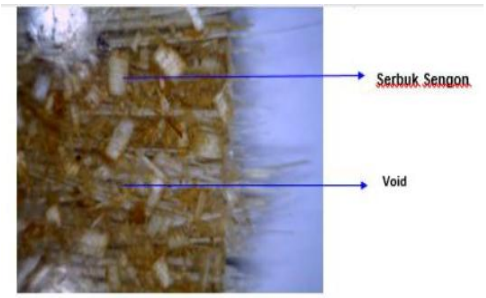
Debonding merupakan fenomena terlepasnya ikatan antar muka antara serat dan matriks akibat lemahnya adhesi atau tegangan geser yang melebihi kekuatan interfacial. Cacat ini sering muncul akibat proses pencampuran yang tidak homogen atau ketidaksempurnaan perlakuan permukaan serat, seperti alkalisasi yang tidak optimal. Kehadiran debonding menurunkan kekuatan tarik dan kekakuan komposit (Phani dkk., 2024).



Gambar 2. 13 Debonding
Sumber : (Adoe dkk., 2020)

4. Void

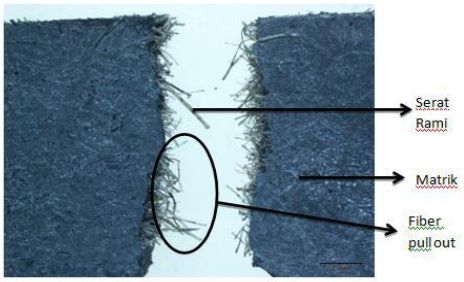
Void merupakan rongga udara yang terjebak pada komposit, pembentukan rongga udara disebabkan oleh udara yang terjebak selama proses penuangan maupun pencampuran resin.



Gambar 2. 14 Void
Sumber : (Pradika, 2016)

5. *Fiber Pull-Out*

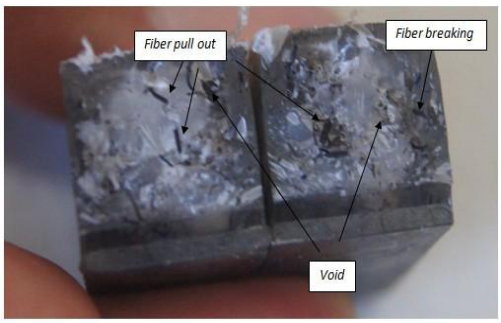
Fiber pull out merupakan suatu jenis kegagalan material dimana serat keluar atau ikut tercabut dari komposit setelah patah.



Gambar 2. 15 *Fiber Pull-out*
Sumber : (Nugrahanto, 2016)

6. *Fiber breaking*

Fiber breaking merupakan jenis patahan dimana serat putus setelah menerima pembebanan (Millenio dkk., 2022).



Gambar 2. 16 Fiber Breaking
Sumber : (Millenio dkk., 2022)

2.13 Jurnal Rujukan

Menurut (Fikran dkk., 2022) melakukan penelitian dengan judul Analisis Sifat Mekanis Bahan Komposit Lamina Serat Sisal *(Sisalana Agave)* Bermatriks Polimer. Menganalisis pengaruh variasi sudut lamina dan komposisi campuran serat sisal dengan matriks poliester terhadap sifat mekanis komposit. Pembuatan spesimen mengacu pada standar ASTM D 638-02 tipe 3 untuk uji tarik dan ASTM D 6110-04 untuk uji impak. Hasil menunjukkan bahwa komposit dengan komposisi 15% serat dan 85% resin menghasilkan tegangan tarik maksimum sebesar 45,18 N/mm² dan kekuatan impak rata-rata 831,80 J/cm², lebih tinggi dibanding komposisi 5% serat dan 95% resin. Penelitian menyimpulkan bahwa semakin besar perbandingan serat terhadap resin, semakin tinggi kekuatan mekanis yang dihasilkan.

Menurut (Murwamadala dkk., 2024a) melakukan penelitian dengan judul *Impact of Alkali Microstructure, Surface Topologhy and the Resulting Mechanical Properties of Single Sisal Fibers.* Penelitian ini mengeksplorasi pengaruh konsentrasi pH larutan alkali (NaOH) terhadap mikrostruktur internal serat sisal menggunakan computed tomography (CT), perubahan topografi permukaan menggunakan laser confocal microscopy, dan sifat mekanik yang dihasilkan. Hasil pemindaian sinar-X menunjukkan bahwa serat yang tidak dirawat memiliki struktur berongga sepanjang panjangnya, dan setelah perlakuan alkali, rongga ini berkurang dan diameter serat mengecil. Degradasi yang nyata diamati pada konsentrasi 25%, yang juga memengaruhi topografi permukaan dan sifat mekanis keseluruhan. Sifat mekanik optimal dilaporkan pada perlakuan alkali 1%, yang didukung oleh

perubahan topologi permukaan pada konsentrasi ini, menunjukkan bahwa sifat optimal dapat dicapai pada rentang konsentrasi alkali di bawah 1% dan tidak perlu pada konsentrasi yang lebih tinggi.

Menurut (Fauziah dkk., 2024) melakukan penelitian dengan judul Kajian Review Aplikasi Serat Sisal (Sisal Fiber) Sebagai Alternatif Komposit Polimer. Mengkaji aplikasi serat sisal sebagai alternatif penguat komposit polimer yang ramah lingkungan. Serat sisal memiliki kekuatan tarik tinggi, kekakuan superior, biodegradabilitas, tahan api, sifat isolasi termal, dan harga yang murah. Studi ini melakukan review terhadap uji kekuatan tarik dan impact pada komposit sisal-polyester dengan fraksi volume 35%, 45%, dan 55% menggunakan standar ASTM D638-3 untuk uji tarik dan ASTM D-5942-96 untuk uji impact. Hasil menunjukkan bahwa fraksi volume 55% menghasilkan kekuatan tarik optimal sebesar 861,31 N/mm² dengan regangan 7,25%, serta kekuatan impact tertinggi sebesar 0,0125 J/mm². Peningkatan fraksi volume serat secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik dan impact karena matriks dapat masuk ke dalam pori-pori serat, meningkatkan kekuatan komposit secara keseluruhan.

Menurut (Bekele dkk., 2024) melakukan penelititan dengan judul *Experimental Investigation on Tensile Strength of Palmary Palm Leaf Stalk – Sisal Fiber Reinforced Polymer Hybride Composite*. Penelitian ini melakukan investigasi eksperimental terhadap kekuatan tarik dan kekuatan impak komposit hibrida berbasis serat palmyra palm leaf stalk (PLSF) dan serat sisal dengan matriks resin poliester tak jenuh. Komposit dibuat menggunakan metode hand lay-up dengan variasi parameter berupa rasio massa fraksi PLSF/sisal dan fraksi volume

serat/matriks. Pengujian kekuatan tarik dan impak dilakukan sesuai standar ASTM. Hasil menunjukkan penambahan serat sisal pada PLSF meningkatkan kekuatan tarik sebesar 12,85%, 26,54%, dan 30,63% dibanding komposit PLSF murni. Sementara penambahan PLSF pada serat sisal meningkatkan energi impak hingga 20,98% dibanding komposit sisal murni. Kekuatan tarik optimum dicapai pada fraksi volume serat 20% dengan peningkatan 53,996% dibanding 10%. Perlakuan alkali (NaOH 5%) pada serat meningkatkan kekuatan tarik dan impak masing-masing sebesar 62,243% dan 22,478% dibanding komposit hibrida tanpa perlakuan. Komposit HPSFRC-2 (rasio P/S 50/50% dengan rasio serat/matriks 20/80%) menunjukkan kekuatan tarik dan impak terbaik, sehingga berpotensi untuk aplikasi komponen interior otomotif seperti panel pintu, dashboard, dan atap kendaraan.

Menurut (Nesimnasi dkk., 2015) melakukan penelitian dengan judul Pengaruh Perlakuan Alkali (NaOH) Pada Serat *Agave Cantula* Terhadap Kekuatan Tarik Komposit Polyester. Penelitian ini mengkaji pengaruh perlakuan alkali terhadap kekuatan tarik komposit berpenguat serat sabut kelapa dengan matriks poliester. Serat sabut kelapa direndam dalam larutan NaOH 5% dengan variasi waktu perendaman 2, 4, 6, dan 8 jam sebelum digunakan sebagai penguat pada komposit dengan fraksi volume serat 40%. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa kekuatan tarik optimum dicapai pada waktu perendaman 2 jam dengan nilai 21,075 MPa. Perendaman yang lebih lama (6 dan 8 jam) menyebabkan penurunan kekuatan tarik karena serat mengalami degradasi akibat larutan alkali yang merusak struktur internal serat. Analisis struktur makro pada penampang patahan menunjukkan bahwa komposit dengan waktu perendaman 6 dan 8 jam mengalami

kegagalan berupa fiber pull-out yang panjang dan banyak, sedangkan pada waktu perendaman 2 dan 4 jam terjadi patahan getas dengan fiber pull-out yang lebih pendek dan sedikit.

Penelitian yang dilakukan oleh (Alfriany Salo dkk., 2026) dengan judul *"Pengaruh Durasi Pengasapan Terhadap Sifat Tarik Serat Tunggal dan Morfologi Permukaan Serat Pelepah Aren (Arenga pinnata)"* bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi durasi pengasapan terhadap komposisi kimia, kekuatan tarik, dan morfologi permukaan serat pelepah aren. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen dengan variasi durasi pengasapan 0 jam, 5 jam, 10 jam, 15 jam, dan 20 jam pada suhu 45°C menggunakan asap hasil pembakaran tempurung kelapa. Pengujian yang dilakukan meliputi uji tarik serat tunggal, analisis komposisi kimia, dan pengamatan morfologi permukaan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa durasi pengasapan berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan tarik serat pelepah aren. Nilai kekuatan tarik meningkat dari 210,64 MPa pada serat tanpa perlakuan menjadi 421,59 MPa pada pengasapan selama 15 jam sebagai kondisi optimum, kemudian menurun menjadi 404,37 MPa pada durasi 20 jam akibat terjadinya perlakuan berlebih (*over-treatment*). Pengamatan SEM menunjukkan bahwa pengasapan mampu meningkatkan kekasaran permukaan serat sehingga berpotensi memperbaiki daya ikat dengan matriks, sedangkan pengasapan yang terlalu lama menyebabkan munculnya mikroretak yang dapat menurunkan sifat mekanik serat.