

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan akan sistem struktur ringan pada bidang kedirgantaraan, transportasi, dan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) telah mendorong pengembangan material komposit maju yang mampu memberikan kekuatan spesifik tinggi, kekakuan tinggi, serta keandalan struktural yang lebih baik [1]. Selain mengurangi bobot struktur, material komposit juga diharapkan mampu mempertahankan kapasitas menahan beban (*load-carrying capability*) dan ketahanan terhadap kerusakan (*damage tolerance*) selama mengalami pembebanan tarik maupun lentur pada kondisi operasional. Persyaratan tersebut menjadi sangat penting bagi komponen struktur ringan, seperti *control surfaces*, *fairings*, *access panels*, dan komponen struktural sekunder lainnya yang menuntut efisiensi struktur sekaligus mempertimbangkan biaya manufaktur.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) merupakan salah satu material komposit struktural yang paling banyak digunakan karena memiliki sifat mekanik spesifik yang sangat baik serta ketahanan lelah (*fatigue resistance*) yang tinggi. Meskipun demikian, laminat CFRP konvensional umumnya menunjukkan perilaku elastis linier yang diikuti oleh patah getas (*brittle fracture*) secara tiba-tiba setelah mencapai beban maksimum sehingga hanya memberikan sedikit peringatan sebelum terjadi kegagalan katastropik (*catastrophic failure*) [2]. Karakteristik tersebut membatasi ketahanan struktur terhadap kerusakan dan mendorong pengembangan sistem komposit yang mampu menghasilkan mekanisme kegagalan yang lebih progresif tanpa mengurangi kinerja mekanik secara signifikan.

Pendekatan hibridisasi (*hybridization*) telah banyak diteliti untuk mengombinasikan keunggulan berbagai jenis serat penguat dalam satu sistem laminat [3]. Serat karbon memberikan kekakuan dan kekuatan tarik yang tinggi, sedangkan serat kaca (*fiberglass*) berkontribusi terhadap kapasitas regangan yang lebih besar serta kemampuan penyerapan energi yang lebih baik [4]. Penambahan *Chopped Strand Mat* (CSM) juga berpotensi memengaruhi mekanisme transfer tegangan antarlapis (*interlaminar stress transfer*) melalui arsitektur serat yang

tersusun secara acak. Faktor lain yang turut menentukan kinerja komposit adalah kualitas proses manufaktur [5]. Metode *vacuum infusion* banyak digunakan karena mampu menghasilkan impregnasi resin yang lebih merata, mengurangi kandungan rongga (*void content*), serta memungkinkan fabrikasi struktur komposit berukuran sedang dengan biaya yang lebih ekonomis dibandingkan metode *hand lay-up* konvensional [6].

Penelitian mengenai komposit hibrida karbon/kaca telah banyak dilaporkan. Akan tetapi, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada laminat *thin-ply* atau laminat searah (*unidirectional*) yang dirancang untuk menghasilkan perilaku *pseudo-ductile* pada kondisi laboratorium yang terkendali. Kajian eksperimental mengenai laminat hibrida anyaman *Carbon/Glass/CSM* yang diproduksi menggunakan metode *vacuum infusion* masih relatif terbatas, terutama yang menghubungkan sifat tarik, sifat lentur, dan karakteristik kegagalan makroskopik pada kondisi fabrikasi yang lebih mendekati praktik manufaktur. Pemahaman terhadap karakteristik tersebut penting untuk mengevaluasi kemampuan struktural laminat hibrida yang ditujukan bagi berbagai aplikasi rekayasa ringan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji sifat mekanik dan karakteristik kegagalan makroskopik laminat hibrida *Carbon/Glass/CSM* yang difabrikasi menggunakan metode *vacuum infusion* melalui pengujian tarik berdasarkan ASTM D3039 serta pengujian lentur tiga titik sesuai ASTM D790. Laminat monolitik CFRP digunakan sebagai material pembanding (*benchmark*) untuk mengevaluasi pengaruh hibridisasi terhadap respons mekanik dan perilaku kegagalan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan data eksperimental yang mendukung pemilihan dan pengembangan material komposit hibrida ringan untuk aplikasi rekayasa struktural yang memerlukan keseimbangan antara kekakuan, kekuatan, kemudahan proses manufaktur, dan ketahanan terhadap kerusakan.

1.2 Rumusan Permasalahan

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

1. Apakah laminat hibrida *Carbon/Fiberglass/CSM* yang difabrikasi menggunakan metode *vacuum infusion* memiliki karakteristik mekanik yang berpotensi untuk diterapkan sebagai material struktur ringan pada *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)?
2. Bagaimana hubungan antara sifat mekanik tarik, sifat mekanik lentur, dan karakteristik kegagalan makroskopik dalam menjelaskan perilaku mekanik laminat hibrida *Carbon/Fiberglass/CSM*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan karakterisasi eksperimental untuk memperoleh data sifat mekanik tarik dan lentur (kekuatan, modulus, dan regangan patah) laminat hibrida *Carbon/Glass/CSM* yang difabrikasi melalui metode *vacuum infusion*, sebagai landasan untuk menilai kelayakan penerapannya pada struktur ringan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).
2. Menganalisis hubungan antara sifat mekanik tarik, sifat mekanik lentur, dan karakteristik kegagalan makroskopik untuk menjelaskan perilaku mekanik laminat hibrida *Carbon/Fiberglass/CSM*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat akademis

Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang material komposit melalui penyediaan data eksperimental mengenai hubungan antara sifat mekanik dan karakteristik kegagalan makroskopik pada laminat hibrida *Carbon/Fiberglass/CSM* hasil fabrikasi menggunakan metode *vacuum infusion*.

2. Manfaat praktis

Memberikan informasi teknis mengenai potensi penggunaan laminat hibrida *Carbon/Fiberglass/CSM* sebagai material alternatif untuk struktur ringan yang

memerlukan keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap kerusakan, khususnya pada komponen struktural sekunder *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

3. Manfaat pengembangan penelitian

Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan konfigurasi laminat hibrida, optimasi metode fabrikasi, serta peningkatan performa mekanik dan karakteristik kegagalan komposit sesuai kebutuhan aplikasi rekayasa.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini disusun untuk menjaga ruang lingkup penelitian agar tetap terarah sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, sebagai berikut.

1. Material yang digunakan berupa laminat komposit hibrida yang tersusun atas serat karbon anyaman dua arah (*bidirectional carbon fiber*), serat kaca anyaman dua arah (*bidirectional fiberglass*), *Chopped Strand Mat* (CSM), dan resin epoksi sebagai matriks.
2. Fabrikasi laminat komposit dilakukan menggunakan metode *vacuum infusion* pada kondisi aktual *workshop* tanpa pengendalian parameter proses secara terstandarisasi.
3. Konfigurasi laminat yang diteliti dibatasi pada urutan penyusunan [C/G/CSM/C/G/CSM/C], sedangkan laminat monolitik *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) digunakan sebagai material pembanding (*benchmark*).
4. Pengujian mekanik dibatasi pada pengujian tarik berdasarkan ASTM D3039 menggunakan spesimen berbentuk *dog-bone* ASTM D638 Tipe I serta pengujian lentur tiga titik berdasarkan ASTM D790.
5. Parameter yang dianalisis meliputi kekuatan tarik, modulus elastisitas tarik, kekuatan lentur, modulus lentur, regangan saat patah, serta karakteristik kegagalan makroskopik setelah pengujian mekanik.
6. Karakteristik kegagalan material dievaluasi berdasarkan pengamatan makroskopik terhadap spesimen setelah pengujian tarik dan pengujian lentur

tanpa dilakukan analisis struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

7. Variasi ketebalan laminat yang dihasilkan selama proses fabrikasi dianggap sebagai kondisi aktual hasil proses *vacuum infusion* dan tidak ditetapkan sebagai variabel penelitian.
8. Pengaruh parameter proses manufaktur, seperti tingkat vakum, temperatur, laju aliran resin, waktu impregnasi, dan siklus *curing*, tidak dianalisis dalam penelitian ini.
9. Ruang lingkup penelitian tidak mencakup optimasi konfigurasi laminasi (*stacking sequence*), optimasi parameter proses fabrikasi, maupun analisis numerik untuk memprediksi respons mekanik laminat.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis ini disusun untuk memberikan gambaran mengenai susunan dan ruang lingkup pembahasan pada setiap bab sebagai berikut.

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang penelitian, rumusan permasalahan, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan. Uraian pada bab ini menjelaskan dasar pemikiran penelitian, *research gap*, dan arah penelitian mengenai pengembangan laminat komposit hibrida untuk aplikasi struktur ringan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini menguraikan teori dan konsep yang menjadi landasan penelitian, meliputi material komposit, karakteristik serat karbon dan serat kaca, konsep laminat komposit hibrida, mekanisme pembebanan tarik dan lentur, karakteristik kegagalan komposit, metode *vacuum infusion*, standar pengujian ASTM, serta hasil penelitian terdahulu yang digunakan sebagai dasar penyusunan *research gap* dan pengembangan penelitian.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian yang meliputi material dan peralatan yang digunakan, konfigurasi laminat, proses fabrikasi menggunakan metode

vacuum infusion, pembuatan spesimen uji, prosedur pengujian tarik dan pengujian lentur berdasarkan standar ASTM, metode pengamatan karakteristik kegagalan makroskopik, serta teknik pengolahan dan analisis data penelitian.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan pembahasan yang meliputi analisis sifat mekanik tarik, analisis sifat mekanik lentur, karakteristik kegagalan makroskopik pada pengujian tarik dan pengujian lentur, serta pembahasan mengenai potensi penerapan laminat komposit hibrida sebagai material struktur ringan untuk *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh.

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan serta saran yang dapat digunakan sebagai acuan dalam pengembangan penelitian selanjutnya mengenai laminat komposit hibrida dan aplikasinya pada struktur ringan.

1.7 State of the Art dan Kebaruan Penelitian

Perkembangan penelitian mengenai material komposit menunjukkan bahwa penggunaan komposit berbasis serat terus mengalami peningkatan, khususnya pada aplikasi struktural yang membutuhkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Komposit berbasis *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) banyak digunakan karena memiliki kekuatan tarik tinggi, kekakuan yang baik, serta ketahanan terhadap korosi dan kelelahan material, sehingga sesuai untuk komponen transportasi dan kedirgantaraan [7]. Selain karakteristik material, kualitas komposit juga sangat dipengaruhi oleh metode fabrikasi yang digunakan. Metode *vacuum infusion* telah banyak diterapkan karena mampu menghasilkan distribusi resin yang lebih merata, menurunkan kandungan *void*, serta meningkatkan homogenitas laminat dibandingkan metode fabrikasi terbuka seperti *hand lay-up* [8]. Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa proses *vacuum infusion* mampu menurunkan porositas dari 2,00% menjadi 0,60% serta mengurangi variasi ketebalan laminat

dari 8,11% menjadi 3,75%, sehingga berpengaruh langsung terhadap peningkatan sifat mekanik komposit [9].

Kajian mengenai komposit hibrida juga berkembang pesat sebagai upaya memperoleh kombinasi sifat mekanik yang lebih optimal melalui penggabungan dua atau lebih jenis serat penguat dalam satu sistem matriks [3]. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan lentur, ketangguhan, serta *interlaminar shear strength* (ILSS), terutama ketika serat karbon digunakan sebagai lapisan luar (*skin layer*) dan serat kaca digunakan sebagai lapisan pendukung [10]. Struktur komposit yang bersifat anisotropik menyebabkan orientasi serat dan susunan lapisan (*stacking sequence*) menjadi faktor yang sangat menentukan terhadap respons mekanik material [11]. Penelitian pada komposit *interlayer* dan *intralayer hybrid* menunjukkan bahwa konfigurasi lapisan serat karbon dan serat kaca yang tepat mampu meningkatkan kekuatan tarik dan lentur secara signifikan, sedangkan konfigurasi yang kurang tepat dapat memicu konsentrasi tegangan dan mempercepat delaminasi [12]. Selain itu, kegagalan komposit umumnya terjadi pada area antarmuka antar-lapisan (*interlaminar region*), seperti delaminasi, *Debonding*, dan *Fiber pull-out* yang disebabkan oleh lemahnya adhesi antara serat dan matriks serta distribusi tegangan yang tidak merata [13], [14]. Fenomena ini diperkuat oleh hasil analisis struktur mikro yang menunjukkan bahwa kualitas ikatan serat–matriks sangat menentukan proses transfer beban dan ketahanan terhadap kegagalan antarlapisan [15].

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu, masih terdapat beberapa keterbatasan yang menjadi dasar dilaksanakannya penelitian ini. Sebagian besar penelitian mengenai komposit hibrida masih berfokus pada kombinasi dua jenis penguat atau konfigurasi laminasi tertentu yang difabrikasi pada kondisi laboratorium dengan parameter proses yang dikendalikan secara ketat. Penelitian mengenai laminat komposit hibrida yang mengombinasikan serat karbon anyaman dua arah (*bidirectional carbon fiber*), serat kaca anyaman dua arah (*bidirectional fiberglass*), dan *Chopped Strand Mat* (CSM) melalui metode *vacuum infusion* pada kondisi aktual *workshop* masih relatif terbatas. Kajian yang menghubungkan hasil pengujian tarik, pengujian lentur, dan karakteristik kegagalan makroskopik untuk

menjelaskan perilaku mekanik laminat komposit hibrida juga masih belum banyak dilaporkan.

Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui pengembangan laminat komposit hibrida yang memadukan serat karbon anyaman dua arah (*bidirectional carbon fiber*), serat kaca anyaman dua arah (*bidirectional fiberglass*), dan *Chopped Strand Mat* (CSM) dalam konfigurasi laminasi tujuh lapis menggunakan metode *vacuum infusion* pada kondisi aktual *workshop*. Kebaruan penelitian juga terletak pada pendekatan evaluasi yang mengintegrasikan karakterisasi sifat mekanik tarik, sifat mekanik lentur, serta analisis karakteristik kegagalan makroskopik untuk menjelaskan perilaku mekanik laminat secara menyeluruh. Laminat monolitik *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) digunakan sebagai material pembanding (*benchmark*) untuk mengevaluasi pengaruh penerapan konfigurasi hibrida terhadap performa mekanik dan karakteristik kegagalan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan laminat komposit hibrida sebagai material alternatif bagi struktur ringan yang memerlukan keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan toleransi terhadap kerusakan, khususnya pada aplikasi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

