

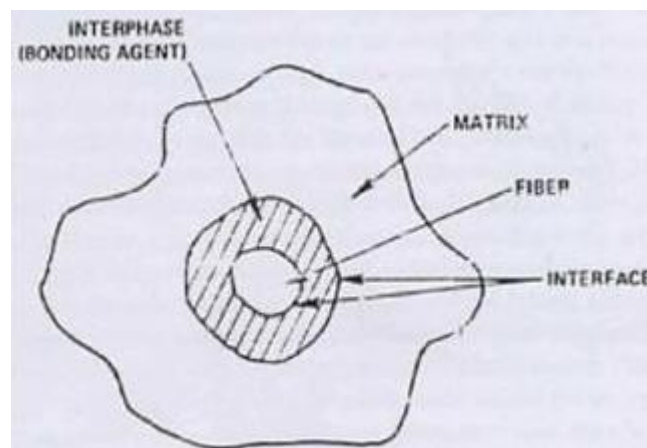
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposit

Komposit merupakan teknologi material yang dirancang melalui rekayasa untuk menggabungkan dua komponen utama, yaitu matriks dan penguat (fiber). Teknologi ini memungkinkan penciptaan material dengan sifat-sifat baru yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan desain yang spesifik. Komposit dibentuk dengan cara menggabungkan dua jenis material yang memiliki sifat berbeda, sehingga menghasilkan kombinasi sifat yang tidak dimiliki oleh bahan-bahan penyusunnya secara individual. Para ilmuwan mendefinisikan komposit sebagai kombinasi antara serat-serat dan resin yang dapat disusun dengan berbagai metode. Misalnya, serat dapat diatur secara memanjang dalam satu arah (unidirectional composites), dipotong menjadi bagian-bagian kecil dan diacak (random fibers), atau dianyam secara silang sebelum dimasukkan ke dalam resin (cross-ply laminate). Selain itu, beberapa pandangan menyatakan bahwa komposit terdiri dari kombinasi pengisi yang dapat berbentuk serat, butiran seperti serbuk, atau serat yang terbuat dari material seperti kaca, karbon, aramid (kevlar), dan keramik. Dengan kata lain, komposit adalah material heterogen yang tersusun dari dua komponen utama: penguat dan pengikat (matriks). Penggabungan kedua komponen ini bertujuan untuk menciptakan material baru yang memiliki karakteristik dan sifat mekanis yang unggul, yang tidak dimiliki oleh masing-masing komponen secara

terpisah [12]. Matriks adalah bagian terbesar dalam komposit yang memiliki fungsi utama sebagai pengikat dan pelindung penguat, sedangkan penguat adalah bagian yang berfungsi sebagai penerima beban utama yang di alami oleh komposit. Penguat yang digunakan biasanya berupa serat [13]. Bahan komposit menawarkan sejumlah keunggulan yang signifikan jika dibandingkan dengan bahan konvensional seperti logam. Kelebihan ini dapat dilihat dari berbagai aspek penting, termasuk sifat-sifat mekanik dan fisik, keandalan (reliability), kemampuan untuk diproses (prosesabilitas), serta efisiensi biaya [14].

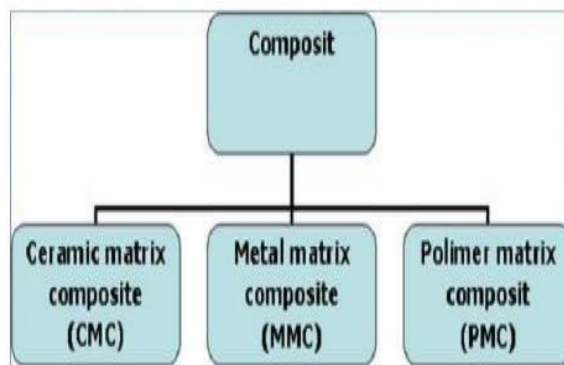


Gambar 2.1 Definisi Komposit [14]

Berdasarkan dari matriknya, komposit dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu [13]:

1. *Metal matrix composite* (MMC) adalah komposit yang menjadikan logam sebagai matriknya. MMC memiliki sifat mekanik yang tinggi sehingga sering digunakan pada industri otomotif. Contoh dari MMC adalah matriks aluminium berpenguat partikel SiC.

2. *Ceramic matrix composite* (CMC) adalah komposit yang menjadikan keramik sebagai matriknya. Umumnya CMC memiliki ketahanan panas yang tinggi sehingga digunakan pada komponen *furnace*. Contoh dari CMC adalah matrik SiC berpenguat serat karbon.
3. *Polymer matrix composite* (PMC) adalah komposit yang menjadikan polimer sebagai matriknya. Pembuatan PMC umumnya sederhana dan murah sehingga banyak di aplikasikan di berbagai bidang. Contoh PMC adalah resin poliester berpenguat serat nanas.



Gambar 2.2 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Bentuk dari Matriksnya [13]

Proses pembuatan komposit yang paling sederhana yaitu dengan PMC sehingga banyak mendapat perhatian oleh para peneliti. PMC sendiri memiliki keuntungan yaitu *high specific stiffness*, *high specific strength*, ringan, ketahanan korosi yang baik, ketahanan impak yang baik, ketahanan *fatigue* yang baik, dan ketahanan patah yang tinggi. Selain dari keuntungan yang dimiliki, PMC juga memiliki kekurangan yaitu ketahanan panas yang rendah [13]

2.2 Serat Alami

Serat adalah filamen kecil yang berasal dari bahan alami atau buatan (sintetik) yang memiliki perbandingan panjang terhadap diameter (aspek rasio) minimal 100 kali lipat. Serat ini dikenal karena sifatnya yang fleksibel dan kuat, menjadikannya bahan yang penting dalam berbagai aplikasi industri. Secara umum, serat dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama berdasarkan asal dan proses pembuatannya, yaitu serat alam, serat semisintetik, dan serat sintetik [15]. Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan serat alam telah meluas di berbagai bidang. Sebagai contoh, serat pisang, goni, hingga rami telah menggantikan beberapa serat sintesis seperti karbon, kaca, dan boron. Kelimpahannya yang tinggi, kemudahannya untuk diproses, dan keramahlingkungannya merupakan beberapa hal yang menarik perhatian pelaku industri untuk memanfaatkan jenis serat alam pada pembuatan produk komposit [16]. Serat alami memiliki keunggulan selama proses produksi, salah satunya adalah tidak menghasilkan gas berbahaya dan tidak merusak peralatan pemrosesan karena sifatnya yang tidak abrasif. Namun, serat alami juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu diperhatikan, terutama terkait dengan sifat hidrofiliknya dan kecenderungannya untuk mudah terbakar. Sifat hidrofilik ini menyebabkan serat alami memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi, yang pada gilirannya dapat menyebabkan masalah seperti adhesi antar-muka yang buruk antara matriks polimer dan serat, serta dispersi serat yang tidak merata dalam matriks. Masalah-masalah ini dapat mengurangi efektivitas serat alami sebagai bahan penguat dalam komposit polimer. Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk memodifikasi permukaan serat alami

[17].

Tabel 2.1 Sifat Mekanik dari Beberapa Jenis Serat [18]

		<i>Cotton</i>	<i>flax</i>	<i>Jute</i>	<i>Kenaf</i>	<i>Ramie</i>	<i>Sisal</i>
Diameter	mm	-	11-33	200	200	40-80	50-200
Panjang	mm	10-60	10-40	1-5	2-6	60-260	1-5
Kekuatan tarik	MPa	330-585	345-1035	393-773	930	400-1050	511-635
Modulus elastisitas	GPa	4,5-12,6	27,6-45,0	26,5	53,0	61,5	9,4-15,8
Massa jenis	g/cm ²	1,5-1,54	1,43-1,52	1,44-1,50	1,5	1,5-1,6	1,16-1,5
Regangan maksimum	%	7,0-8,0	2,7-3,2	1,5-1,8	1,6	3,6-3,8	2,0-2,5
		<i>Cotton</i>	<i>Flax</i>	<i>Jute</i>	<i>Kenaf</i>	<i>Ramie</i>	<i>Sisal</i>
Spesifik kekuatan tarik	Km	39,2	73,8	52,5	63,2	71,4	43,2
Spesifik kekuatan	Km	0,85	3,21	1,80	3,60	4,18	1,07

Struktur serat alami terdiri dari selulosa, hemiselulosa, lignin, dan zat lilin memungkinkan mengatasi penyerapan air dari lingkungan yang menyebabkan ikatan yang lemah antara serat dan polimer. Ikatan antara serat alami dan polimer dianggap sebagai tantangan karena struktur kimia dari serat dan matrik berbeda. Sehingga perlu dilakukan modifikasi serat untuk mengurangi penyerapan air serat alami untuk meningkatkan kompatibilitas komposit [19].

2.3 Serat Daun Nanas

Tanaman nanas (*Ananas cosmosus*), yang termasuk dalam famili Bromeliaceae, adalah tumbuhan yang tumbuh subur di wilayah tropis dan subtropis. Tanaman ini tersebar luas di berbagai negara, seperti Filipina, Brasil, Hawaii, India, dan Indonesia. Di Indonesia sendiri, tanaman nanas banyak ditemukan di beberapa daerah, termasuk Subang, Majalengka, Purwakarta, Purbalingga, Bengkulu, Lampung, dan Palembang. Daerah-daerah ini menjadikan nanas sebagai salah satu sumber daya alam yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan. Dalam budidayanya, daun nanas biasanya dikembalikan ke tanah sebagai pupuk organik, membantu menjaga kesuburan tanah dan mendukung keberlanjutan pertanian. Tanaman nanas dewasa mampu menghasilkan sekitar 70 hingga 80 lembar daun per tanaman, dengan berat berkisar antara 3 hingga 5 kilogram. Kandungan air dalam daun nanas cukup tinggi, mencapai sekitar 85%, yang menjadikan daun ini sebagai bahan yang kaya akan kelembaban. Setelah panen, tanaman nanas meninggalkan sejumlah besar limbah, dengan 90% dari total limbah berupa daun, 9% tunas batang, dan 1% batang [20].

Hingga saat ini, pemanfaatan serat dari daun nanas sebagian besar terbatas pada kerajinan rumah tangga, seperti anyaman, dan belum banyak dimanfaatkan secara luas dalam industri. Padahal, serat daun nanas mengandung sekitar 70-80% selulosa, yang memberikan sifat modulus elastisitas dan kekuatan yang cukup tinggi. Karakteristik ini menunjukkan bahwa serat daun nanas memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai bahan penguat komposit serat alam yang efisien dan kuat. Sayangnya, nilai jual daun nanas saat ini hampir tidak ada, karena daun-daun tersebut lebih sering dibuang daripada dimanfaatkan. Banyak petani yang tidak melihat potensi ekonomis dari limbah daun nanas ini, sehingga mereka cenderung mengabaikannya. Mengingat kelimpahan daun nanas yang tersedia, sangat penting untuk mengembangkan inovasi baru yang dapat memanfaatkan limbah ini secara lebih efektif. Salah satu solusi yang bisa dikembangkan adalah menggunakan serat daun nanas sebagai bahan penguat dalam pembuatan komposit serat alam yang murah dan ramah lingkungan. Penggunaan ini tidak hanya dapat mengurangi limbah yang terbuang, tetapi juga berpotensi meningkatkan nilai ekonomi dari daun nanas itu sendiri [21].

Menurut data yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS), produksi nanas di Indonesia mencapai rata-rata 1,5 juta ton per hari. Dengan volume produksi yang begitu besar setiap tahunnya, tentunya daun nanas yang dihasilkan juga dalam jumlah yang sangat banyak. Hal ini menunjukkan bahwa daun nanas memiliki potensi yang signifikan untuk menjadi limbah yang cukup besar. Seiring dengan tingginya produksi nanas, jumlah daun yang tidak dimanfaatkan akan terus bertambah, dan jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini dapat menimbulkan

masalah lingkungan [22].

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Serat Daun Nanas [23]

Sifat Mekanik	Nilai
Densitas (g/cm ³)	1,07
Kuat tarik (Mpa)	126,60
Elongasi (%)	2,2
Modulus Young (Mpa)	4405

2.4 Polimer Termoset

Polimer termoset yang juga dikenal sebagai termoset atau plastik termoset adalah polimer yang terdiri dari struktur ikatan silang (*crosslink*) atau molekul bercabang banyak. Polimer termoset, resin, atau plastik, sering disebut termoset, adalah polimer yang dikeraskan secara *irreversibel* dengan melakukan proses *curing* pada resin. Termoset adalah polimer yang tidak dapat diubah menjadi kaku ketika dipanaskan. Awalnya, polimer termoset adalah cairan atau padatan lunak. Namun ketika dilakukan proses *curing*, polimer akan memadat [24].

Plastik termoset atau termosetting dikenal karena sifatnya yang keras dan kaku, yang disebabkan oleh adanya ikatan-ikatan silang di antara rantai polimernya. Sifat ini membuat plastik termoset menjadi semakin keras saat dipanaskan, karena panas memfasilitasi pembentukan ikatan-ikatan silang tersebut dengan lebih mudah. Beberapa contoh umum dari plastik termoset termasuk Bakelit, poli (melamin formaldehida), dan poli (urea formaldehida). Meskipun polimer termoset

ini lebih sulit untuk didaur ulang dibandingkan dengan termoplastik, mereka memiliki keunggulan dalam hal ketahanan dan daya tahan. Struktur ikatan silang yang terbentuk secara permanen setelah proses pemanasan membuat plastik termoset sangat stabil dan mampu mempertahankan bentuk serta kekuatannya meskipun terkena panas yang tinggi. Karena sifat ini, plastik termoset sering digunakan dalam pembuatan berbagai peralatan rumah tangga yang memerlukan ketahanan terhadap panas, seperti cangkir dan piring tahan panas, komponen elektronik, dan berbagai produk lainnya yang membutuhkan daya tahan terhadap suhu tinggi [25].

Sifat-sifat dari polimer termoset antara lain yaitu memiliki kombinasi mulai dari stabilitas termal, ketahanan kimia, hingga integritas struktural. Termoset memiliki kemampuan untuk mempertahankan stabilitasnya dalam berbagai kondisi lingkungan dan suhu secara signifikan lebih baik daripada polimer termoplastik. Oleh karena itu polimer termoset sering dimanfaatkan sebagai matrik pada pembuatan komposit. Penggunaan termoset sebagai matrik komposit memungkinkan pengaplikasian berbagai jenis mulai dari yang sederhana hingga rumit [26]. Berikut ini merupakan contoh polimer termoset.

2.4.1 Poliester

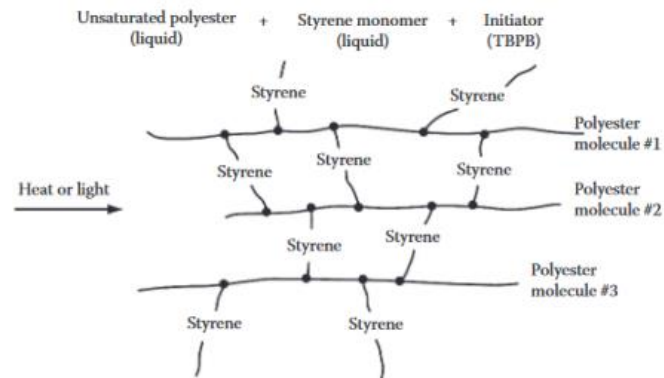
Unsaturated Polyester Resin (UPR) adalah senyawa kimia yang berbentuk resin cair dengan viskositas yang relatif rendah. Sifat viskositas rendah ini memungkinkan UPR untuk diolah dan diaktivasi menggunakan katalis pada suhu kamar, tanpa menimbulkan efek samping yang berbahaya. UPR adalah salah satu jenis polimer termoset yang sangat dikenal dalam

berbagai aplikasi industri. Proses pembentukan UPR terjadi melalui reaksi polimerisasi, di mana molekul glikol dan asam dikarboksilat digabungkan untuk membentuk rantai polimer. Selanjutnya, polimer ini dilarutkan dalam monomer reaktif, menciptakan cairan dengan viskositas rendah. Ketika monomer ini mulai mengering, ia bereaksi dengan ikatan tak jenuh pada polimer, menghasilkan struktur termoset yang padat dan kuat [27]. Poliester tak jenuh (*unsaturated*) adalah jenis resin yang penggunaannya mencapai 75% atau yang tertinggi di dunia [28]. Dholakiya menyebutkan bahwa penggunaan poliester tak jenuh ini telah masif sejak tahun 1930 [29]

Prapolimer awal untuk poliester adalah poliester tak jenuh yang mengandung sejumlah ikatan rangkap karbon-karbon tak jenuh pada molekulnya. Ikatan rangkap tersebut merupakan situs *cross-linking* selama *curing*. Molekul poliester tak jenuh sendiri dihasilkan oleh reaksi asam organik tak jenuh, seperti maleat anhidrida atau ftalat anhidrida, dengan glikol, seperti etilen glikol, dietilen glikol, dan propilen glikol [26]

Reaksi *curing* resin poliester dengan monomer stirena dimulai dengan menambahkan sejumlah kecil katalis, seperti benzoil peroksida (BP) untuk pengawetan suhu tinggi dan metil etil keton peroksida (MEKP) untuk pengawetan suhu kamar. Jika BP digunakan sebagai katalis, aplikasi panas dengan cepat menguraikan katalis menjadi radikal bebas yang bereaksi dengan ikatan C=C dalam stirena serta molekul poliester. Radikal bebas stirena bergabung satu sama lain dan bergabung dengan molekul poliester

pada titik ketidakebihannya, akhirnya membentuk cross link antara molekul poliester (Gambar 2.3) [26].



Gambar 2.3 Skema *Crosslinking* pada Resin Poliester [26]

2.4.2 Vinil Ester

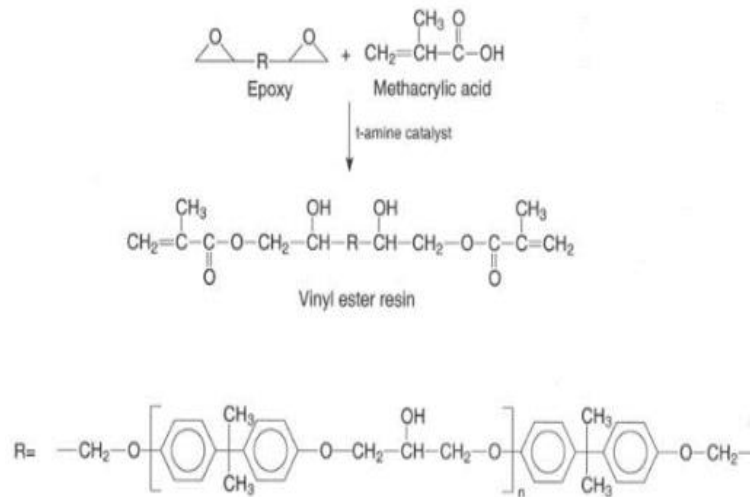
Vinil ester adalah hasil dari proses polimerisasi yang melibatkan berbagai jenis resin dan asam monokarboksilat etilenik tak jenuh. Resin ini termasuk dalam kategori resin termoset tak jenuh, yang sangat populer dan banyak digunakan dalam berbagai industri. Popularitas vinil ester disebabkan oleh sifat-sifat unggul yang dimilikinya, seperti bobot yang ringan, kekuatan yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta kemampuan memberikan sifat mekanik yang sangat baik. Salah satu alasan utama mengapa vinil ester memiliki performa yang begitu baik adalah karena adanya kandungan bisphenol A diepoksida dalam strukturnya. Kandungan ini berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kekuatan tarik dan kelenturan resin, sehingga membuat vinil ester mampu menahan beban mekanik yang cukup besar tanpa mengalami kerusakan atau deformasi. [30]. Kelebihan lain dari vinil ester ini

yaitu resin vinil ester mempunyai sifat yang spesifik seperti resisten terhadap sejumlah besar bahan kimia, memiliki stabilitas termal yang baik, dan memiliki ketahanan lelah yang sangat baik [31].

Salah satu penggunaan utama resin vinil ester dalam industri adalah dalam pembuatan laminasi struktural, yang membutuhkan material dengan kekuatan dan ketahanan tinggi. Dalam proses polimerisasi resin ini, diperlukan penambahan serangkaian katalis dan promotor dengan komposisi yang tepat dan seimbang. Penambahan ini sangat penting karena paket katalis dan promotor tersebut memainkan peran krusial dalam memfasilitasi reaksi cross-link atau pembentukan ikatan silang di dalam resin. Reaksi cross-link ini adalah proses yang menentukan kekuatan dan kestabilan akhir dari komposit yang dihasilkan. Oleh karena itu, rasio kombinasi antara katalis dan promotor harus diatur secara optimal untuk mencapai kualitas laminasi struktural terbaik. Rasio yang tepat memastikan bahwa ikatan antar molekul resin terbentuk dengan kuat, menghasilkan komposit yang memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan yang tinggi. Selain penggunaan paket katalis dan promotor, ada juga teknik tambahan yang bisa diterapkan untuk meningkatkan kekuatan ikatan interlock dalam resin, yaitu melalui pengaturan waktu curing dan pasca-curing [31]. Selama hampir tiga dekade terakhir, berbagai paten telah dikembangkan yang menunjukkan bahwa dalam reaksi pembentukan oligomer vinil ester, katalis yang umum digunakan meliputi senyawa seperti amina tersier, fosfin, serta garam-garam onmium atau alkil. Di antara berbagai katalis tersebut, penelitian yang telah dilakukan

menunjukkan bahwa triphenylphosphine terbukti menjadi yang paling efektif dalam memfasilitasi proses reaksi ini dibandingkan dengan katalis lainnya. Proses reaksi pembentukan oligomer vinil ester biasanya berlangsung selama sekitar 4 hingga 5 jam pada suhu sekitar 120°C [30].

Vinil ester memiliki struktur yang mirip dengan poliester karena terdiri dari gugus yang serupa, yakni ester. Hal yang membedakan hanyalah posisi dari gugus aktif tersebut. Pada vinil ester, posisinya berada pada bagian terminal saja [32]. Bentuk paling sederhana dari vinil ester adalah produk dari reaksi antara satu mol diglisidil eter BPA dan 2 mol asam metasilat (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Skema Reaksi dari Sintesis Vinil Ester [26]

2.4.3 Epoksi

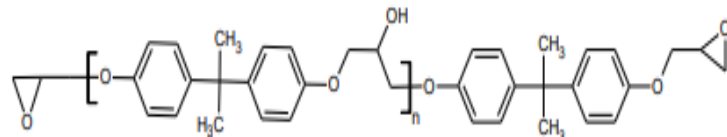
DGEBA, atau diglycidyl ether of bisphenol A, yang lebih dikenal dengan nama epoksi, adalah jenis polimer termoset yang terbentuk dari reaksi antara senyawa epiklorohidrin dan bisphenol A. Resin epoksi pertama kali

ditemukan pada tahun 1938 oleh Pierre Castan, seorang ahli kimia asal Swiss. Sejak penemuan tersebut, resin epoksi telah mengalami perkembangan yang signifikan. Pada tahun 1989, produksi resin epoksi di Jepang mencapai sekitar 137.000 ton, menandakan betapa luasnya penggunaan dan penerimaan material ini di berbagai sektor industri. Resin epoksi digunakan secara luas dalam berbagai bidang, termasuk cat, listrik, teknik sipil, dan pengikatan bahan. Keunggulan utama resin epoksi terletak pada kemampuannya untuk memberikan ikatan yang sangat baik antara permukaan yang berbeda. Setelah proses curing, resin epoksi menunjukkan karakteristik yang sangat menguntungkan, seperti kekuatan mekanik yang tinggi, ketahanan terhadap bahan kimia, serta kemampuan isolasi listrik yang superior. Keunggulan lainnya dari resin epoksi adalah kemampuannya untuk dikombinasikan dengan berbagai bahan lain, yang memungkinkan penyesuaian sifat-sifatnya sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. [33]. Resin epoksi memiliki struktur kimia yang terdiri dari gugus epoxy atau oxirene. Biasanya, resin ini berada dalam bentuk cair yang kental atau hampir padat sebelum proses pengerasan. Resin epoksi ini dirancang khusus untuk digunakan dalam aplikasi yang memerlukan pengerasan atau pembentukan material keras setelah aplikasi. Ketika resin epoksi direaksikan dengan bahan tambahan seperti hardener atau katalis, proses tersebut menghasilkan polimer crosslink. Crosslinking adalah proses di mana rantai-rantai polimer terhubung secara kimiawi melalui ikatan silang, yang mengarah pada pembentukan material yang lebih kuat dan lebih stabil. Proses ini penting karena meningkatkan

kekuatan mekanik dan ketahanan resin epoksi terhadap berbagai kondisi lingkungan. Untuk sistem curing pada suhu ruang, hardener yang umum digunakan dengan resin epoksi adalah senyawa poliamida. Poliamida ini mengandung dua atau lebih grup amina dalam strukturnya, yang berfungsi sebagai agen pengaktif dalam proses curing [34].

Resin epoksi sering kali terdiri dari molekul yang memiliki lebih dari satu gugus epoksi. Jumlah gugus epoksi yang terdapat dalam setiap molekul resin epoksi dapat bervariasi, tergantung pada jenis dan komposisi spesifik resin yang digunakan. Resin epoksi ini dirancang untuk memenuhi berbagai kebutuhan industri dengan mengadaptasi jumlah gugus epoksi yang sesuai. Secara umum, berat ekuivalen rata-rata dari resin epoksi adalah sekitar 185, sedangkan berat molekulnya berkisar antara 900 hingga 3000 gram per mol [35]. Gugus epoksi memiliki kemampuan untuk bereaksi dengan agen pengeras yang sesuai atau katalis dalam proses yang dikenal sebagai homopolimerisasi. Reaksi ini menghasilkan polimer dengan berat molekul yang tinggi. Selama proses curing, yaitu proses pengerasan resin, gugus epoksi berikatan silang dengan gugus-gugus lain, membentuk jaringan polimer termoset yang sangat stabil. Struktur termoset ini memiliki sifat kekuatan kohesif dan adhesif yang sangat baik, yang memberikan daya rekat dan ketahanan yang tinggi pada material akhir. Setelah proses curing selesai, polimer epoksi yang terbentuk memiliki karakteristik yang kuat dan stabil secara kimiawi, membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi industri yang membutuhkan material dengan ketahanan dan kekuatan tinggi. Namun, istilah

"epoksi" juga dapat merujuk pada resin epoksi yang digunakan dalam konteks yang berbeda, seperti dalam material termoplastik atau resin yang belum menjalani proses curing (Gambar 2.5) [33].



Gambar 2.5 Struktur Molekul Resin Epoksi [36]

2.5 Metode Sintesis

Pada pembuatan komposit terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, yaitu:

2.5.1 *Hand Lay-Up*

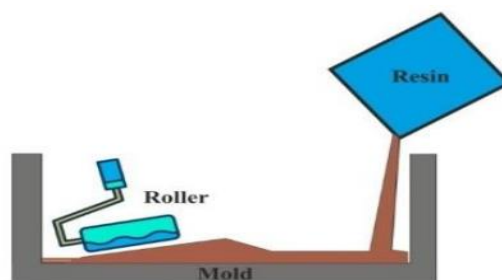
Metode ini berprinsip pada pelapisan serat penguat menggunakan matriks polimer dari golongan termoset dengan bantuan rol yang dioperasikan secara manual. Salah satu keunggulan utama dari metode ini adalah penggunaan peralatan yang sangat minim, jika dibandingkan dengan metode lain yang mungkin memerlukan peralatan yang lebih kompleks dan mahal. Selain itu, proses pelapisan ini juga berlangsung relatif singkat, yang membuatnya efisien dari segi waktu. Namun, meskipun memiliki beberapa kelebihan, metode ini juga memiliki sejumlah kelemahan. Salah satu kelemahan utamanya adalah rendahnya konsistensi dan kualitas hasil akhir dibandingkan dengan metode lain. Hal ini disebabkan oleh tantangan dalam mempertahankan tekanan yang konsisten selama proses pelapisan. Ketidakmampuan untuk memberikan tekanan yang merata dapat

menyebabkan impregnasi serat penguat dengan matriks polimer tidak terjadi secara homogen, sehingga menghasilkan komposit dengan kualitas yang bervariasi. Masalah lain yang mungkin muncul adalah tingginya jumlah voids atau rongga udara dalam komposit. Selama proses pengerolan, udara seringkali terjebak dalam matriks polimer, yang dapat memperburuk masalah konsistensi dan kekuatan akhir dari komposit [37].

Komposit berkinerja tinggi terdiri dari bahan matriks yang diperkuat oleh lapisan serat yang disejajarkan. Serat-serat inilah yang memberikan komposit sifat struktural yang sangat baik, tetapi juga membuatnya secara inheren rumit untuk diproduksi karena harus dibangun lapis demi lapis. Proses pembuatan yang dikenal sebagai "*hand lay-up*" melibatkan peletakan secara manual lapisan individu atau "lapisan" dari suatu bentuk penguatan yang dikenal sebagai "*prepreg*". Ini terdiri dari ribuan serat, yang sebelumnya diresapi dengan resin dan dibundel menjadi *tows* dan disusun baik dalam satu lapis searah atau ditenun bersama. Proses *lay-up* melibatkan memanipulasi setiap lapisan menjadi bentuk dengan tangan dan kemudian menempel kuat pada lapisan sebelumnya atau permukaan cetakan tanpa meninggalkan udara terjebak di antara lapisan [38]. Proses *hand lay-up* dilakukan peletakan manual. Tekanan tangan atau rol menghilangkan udara yang terperangkap.

Langkah pertama dalam proses ini adalah meratakan resin yang berfungsi sebagai matriks di dinding cetakan. Setelah resin merata, langkah berikutnya adalah menempatkan lapisan penguat atau reinforce ke dalam cetakan. Setelah lapisan penguat ditempatkan, lapisan tersebut kemudian

ditutup kembali dengan resin termoset atau resin serupa, yang kemudian diratakan menggunakan kuas. Proses ini memastikan bahwa penguat sepenuhnya terlapisi dan terbenam dalam resin, membentuk komposit yang kokoh. Pada tahap berikutnya, lapisan kedua dari resin dioleskan dengan cara yang sama. Namun, untuk lapisan kedua ini, perlu ada sedikit tekanan saat meratakan resin menggunakan kuas untuk memastikan bahwa udara yang terperangkap dapat dihindari. Terperangkapnya udara dapat menyebabkan rongga dalam komposit, yang pada akhirnya dapat mengurangi kekuatan dan integritas struktural dari material. Oleh karena itu, menghindari terjebaknya udara sangat penting untuk memastikan kekuatan dan kualitas komposit yang dihasilkan. Setelah mencapai ketebalan yang diinginkan, komposit dibiarkan mengering pada suhu ruang atau suhu tertentu yang telah ditetapkan. Proses pengeringan ini memungkinkan resin untuk mengeras dan membentuk struktur akhir yang diperlukan. Setelah proses pengerasan selesai, komposit kemudian dikeluarkan dari cetakan dan dapat diproses lebih lanjut sesuai kebutuhan aplikasi. Dalam metode hand lay-up, rasio komposit yang digunakan biasanya adalah sekitar 61% serat dan 39% resin berdasarkan fraksi massa, atau 46% serat dan 54% resin berdasarkan fraksi volume [39].



Gambar 2.6 Proses *Hand Lay-Up* [40]

2.5.2 Vacuum Bag

Metode vacuum bag merupakan salah satu teknik manufaktur yang sangat populer dan sering digunakan, selain metode hand lay-up. Metode ini diterapkan karena menawarkan beberapa keuntungan signifikan dalam proses pembuatan komposit. Salah satu manfaat utama dari penggunaan metode vacuum bag adalah kemampuannya untuk mengurangi waktu manufaktur secara keseluruhan. Dengan mengoptimalkan proses pengeringan dan pengerasan, metode ini memungkinkan produksi yang lebih efisien dan cepat. Selain pengurangan waktu manufaktur, metode vacuum bag juga efektif dalam mengatasi masalah umum seperti gelembung udara dan kerutan yang dapat muncul pada hasil akhir. Proses vakum yang diterapkan dalam metode ini bekerja untuk mengeluarkan udara yang terperangkap di dalam lapisan komposit, yang membantu mengurangi pembentukan gelembung dan menghindari kerutan yang dapat merusak tampilan dan kualitas material akhir. Lebih jauh lagi, metode vacuum bag meningkatkan kekuatan tarik dan kekuatan lentur komposit secara signifikan jika dibandingkan dengan metode hand lay-up. [41]. Metode vacuum bag adalah sebuah teknik pembuatan komposit yang melibatkan penggunaan tekanan atmosfer untuk menekan lapisan-lapisan material yang digunakan dalam proses tersebut. Dalam teknik ini, lapisan-lapisan komposit ditempatkan di dalam kantong plastik yang sepenuhnya kedap udara. Proses dimulai dengan menutup kantong plastik secara rapat untuk memastikan tidak ada udara yang dapat masuk. Setelah

kantong plastik tertutup, langkah selanjutnya adalah melakukan proses vakum di dalam kantong tersebut. Proses vakum ini bertujuan untuk mengurangi tekanan di dalam kantong plastik sehingga tekanan atmosfer di luar kantong menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan di dalam kantong. Perbedaan tekanan ini menyebabkan lapisan-lapisan komposit yang ada di dalam kantong terdorong atau ditekan secara merata oleh tekanan atmosfer [42].

Penekanan laminasi komposit memiliki beberapa fungsi penting yang berkontribusi pada kualitas dan performa akhir dari material komposit. Pertama, salah satu fungsi utama dari penekanan ini adalah untuk menghilangkan udara yang terjebak di antara lapisan-lapisan komposit. Udara yang terperangkap dapat menyebabkan cacat seperti gelembung atau rongga yang dapat mempengaruhi kekuatan dan integritas material, sehingga menghilangkannya sangat penting untuk mendapatkan hasil akhir yang berkualitas tinggi. Kedua, penekanan laminasi berfungsi untuk memadatkan lapisan serat, yang penting untuk memastikan transmisi gaya yang efisien di antara bundel serat. Dengan memadatkan lapisan serat, penekanan ini membantu mencegah pergeseran orientasi serat selama proses penyembuhan, yang dapat mempengaruhi kekuatan dan stabilitas komposit. Penekanan yang merata memastikan bahwa serat tetap pada posisi yang diinginkan, sehingga meningkatkan performa mekanik dari komposit. Ketiga, penekanan ini juga membantu mengurangi kelembaban yang mungkin ada di dalam lapisan komposit. Kelembaban yang terperangkap dapat mengurangi kekuatan dan

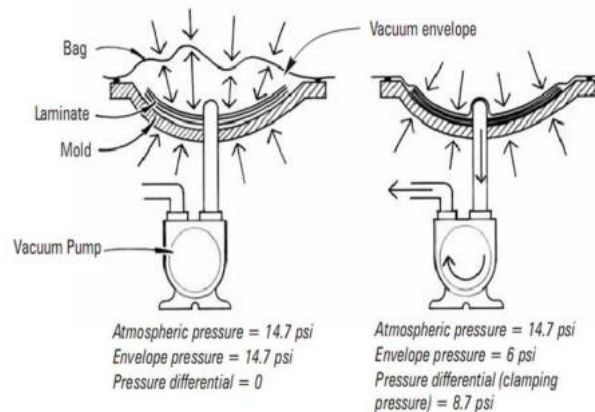
ketahanan material, sehingga pengurangan kelembaban adalah langkah penting dalam proses pembuatan komposit. Teknik vacuum bag, yang merupakan metode yang digunakan untuk penekanan ini, mengoptimalkan rasio serat ke resin dalam komposit. Saat laminasi disegel dalam kantong plastik, tekanan udara di dalam cetakan dan di luar cetakan adalah sama, sekitar 14,7 psi, yang merupakan tekanan atmosfer. Setelah kantong plastik tertutup rapat, pompa vakum diaktifkan untuk mengurangi tekanan di dalam cetakan, sementara tekanan di luar cetakan tetap pada 14,7 psi. Perbedaan tekanan ini menciptakan gaya dorong yang mendorong lapisan komposit ke arah yang merata, sehingga menghasilkan pepadatan yang konsisten dan berkualitas tinggi [5].

Tekanan atmosfer memiliki peran penting dalam proses penekanan laminasi komposit, karena ia bekerja secara seragam di seluruh sisi cetakan, termasuk di atas permukaan cetakan. Ketika cetakan disiapkan, perbedaan tekanan antara bagian dalam cetakan dan tekanan atmosfer di luar cetakan menciptakan gaya yang diperlukan untuk menekan laminasi dengan efektif. Selama proses ini, vakum berfungsi untuk mengurangi tekanan di dalam cetakan. Jika sistem vakum berfungsi dengan optimal, udara yang terperangkap di dalam cetakan akan dihilangkan, dan tekanan di dalam cetakan dapat turun secara signifikan. Dengan demikian, seluruh sisi cetakan mengalami tekanan yang konsisten, yakni sekitar 14,7 psi, yang merupakan tekanan atmosfer. Namun, selama proses vakum, perbedaan antara tekanan di dalam cetakan dan tekanan atmosfer di luar cetakan menciptakan gaya

penekanan yang dapat bervariasi. Biasanya, perbedaan tekanan ini berkisar antara 6 hingga 12,5 psi [5].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, metode *vacuum bag* dinilai dapat meningkatkan efektifitas dari segi waktu pembuatan dibandingkan dari metode *hand lay-up* dengan didapatkan waktu 35,2% lebih cepat [43]. Berdasarkan penelitian sebelumnya juga, tegangan tarik spesimen komposit dengan metode fabrikasi *vacuum bag* lebih tinggi dari spesimen dengan metode fabrikasi *had lay-up*. Kenaikan nilai tegangan tarik tersebut mencapai 29,41%. Regangan tarik menggunakan metode *vacuum bag* juga menunjukkan angka yang lebih tinggi dari spesimen *hand lay-up* dengan persentasi kenaikan sebesar 8.47%. Modulus elastisitas atau modulus young menggunakan *vacuum bag* menunjukkan nilai yang lebih besar dari material spesimen *hand lay-up* dengan kenaikan sebesar 19.30%. Berdasarkan data yang telah disebutkan, persentasi kekuatan mekanik spesimen komposit hasil cetak metode *vacuum bag* lebih kuat dari spesimen komposit dengan metode cetak *hand lay-up* [44].

Parameter kunci yang perlu dipertimbangkan ketika menggunakan *vacuum bag* yaitu tekanan vakum, kapasitas pompa vakum, *gauge vacuum*, material kantong, material *breather* dan *bleeder*, waktu dan suhu pengerasan, dan pita *sealant* [45]. Contoh proses *vacuum bag* dapat dilihat pada (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Proses *Vacuum Bag* [46]

2.6 Pengujian dan Karakterisasi Sampel

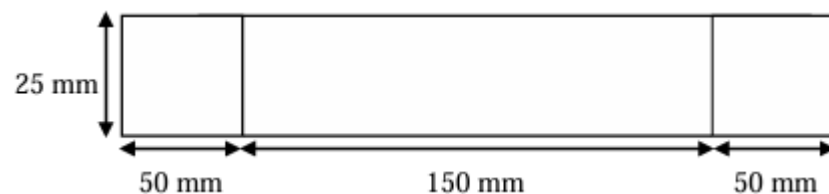
Pada penelitian ini, jenis pengujian yang dilakukan yaitu uji tarik dan uji lentur. Sedangkan karakterisasi yang dilakukan yaitu SEM (*Scanning Electron Microscope*).

2.6.1 Uji Tarik

Pengujian tarik memiliki tujuan untuk mengetahui sifat atau nilai kekuatan tarik pada suatu material. Prinsip dasar dari pengujian tarik melibatkan pemberian beban tarik uniaxial pada spesimen, di mana beban ini secara bertahap ditingkatkan secara kontinu selama pengujian berlangsung. Proses ini dilakukan dengan tujuan untuk mengamati bagaimana spesimen mengalami deformasi seiring dengan peningkatan beban. Selama pengujian, deformasi yang dialami oleh material dapat dipantau dan dianalisis melalui kurva tegangan-regangan (*stress-strain curve*), yang menggambarkan hubungan antara tegangan yang diterima material dan regangan yang terjadi pada material tersebut. Kurva tegangan-regangan memberikan informasi yang

sangat penting tentang perilaku mekanik material saat dikenai beban tarik. Melalui kurva ini, berbagai karakteristik mekanik material dapat diidentifikasi, termasuk kekuatan tarik maksimum atau Ultimate Tensile Strength (UTS). Kekuatan tarik maksimum adalah salah satu parameter utama yang diukur dalam pengujian tarik, dan ini merujuk pada tingkat tegangan tertinggi yang dapat diterima oleh material sebelum mengalami kegagalan atau perpatahan [2,47].

Setiap pengujian tarik yang dilakukan harus mengacu pada standar tertentu. Untuk jenis komposit PMC, standar yang digunakan yaitu ASTM D3039 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*). Adapun bentuk sampel uji tarik dengan standar ASTM D3039 ialah persegi panjang dengan dimensi 250 mm (panjang) dan 25 mm (lebar) yang dapat dilihat pada (Gambar 2.8).

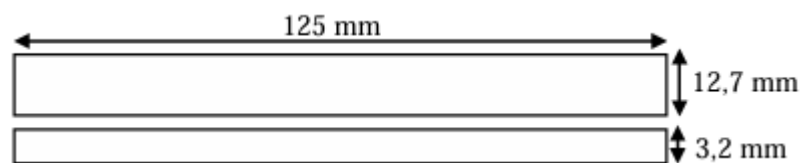


Gambar 2.8 Sampel Uji Tarik Komposit Sesuai ASTM D3039 [48]

Pengujian tarik diawali dengan menempatkan sampel pada penjepit atau *grip* mesin uji tarik. Jarak antarkedua *grip* dengan ujung permukaan penjepit harus disesuaikan. Selanjutnya pemegang sampel dikencangkan agar tidak terjadi selip selama pengujian. Setelah itu kecepatan alat uji diatur, lalu dilakukan pencatatan terhadap beban dan perpanjangan sampel pada titik luluh maupun patah.

2.6.2 Uji Lentur

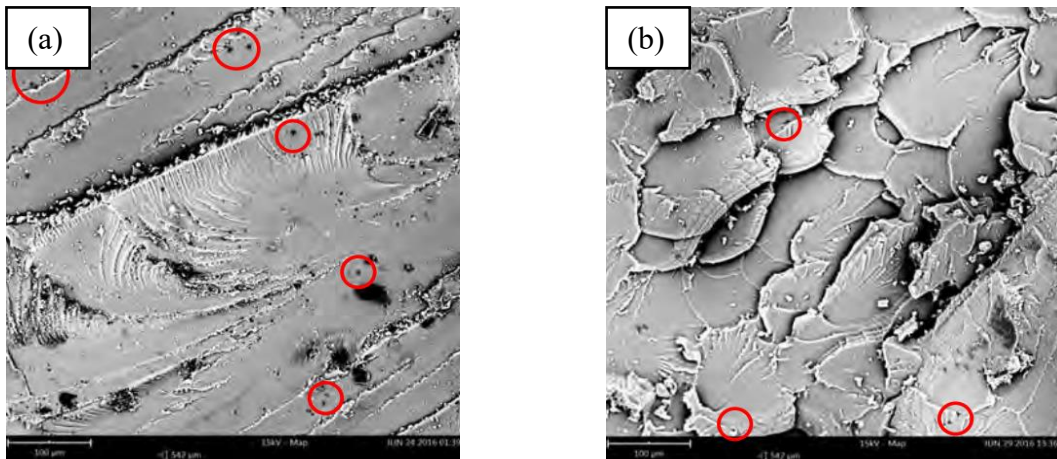
Uji lentur adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengukur kemampuan suatu benda uji dalam menahan gaya yang diterapkan secara tegak lurus terhadap sumbu benda tersebut. Dalam uji ini, benda uji diletakkan pada dua titik tumpuan atau perletakan yang strategis, dan gaya dikenakan pada benda uji dalam arah yang tegak lurus terhadap panjang sumbu benda tersebut. Selama pengujian, gaya tersebut terus ditingkatkan hingga benda uji mencapai titik di mana materialnya mengalami patah atau kerusakan. Salah satu parameter penting yang diukur dalam uji lentur adalah kuat lentur, yang juga dikenal sebagai Modulus of Rupture (MOR). MOR merujuk pada kemampuan material untuk menahan deformasi atau perubahan bentuk ketika berada di bawah beban yang diterapkan. Ini menggambarkan seberapa baik material dapat menahan gaya lentur sebelum akhirnya patah atau hancur [49]. Pengujian lentur yang akan dilakukan terhadap sampel komposit menggunakan standar ASTM D790. Pada standar ini, spesimen uji yang dibuat berdimensi 125 x 12,7 x 3,2 mm (Gambar 2.9).



Gambar 2.9 Sampel Uji Lentur Komposit Sesuai ASTM D790 [48]

2.6.3 Karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Karakterisasi material menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah teknik yang sangat berguna untuk menganalisis berbagai aspek struktural dan komposisional dari material. Metode ini memungkinkan pengamatan rinci mengenai bentuk dan struktur topografi permukaan material, cacat atau kerusakan dalam struktur, serta bentuk dan ukuran butiran material. Selain itu, SEM juga dapat digunakan untuk mendeteksi komposisi unsur serta adanya kontaminan atau cemaran dalam material tersebut. Hasil dari proses karakterisasi menggunakan SEM berupa Scanning Electron Micrograph, yaitu gambar yang menampilkan struktur permukaan material dalam bentuk tiga dimensi. Gambar ini memungkinkan analisis dengan perbesaran yang sangat tinggi, mulai dari 1.000 hingga 40.000 kali lipat dari ukuran aslinya. Dengan kemampuan perbesaran yang sangat besar, SEM dapat menunjukkan detail-detail halus dari permukaan material yang mungkin tidak terlihat dengan mikroskop optik biasa. Selain itu, untuk analisis komposisi kimia, teknik Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) sering digunakan bersamaan dengan SEM [50]. Pada penelitian ini, karakterisasi SEM dilakukan untuk melihat struktur mikro pada patahan sampel yang telah dilakukan uji tarik (Gambar 2.10).



Gambar 2.10 Mikrograf SEM Perbesaran 500x Polimer Blend (a) Epoksi (100), (b) Vinil Ester (100) [30]

Patahan hasil uji tarik di atas terlihat adanya beberapa *void* yang terbentuk dikarenakan oleh adanya gelembung udara atau *bubble* yang terjebak pada saat proses pencampuran antara matriks dengan penguat. Hasilnya bahwa pada resin epoksi terlihat lebih banyak *void* yang tercipta dibandingkan dengan resin vinil ester. Dengan adanya *void* tersebut menyebabkan adanya penurunan pada sifat mekanik [30]

2.7 Analisa Kegagalan

Analisis kegagalan adalah sebuah metode investigasi yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab dari terjadinya kegagalan dalam suatu sistem atau material. Proses ini dimulai dengan pengumpulan fakta-fakta dan data terkait dari kejadian kegagalan, yang kemudian dianalisis untuk menemukan akar permasalahan yang menyebabkan kegagalan tersebut. Secara umum, kegagalan dapat disebabkan oleh berbagai faktor, di antaranya adalah kesalahan dalam pemilihan bahan, kekurangan pada desain, cacat dalam proses pembuatan, serta

masalah yang muncul selama operasional, perbaikan, dan pemeliharaan. Masing-masing faktor ini dapat berkontribusi pada terjadinya kegagalan dan perlu diperiksa dengan cermat untuk memahami sepenuhnya penyebabnya. Dalam analisis kegagalan, mekanisme patahan atau retak merupakan aspek fundamental yang sering dijadikan dasar untuk menilai kerusakan material. Analisis ini sering digunakan untuk menentukan ukuran dan karakteristik dari retak atau kerusakan yang muncul, serta untuk menilai dampaknya terhadap kinerja komponen atau sistem. Selain itu, analisis kegagalan juga berperan dalam menentukan kondisi kritis di mana kerusakan dapat terjadi, baik di bawah kondisi normal maupun dalam situasi yang ekstrem [51].

Patahan pada material dapat dikategorikan berdasarkan dua kriteria utama, yaitu patahan ductile dan patahan brittle, masing-masing dengan karakteristik dan penyebab yang berbeda. Patahan ductile biasanya terjadi pada kondisi suhu tinggi. Pada jenis patahan ini, proses kegagalan sering kali melibatkan fenomena yang disebut sebagai "microvoid coalescence" atau penggabungan microvoid. Selama proses kegagalan ductile, material mengalami deformasi plastis yang menyebabkan terbentuknya microvoids (rongga mikro) yang kemudian bergabung satu sama lain. Akumulasi dan penggabungan rongga-rongga kecil ini akhirnya menyebabkan material patah, tetapi dengan terlebih dahulu mengalami deformasi yang signifikan. Di sisi lain, patahan brittle cenderung terjadi pada suhu rendah. Patahan brittle ditandai dengan mekanisme kegagalan yang dikenal sebagai "transgranular cleavage" atau pembelahan kristal intragranular. Dalam kasus ini, material mengalami pecah yang lebih kaku dan retak terjadi sepanjang batas-batas kristal

tanpa mengalami deformasi plastis yang berarti. Jika ada pembelahan transgranular, retakan akan mengikuti garis batas kristal, menghasilkan garis-garis atau retakan awal sepanjang batas tersebut, dan kemudian perambatan retakan akan membentuk pola crack propagation baru yang memperluas kerusakan di material. [52].