

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan landasan teoritis dan tinjauan penelitian terdahulu yang relevan dengan studi eksperimental komposit berbasis metode vakum. Pembahasan diawali dengan definisi dan klasifikasi material komposit, dilanjutkan dengan penjelasan mengenai material penyusun, yaitu serat sebagai penguat dan resin sebagai matriks. Selain itu, dibahas pula metode fabrikasi berbasis vakum, konsep fraksi volume, serta standar dan parameter dalam pengujian tarik komposit.

2.1 Material Komposit

Material komposit merupakan material yang tersusun atas dua atau lebih material berbeda yang dikombinasikan untuk menghasilkan sifat yang lebih baik dibandingkan sifat masing-masing material penyusunnya secara terpisah (Callister & Rethwisch, 2020; Mallick, 2021). Secara umum, material komposit terdiri atas dua komponen utama, yaitu matriks (*matrix*) dan penguat (*reinforcement*). Matriks berfungsi sebagai pengikat serat, menjaga bentuk komposit, serta mendistribusikan beban ke material penguat, sedangkan penguat berperan sebagai komponen utama yang memberikan kekuatan dan kekakuan pada komposit.

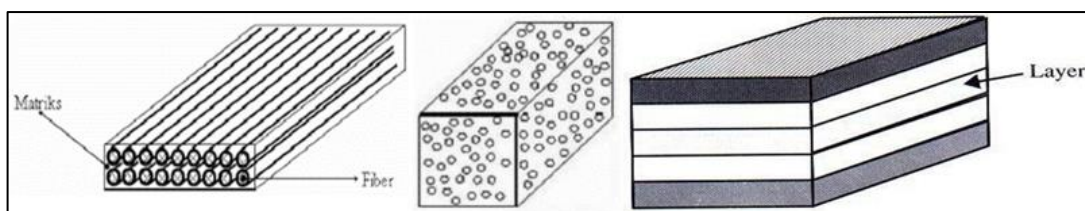
Penggunaan material komposit terus berkembang pada berbagai bidang rekayasa, seperti industri otomotif, dirgantara, kelautan, dan konstruksi, karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta fleksibilitas dalam menyesuaikan karakteristik

mekanik sesuai kebutuhan aplikasi. Sifat mekanik komposit dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya jenis material penguat, jenis matriks, fraksi *volume* penyusun, orientasi serat, serta proses fabrikasi yang digunakan (Mallick, 2021).

2.1.1 Definisi dan Klasifikasi Komposit

Komposit didefinisikan sebagai material yang tersusun dari dua atau lebih fase berbeda yang memiliki sifat fisik dan kimia yang tidak sama, namun bekerja secara sinergis untuk menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik. Berdasarkan bentuk dan distribusi penguatnya, komposit dapat diklasifikasikan menjadi komposit serat (*fiber composite*), komposit partikel (*particle composite*), dan komposit laminasi (*laminated composite*) (Hull and Clyne, 1996; Kaw, 2006).

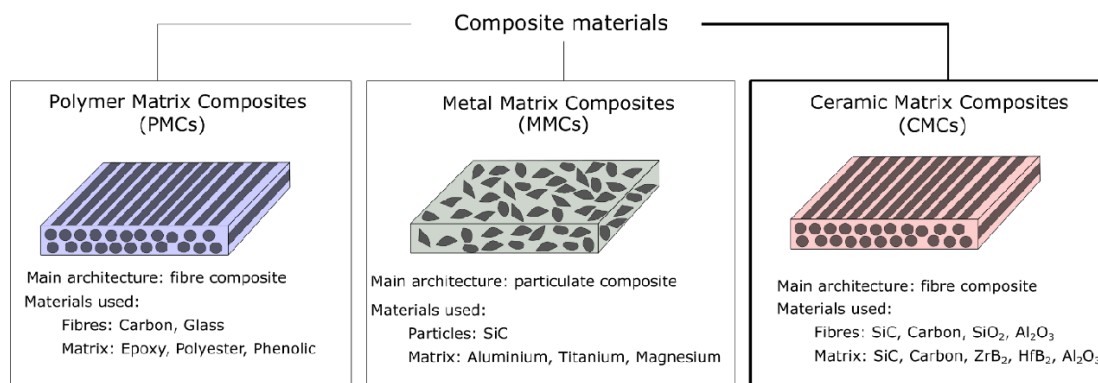
Komposit serat merupakan jenis yang paling umum digunakan karena memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi, di mana serat berfungsi sebagai penahan beban utama. Komposit partikel menggunakan partikel sebagai penguat yang tersebar dalam matriks, sedangkan komposit laminasi terdiri dari beberapa lapisan yang disusun secara berurutan untuk meningkatkan sifat mekanik tertentu.



Gambar 2.1 Skema komposit serat, komposit partikel dan komposit laminasi

Sumber: *Preparation and characterization of polymer matriks composite using natural fiber lantana-camara* (2014)

Selain itu, komposit juga dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis matriksnya, yaitu komposit berbasis polimer, logam, dan keramik. Komposit berbasis polimer merupakan jenis yang paling banyak digunakan (Mallick, 2007). karena proses fabrikasinya relatif mudah dan memiliki sifat mekanik yang baik.



Gambar 2.2 Klasifikasi komposit berdasarkan pengikatnya

Sumber: <https://www.semanticscholar.org/> *The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity* (2019)

2.1.2 Komponen Penyusun Komposit

Material komposit pada umumnya tersusun atas dua komponen utama, yaitu matriks (*matrix*) dan penguat (*reinforcement*). Kedua komponen tersebut memiliki fungsi yang berbeda, namun saling melengkapi sehingga menghasilkan material dengan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan material penyusunnya secara terpisah (Daniel & Ishai, 2006; Mallick, 2021).

Matriks berfungsi sebagai pengikat material penguat, menjaga posisi dan orientasi serat, melindungi serat dari pengaruh lingkungan maupun kerusakan mekanis, serta mendistribusikan beban yang diterima menuju material penguat. Pada komposit berbasis polimer, matriks umumnya menggunakan resin termoset, seperti resin epoksi, karena memiliki daya rekat yang baik, mudah diproses, serta mampu

menghasilkan ikatan yang kuat dengan serat penguat (Mallick, 2021).

Penguat merupakan komponen utama yang berperan dalam menahan beban sehingga sangat menentukan kekuatan, kekakuan, dan ketangguhan komposit. Material penguat dapat berupa serat maupun partikel dengan bentuk, orientasi, dan susunan tertentu sesuai kebutuhan aplikasi. Kualitas komposit sangat dipengaruhi oleh ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara matriks dan penguat, karena ikatan yang baik akan menghasilkan transfer beban yang lebih efektif serta meningkatkan sifat mekanik komposit secara keseluruhan (Gibson, 2016).

Berdasarkan fungsi masing-masing komponen tersebut, pemilihan jenis matriks dan material penguat menjadi salah satu faktor penting dalam proses perancangan komposit. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan resin epoksi sebagai matriks serta serat non-alam dan serat alam sebagai material penguat yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

2.1.3 Keunggulan Komposit Berbasis Serat Alam

Pengembangan komposit berbasis serat alam semakin meningkat sebagai upaya menghasilkan material yang tidak hanya memiliki performa mekanik yang baik, tetapi juga lebih berkelanjutan. Penggunaan serat alam sebagai material penguat menawarkan berbagai keunggulan, di antaranya berasal dari sumber daya yang terbarukan (*renewable*), memiliki densitas yang relatif rendah, mudah terurai secara alami (*biodegradable*), serta memberikan dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan serat sintetis (Pickering, Efendy, & Le, 2016).

Selain aspek lingkungan, serat alam juga memiliki biaya yang relatif lebih ekonomis, mudah diperoleh, serta memerlukan energi produksi yang lebih rendah

dibandingkan serat non-alam. Karakteristik tersebut menjadikan serat alam sebagai alternatif yang menarik untuk dikembangkan pada berbagai aplikasi komposit, khususnya yang mengutamakan efisiensi material dan keberlanjutan (Fiore et al., 2020).

Meskipun demikian, serat alam umumnya memiliki kekuatan mekanik, stabilitas dimensi, serta ketahanan terhadap kelembapan yang lebih rendah dibandingkan serat sintesis. Oleh karena itu, salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah penggunaan komposit hibrida (*hybrid composite*), yaitu dengan mengombinasikan serat alam dan serat non-alam sehingga diharapkan dapat memanfaatkan keunggulan masing-masing material. Pada penelitian ini, pendekatan tersebut diterapkan melalui kombinasi beberapa jenis serat alam dan serat non-alam untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kekuatan tarik komposit.

2.2 Material Penyusun Komposit Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini merupakan komponen utama dalam proses fabrikasi komposit yang terdiri atas material penguat (*reinforcement*) dan matriks (*matrix*). Pemilihan material didasarkan pada karakteristik mekanik, kemudahan proses fabrikasi, serta kesesuaiannya dengan tujuan penelitian, yaitu menganalisis pengaruh variasi metode impregnasi dan kombinasi serat terhadap kekuatan tarik komposit (Mallick, 2021).

Material penguat yang digunakan terdiri atas serat non-alam dan serat alam. Serat non-alam meliputi *fiberglass*, serat karbon (*carbon fiber*), dan kevlar yang digunakan sebagai penguat tunggal, sedangkan serat alam meliputi serat rami, serabut kelapa, dan serat pelepah pisang yang digunakan sebagai penguat pada komposit

hibrida melalui kombinasi dengan serat non-alam. Penggunaan variasi tersebut bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi serat terhadap sifat mekanik komposit yang dihasilkan.

Matriks yang digunakan dalam penelitian ini adalah resin epoksi yang dipadukan dengan *hardener* sesuai perbandingan yang direkomendasikan oleh pabrikan. Seluruh proses fabrikasi dilakukan menggunakan metode *vacuum bagging* dengan dua variasi metode impregnasi, yaitu impregnasi *hand lay* dan impregnasi vakum. Uraian mengenai karakteristik, fungsi, serta peran masing-masing material penyusun komposit dalam penelitian ini dijelaskan pada subbab berikutnya.

2.2.1 Serat Non-Alam dan Serat Alam sebagai Penguat

Material penguat (*reinforcement*) merupakan komponen utama yang berfungsi menahan beban serta menentukan kekuatan dan kekakuan material komposit. Pada penelitian ini, material penguat yang digunakan terdiri atas serat non-alam dan serat alam. Serat non-alam dipilih karena memiliki kekuatan mekanik, kekakuan, dan stabilitas dimensi yang tinggi, sedangkan serat alam digunakan sebagai alternatif material penguat yang memiliki massa jenis rendah, bersifat terbarukan (*renewable*), serta lebih ramah lingkungan (Pickering et al., 2016; Mallick, 2021).

Serat alam yang digunakan merupakan serat berbasis lignoselulosa yang tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Kandungan selulosa memberikan kontribusi terhadap kekuatan tarik serat, sedangkan keberadaan lignin dan hemiselulosa memengaruhi sifat mekanik serta kemampuan ikatan dengan matriks. Namun, sifat serat alam yang higroskopis menyebabkan daya ikat terhadap matriks relatif lebih rendah dibandingkan serat sintetis, sehingga pada umumnya diperlukan

perlakuan awal untuk meningkatkan kualitas ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara serat dan matriks (Fiore et al., 2020).

Di sisi lain, serat non-alam yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas *fiberglass*, serat karbon (*carbon fiber*), dan kevlar. Sementara itu, serat alam yang digunakan meliputi serat rami, serabut kelapa, dan serat pelepah pisang yang dikombinasikan dengan serat non-alam untuk membentuk komposit hibrida. Penggunaan kedua jenis serat tersebut bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi serat terhadap kekuatan tarik komposit yang dihasilkan.



Gambar 2.3 Serat penguat (serat rami dan *fiberglass*)

Sumber: *shopee.com* (2026)

2.2.2 Resin Sebagai Matriks

Matriks yang digunakan dalam penelitian ini adalah resin epoksi (*epoxy resin*), yaitu resin termoset yang berfungsi sebagai pengikat utama dalam struktur komposit. Resin epoksi berperan mengikat material penguat, mempertahankan posisi dan orientasi serat, melindungi serat dari pengaruh lingkungan, serta mentransfer beban dari matriks menuju serat sehingga komposit mampu bekerja sebagai satu kesatuan struktur (Mallick, 2021).

Resin epoksi banyak digunakan pada fabrikasi komposit karena memiliki sifat

mekanik yang baik, daya rekat (*adhesion*) yang tinggi terhadap berbagai jenis serat, ketahanan yang baik terhadap bahan kimia, serta penyusutan (*shrinkage*) yang relatif rendah selama proses *curing*. Karakteristik tersebut memungkinkan terbentuknya komposit dengan stabilitas dimensi yang baik serta ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) yang kuat antara matriks dan material penguat (Gibson, 2016).

Dalam proses impregnasi, resin epoksi memiliki viskositas yang sesuai untuk meresap ke dalam susunan serat, sehingga dapat digunakan baik pada metode impregnasi *hand lay* maupun impregnasi vakum. Pada metode *hand lay*, resin diaplikasikan secara manual ke setiap lapisan serat untuk memperoleh distribusi resin yang merata, sedangkan pada impregnasi vakum resin dialirkan ke dalam susunan serat dengan bantuan tekanan negatif. Kemampuan resin dalam membasahi (*wetting*) permukaan serat menjadi salah satu faktor yang memengaruhi kualitas laminasi dan pembentukan ikatan antara matriks dengan serat (Kabir et al., 2022).

Sebelum digunakan, resin epoksi dicampurkan dengan *hardener* sesuai perbandingan yang direkomendasikan oleh pabrikan untuk memicu reaksi polimerisasi (*curing*). Reaksi tersebut menghasilkan struktur polimer tiga dimensi yang bersifat kaku dan permanen sehingga komposit memiliki kekuatan, kekakuan, dan ketahanan yang baik terhadap pembebanan mekanik. Berdasarkan karakteristik tersebut, resin epoksi dipilih sebagai matriks dalam penelitian ini karena sesuai dengan proses fabrikasi *vacuum bagging* serta mampu menghasilkan ikatan yang baik dengan serat non-alam maupun serat alam.

2.3 Bahan Tambahan

Selain material utama berupa penguat (*reinforcement*) dan matriks (*matrix*),

proses fabrikasi komposit juga memerlukan beberapa bahan tambahan untuk mendukung keberhasilan proses fabrikasi. Bahan tambahan tersebut berperan dalam membantu proses pembentukan komposit, proses pelepasan hasil cetakan (*demoulding*), serta memastikan proses fabrikasi berlangsung secara optimal sehingga diperoleh kualitas laminasi yang baik (Mallick, 2021).

Penggunaan bahan tambahan yang sesuai dapat meningkatkan kualitas hasil fabrikasi, mengurangi potensi terjadinya cacat fabrikasi, serta mendukung proses pembentukan komposit secara lebih efisien. Pada penelitian ini, bahan tambahan yang digunakan terdiri atas hardener sebagai agen pengeras yang memicu proses *curing* resin epoksi dan *Polyvinyl Alcohol* (PVA) sebagai *release agent* untuk mempermudah pelepasan komposit dari cetakan tanpa merusak permukaan hasil fabrikasi. karakteristik dan fungsi masing-masing bahan tambahan dijelaskan pada subbab berikutnya.

2.3.1 Hardener

merupakan bahan tambahan yang berfungsi sebagai agen pengeras (*curing agent*) pada sistem resin termoset, khususnya resin epoksi. *Hardener* bereaksi secara kimia dengan resin epoksi melalui proses polimerisasi (*curing*) sehingga membentuk struktur polimer tiga dimensi (*cross-linked polymer*) yang bersifat kaku, stabil, dan permanen. Proses tersebut mengubah resin yang semula berbentuk cair menjadi material padat dengan sifat mekanik yang sesuai untuk aplikasi komposit (Mallick, 2021).

Keberhasilan proses *curing* sangat dipengaruhi oleh rasio pencampuran antara resin epoksi dan *hardener*. Perbandingan campuran harus mengikuti rekomendasi

pabrikan karena komposisi yang tidak sesuai dapat memengaruhi kualitas komposit yang dihasilkan. Penggunaan *hardener* yang terlalu sedikit dapat menyebabkan proses curing tidak berlangsung sempurna sehingga kekuatan mekanik komposit menurun. Sebaliknya, penggunaan *hardener* yang berlebihan dapat mempercepat reaksi eksotermik (*exothermic reaction*), meningkatkan penyusutan (*shrinkage*), serta berpotensi menimbulkan cacat seperti retak maupun *void* (Pascault & Williams, 2017).

Selain rasio pencampuran, homogenitas campuran resin dan *hardener* juga menjadi faktor penting dalam proses fabrikasi komposit. Pencampuran yang tidak merata dapat menyebabkan sebagian area komposit mengalami curing yang tidak sempurna sehingga menurunkan kualitas ikatan antara matriks dan serat. Oleh karena itu, pada penelitian ini resin epoksi dan *hardener* dicampurkan sesuai rasio yang direkomendasikan oleh pabrikan serta diaduk hingga homogen sebelum digunakan pada proses impregnasi *hand lay* maupun impregnasi vakum.

2.3.2 Polyvinyl Alcohol (PVA)

Polyvinyl Alcohol (PVA) merupakan bahan tambahan yang digunakan sebagai *release agent* dalam proses fabrikasi komposit. PVA diaplikasikan pada permukaan cetakan untuk membentuk lapisan tipis (*release film*) yang berfungsi sebagai pemisah antara komposit dan cetakan, sehingga spesimen dapat dilepaskan setelah proses *curing* tanpa merusak bentuk maupun kualitas permukaannya (Mallick, 2021).

Mekanisme kerja PVA adalah membentuk lapisan pelindung yang mencegah terjadinya ikatan langsung antara resin epoksi dan permukaan cetakan. Dengan adanya lapisan tersebut, risiko komposit menempel pada cetakan dapat diminimalkan sehingga proses *demoulding* menjadi lebih mudah dan aman. Selain itu, penggunaan

PVA secara merata juga membantu menghasilkan permukaan komposit yang lebih halus, mengurangi potensi cacat akibat proses pelepasan, serta memungkinkan cetakan digunakan kembali untuk proses fabrikasi berikutnya (Campbell, 2010).

Pada penelitian ini, PVA diaplikasikan secara merata pada permukaan cetakan kaca berukuran 35×35 cm sebelum proses penyusunan lapisan serat (*lay-up*) dan impregnasi resin dilakukan. Setelah lapisan PVA mengering, proses fabrikasi dilanjutkan menggunakan metode *vacuum bagging*. Penggunaan PVA bertujuan untuk mempermudah pelepasan panel komposit dari cetakan sekaligus menjaga kualitas permukaan panel yang akan dipotong menjadi spesimen uji tarik.

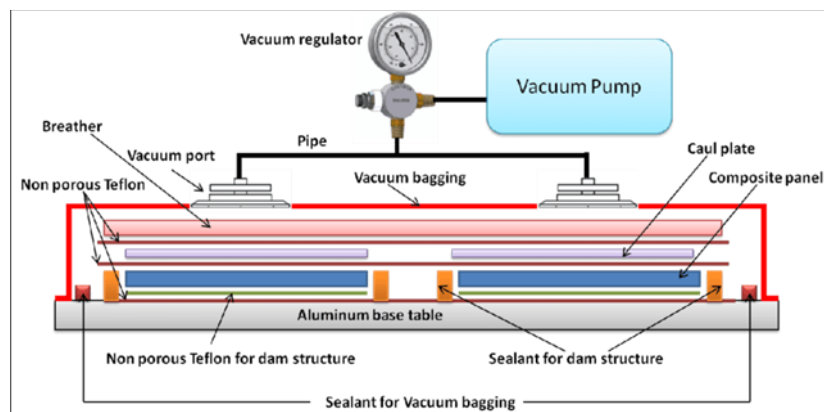
2.4 Metode Fabrikasi *Vacuum Bagging*

Metode Fabrikasi merupakan salah satu faktor yang menentukan kualitas akhir material komposit karena berpengaruh terhadap distribusi resin, kandungan *void*, fraksi volume serat, serta sifat mekanik yang dihasilkan. Salah satu metode fabrikasi yang banyak digunakan pada komposit bermatriks polimer adalah *vacuum bagging*, yaitu metode yang memanfaatkan tekanan negatif (*vacuum pressure*) untuk memberikan tekanan pada susunan laminasi selama proses pembentukan komposit (Mallick, 2021).

Pada metode *vacuum bagging*, seluruh susunan material komposit ditutup menggunakan plastik vakum (*vacuum bag*) yang kedap udara, kemudian udara di dalam sistem dikeluarkan menggunakan pompa vakum. Perbedaan tekanan yang terbentuk menghasilkan gaya tekan yang membantu mengompaksi lapisan serat, mengurangi udara yang terperangkap, serta meningkatkan kontak antara matriks dan material penguat. Kondisi tersebut memungkinkan terbentuknya laminasi yang lebih

rapat dan homogen dibandingkan proses laminasi tanpa bantuan vakum (Campbell, 2010).

Keunggulan metode *vacuum bagging* antara lain mampu menghasilkan distribusi resin yang lebih merata, menurunkan kandungan *void*, meningkatkan fraksi volume serat, serta menghasilkan kualitas permukaan komposit yang lebih baik. Selain itu, metode ini relatif sederhana dan banyak diterapkan pada proses fabrikasi komposit skala laboratorium maupun industri. Pada penelitian ini, *vacuum bagging* digunakan sebagai metode fabrikasi utama dengan dua variasi metode impregnasi, yaitu impregnasi vakum (*vacuum infusion*) dan impregnasi *hand lay*, untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kekuatan tarik komposit.



Gambar 2.4 Skema proses fabrikasi dengan metode *vacuum bagging*

Sumber: *researchgate.net The effects of voids on delamination behavior under static and cyclic mode I and mode II (2013)*

2.4.1 Metode Impregnasi Vakum (*Vacuum Infusion*)

Metode impregnasi vakum (*vacuum infusion*) merupakan teknik impregnasi resin yang memanfaatkan tekanan negatif untuk mengalirkan resin dari wadah menuju susunan serat yang telah ditempatkan di dalam sistem *vacuum bagging*. Setelah seluruh sistem divakum, perbedaan tekanan antara bagian dalam dan luar kantong

vakum menyebabkan resin mengalir melalui media serat hingga seluruh lapisan terimpregnasi secara bertahap (Campbell, 2010; Mallick, 2021).

Prinsip utama metode ini adalah memanfaatkan aliran resin yang dikendalikan oleh tekanan vakum sehingga resin dapat meresap ke dalam serat secara lebih seragam dibandingkan proses impregnasi tanpa bantuan vakum. Selain membantu proses pembasahan (*wetting*) serat, tekanan vakum juga berfungsi mengurangi udara yang terperangkap (*entrapped air*) sehingga kandungan *void* pada komposit dapat diminimalkan. Kualitas impregnasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain viskositas resin, tingkat tekanan vakum, permeabilitas serat, serta jalur aliran resin di dalam sistem (*flow path*) (Campbell, 2010).

Pada penelitian ini, metode impregnasi vakum digunakan sebagai salah satu variasi proses fabrikasi untuk mengevaluasi pengaruh proses impregnasi terhadap kekuatan tarik komposit. Resin dialirkan ke dalam susunan serat melalui tekanan vakum hingga seluruh lapisan terimpregnasi, kemudian proses *curing* dilakukan dengan kondisi yang sama seperti pada variasi metode impregnasi *hand lay* sehingga perbedaan sifat mekanik yang diperoleh terutama dipengaruhi oleh metode impregnasi yang digunakan.

2.4.2 Metode Impregnasi *Hand Lay*

Metode impregnasi *hand lay* merupakan teknik impregnasi yang dilakukan dengan mengaplikasikan resin secara manual ke setiap lapisan serat sebelum proses *vacuum bagging*. Resin diratakan menggunakan alat bantu, seperti kuas atau *roller*, hingga seluruh permukaan serat terbasahi (*wet-out*) secara merata. Setelah proses impregnasi selesai, susunan laminasi kemudian ditutup menggunakan sistem *vacuum*

bagging untuk dilakukan proses kompaksi dan *curing* (Mallick, 2021).

Keunggulan metode *hand lay* terletak pada kemudahan pengendalian distribusi resin selama proses impregnasi. Operator dapat memastikan setiap lapisan serat memperoleh jumlah resin yang cukup sehingga potensi terbentuknya area yang tidak terimpregnasi (*dry spot*) dapat dikurangi. Namun demikian, kualitas hasil impregnasi sangat dipengaruhi oleh keterampilan operator dalam mengatur jumlah resin dan pemerataan impregnasi pada setiap lapisan serat.

Pada penelitian ini, metode *hand lay* digunakan sebagai variasi impregnasi dengan tetap mempertahankan proses fabrikasi menggunakan *vacuum bagging*. Setelah resin diaplikasikan secara manual pada susunan serat, laminasi dikompaksi menggunakan tekanan vakum hingga proses *curing* selesai. Dengan demikian, perbedaan utama antara kedua variasi penelitian terletak pada metode impregnasi resin, sedangkan parameter proses lainnya dibuat sama agar pengaruh metode impregnasi terhadap kekuatan tarik komposit dapat dianalisis secara objektif.

2.5 Pengujian Tarik Material Komposit

Pengujian tarik merupakan salah satu metode pengujian mekanik yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan suatu material dalam menahan beban tarik hingga mengalami deformasi dan akhirnya patah. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban tarik secara bertahap pada spesimen menggunakan mesin uji tarik (*Universal Testing Machine/UTM*) sehingga diperoleh hubungan antara gaya yang diberikan dengan perubahan panjang spesimen. Hubungan tersebut selanjutnya digunakan untuk menghasilkan kurva tegangan–regangan (*stress–strain curve*) yang menggambarkan perilaku mekanik material selama pembebanan (Callister &

Rethwisch, 2020; Gibson, 2016).

Pada material komposit, pengujian tarik digunakan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam mentransfer beban dari matriks ke serat penguat melalui ikatan antarmuka (*interfacial bonding*). Hasil pengujian memberikan beberapa parameter penting, antara lain kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), regangan (*strain*), dan modulus elastisitas (*Young's modulus*). Nilai-nilai tersebut dapat digunakan untuk menilai kualitas laminasi, efektivitas proses impregnasi, serta pengaruh jenis material penguat terhadap performa mekanik komposit (Mallick, 2021).

Dalam penelitian ini, pengujian tarik digunakan untuk membandingkan sifat mekanik komposit yang difabrikasi menggunakan dua metode impregnasi, yaitu impregnasi vakum (*vacuum infusion*) dan impregnasi *hand lay*, serta variasi penggunaan serat non-alam dan komposit hibrida. Hasil pengujian tarik selanjutnya dianalisis untuk menentukan pengaruh metode impregnasi dan kombinasi serat terhadap kekuatan tarik komposit. Pelaksanaan pengujian mengacu pada standar ASTM D638 yang dijelaskan pada subbab berikutnya.

2.5.1 Prinsip Dasar Uji Tarik

Prinsip dasar uji tarik adalah memberikan beban tarik secara bertahap pada spesimen hingga mengalami patah (*fracture*). Selama proses pembebanan, akan terjadi perubahan panjang (*elongation*) yang diukur untuk menentukan hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*).

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tarik (*universal testing machine*) yang mampu merekam gaya dan pertambahan panjang secara kontinu. Data yang

diperoleh kemudian diolah menjadi kurva tegangan-regangan yang menggambarkan perilaku material selama pembebanan.

2.5.2 Deformasi

Deformasi merupakan perubahan bentuk atau dimensi material akibat beban yang diberikan. Secara umum, deformasi total terdiri dari dua komponen utama, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis, yang dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta l_{total} = \Delta l_{elastis} + \Delta l_{plastis} \quad (2.1)$$

Deformasi elastis bersifat sementara, artinya material akan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepas. Sedangkan deformasi plastis bersifat permanen dan menyebabkan perubahan bentuk yang tidak dapat kembali seperti semula.

2.5.3 Parameter Hasil Uji Tarik

Modulus Hasil dari pengujian tarik umumnya dinyatakan dalam beberapa parameter utama, antara lain kekuatan tarik maksimum, tegangan luluh (*yield strength*), regangan, serta modulus elastisitas. Parameter-parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menahan beban serta perilakunya sebelum mengalami kegagalan.

Pada material komposit, parameter tersebut sangat dipengaruhi oleh orientasi serat, distribusi matriks, serta kualitas ikatan antar fasa.

2.5.4 Kekuatan Tarik Maksimum

Kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) merupakan nilai tegangan

maksimum yang dapat ditahan material sebelum mengalami patah. Nilai ini dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (2.2)$$

dimana F_{max} adalah gaya maksimum yang diterima spesimen dan A_0 adalah luas penampang awal.

2.5.5 Tegangan dan Regangan

Tegangan (*stress*) merupakan besarnya gaya yang bekerja pada satuan luas penampang, sedangkan regangan (*strain*) merupakan perbandingan antara perubahan panjang terhadap panjang awal spesimen.

Tegangan dapat dinyatakan sebagai:

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

Sedangkan regangan dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.4)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan akan membentuk kurva yang menunjukkan karakteristik material selama pembebanan.

2.5.6 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas (*Young's modulus*) merupakan ukuran kekakuan material yang menunjukkan kemampuan material dalam menahan deformasi elastis. Nilai modulus elastisitas ditentukan dari hubungan antara tegangan dan regangan pada

daerah elastis atau daerah proporsional material. Pada pengujian tarik, daerah tersebut merupakan bagian awal kurva tegangan–regangan yang menunjukkan hubungan relatif linear antara tegangan dan regangan. Batas daerah proporsional ditentukan berdasarkan gaya proporsional (F_p), yaitu gaya yang digunakan sebagai acuan untuk menentukan batas hubungan linear antara tegangan dan regangan.

Modulus elastisitas dihitung berdasarkan perbandingan perubahan tegangan terhadap perubahan regangan pada daerah proporsional, yang dinyatakan dengan persamaan:

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

Dalam penelitian ini, penentuan modulus elastisitas dilakukan dengan menggunakan titik awal pembebanan hingga titik proporsional yang ditentukan berdasarkan nilai F_p . Karena pada kondisi awal pembebanan nilai tegangan dan regangan dianggap sama dengan nol, maka persamaan modulus elastisitas dapat dituliskan sebagai:

$$E = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_p} \quad (2.6)$$

Semakin besar nilai modulus elastisitas, maka semakin kaku material tersebut.

2.5.7 Standar Uji Tarik

Pengujian tarik pada penelitian ini mengacu pada standar ASTM D638-14, yang merupakan standar pengujian tarik untuk material plastik dan komposit berbasis polimer (ASTM International, 2014). Standar ini mengatur prosedur pengujian, bentuk spesimen, dimensi, serta kondisi pengujian yang harus dipenuhi.

Penggunaan standar ini bertujuan untuk memastikan hasil pengujian yang diperoleh dapat dibandingkan secara ilmiah dan memiliki validitas yang tinggi.

Standar ASTM D638-14 mencakup metode pengujian untuk menentukan sifat tarik material polimer dan komposit dalam kondisi tertentu. Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi respon material terhadap beban tarik statis, termasuk perilaku elastis dan plastis hingga titik kegagalan.

2.5.8 Dimensi Spesimen Uji Tarik

Geometri dan dimensi spesimen uji tarik mengikuti ketentuan yang telah ditetapkan dalam standar ASTM D638-14. Spesimen umumnya berbentuk *dog bone* dengan bagian tengah yang lebih sempit untuk memastikan terjadinya konsentrasi tegangan pada area tersebut.

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under	
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
W_O —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
W_O —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
L_O —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
R_O —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Gambar 2.5 Tabel dimensi spesimen uji tarik ASTM D638

Sumber: ASTM internasional (2014)

2.5.9 Kecepatan Pengujian

Kecepatan pengujian merupakan parameter penting yang dapat mempengaruhi

hasil uji tarik. Standar ASTM D638-14 telah menetapkan rentang kecepatan pengujian yang disesuaikan dengan jenis material dan dimensi spesimen.

Pengaturan kecepatan yang tepat diperlukan untuk memastikan hasil pengujian yang akurat dan konsisten.

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm· min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5)± 25 %	10
	Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %
500 (20) ± 10 %			10
IV		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

Gambar 2.6 Tabel kecepatan pengujian ASTM D638

Sumber: ASTM internasional (2014)