

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Material *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) merupakan salah satu material komposit yang dimanfaatkan dalam bidang manufaktur, otomotif, konstruksi, dan aerospace karena memiliki keunggulan berupa kekuatan tinggi, ringan dan meningkatkan performa mekanik yang bagus [1-8]. Material ini tersusun dari serat karbon sebagai penguat dan matriks polimer sebagai pengikat yang menjadi kesatuan bekerja sebagai penahan beban. CFRP memiliki kekuatan tarik berkisar antara 600–1500 MPa menunjukkan efisiensi struktural yang lebih tinggi dibandingkan material logam konvensional seperti baja [9-11]. Dalam aplikasinya, pembuatan CFRP umumnya tidak diproduksi dalam satu kesatuan utuh, tetapi terdiri dari beberapa komponen yang memerlukan proses penyambungan untuk membentuk sebuah struktur yang lebih besar.

Permasalahan pada struktur CFRP bukan hanya terletak pada sifat materialnya, tetapi juga pada kualitas sambungan yang digunakan. Sambungan konvensional seperti baut dan rivet masih banyak digunakan karena mudah dipasang dan dibuat, namun metode ini memerlukan proses pengeboran yang dapat merusak serat karbon. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa proses *drilling* pada CFRP dapat menyebabkan delaminasi, retak matriks, konsentrasi tegangan, dan penurunan umur pakai struktur. Kondisi tersebut menyebabkan sambungan berpotensi memicu kegagalan dini [12-21].

Metode adhesive bonding banyak dikembangkan pada sambungan CFRP karena mampu mendistribusikan tegangan secara lebih merata, tidak memerlukan pengeboran, serta menjaga keutuhan serat pada material komposit. Metode ini juga memberikan keuntungan berupa pengurangan berat struktur dan peningkatan ketahanan terhadap fatigue [23-30]. Meskipun demikian, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sambungan adhesive masih memiliki keterbatasan, yaitu kegagalan pada antarmuka (*adhesive failure*), ketangguhan sambungan yang rendah, serta sensitivitas terhadap distribusi tegangan pada daerah *overlap* [31-35]. Kegagalan sambungan pada

beberapa penelitian masih didominasi oleh *adhesive failure* akibat lemahnya ikatan antara perekat dengan permukaan CFRP, sehingga kekuatan sambungan belum mencapai kondisi yang optimal.

Selain kualitas ikatan antarmuka, ketebalan lapisan perekat juga merupakan faktor penting yang mempengaruhi sambungan. Penelitian oleh *Chen et al.* (2022) menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan perekat dapat menyebabkan penurunan kekuatan geser sambungan. Kondisi tersebut dapat mempercepat terjadinya kerusakan pada lapisan *adhesive* dan menurunkan kemampuan sambungan dalam menahan beban [35]. Semakin tebal lapisan perekat, semakin besar kemungkinan terjadinya deformasi lokal yang dapat meningkatkan konsentrasi tegangan geser pada daerah antarmuka sambungan. Kondisi tersebut dapat memengaruhi distribusi tegangan, menurunkan kekuatan sambungan, serta pada kondisi tertentu menyebabkan perubahan mode kegagalan dari *cohesive failure* menuju *adhesive failure* [36-40]. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan sambungan tidak hanya dipengaruhi oleh jenis perekat yang digunakan, tetapi juga oleh parameter geometris dan konfigurasi sambungannya.

Di sisi lain, pengaruh lingkungan pada sambungan CFRP juga mengungkapkan bahwa kondisi temperatur tinggi dan kelembapan dapat mempercepat penurunan kualitas *adhesive* melalui mekanisme plastisasi, pembengkakan matriks, serta penurunan integritas antarmuka sambungan sehingga mengurangi kekuatan ikatan dan kekakuan sambungan [41]. Penyerapan kelembapan pada matriks perekat dapat mengubah sifat fisik dan kimia *adhesive*, yang pada akhirnya melemahkan kualitas ikatan antarmuka [42-45]. Meskipun penelitian terdahulu telah banyak membahas pengaruh lingkungan terhadap material dan jenis *adhesive*, penelitian mengenai pengembangan metode sambungan yang mampu mempertahankan ketahanan struktur terhadap potensi penurunan performa tersebut masih sangat terbatas.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan performa *adhesive bonding*, antara lain melalui *surface treatment*, penggunaan nanomaterial, dan modifikasi geometri sambungan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa perlakuan plasma, *laser texturing*, maupun penambahan nanofiller dapat

meningkatkan kekuatan sambungan [46-49]. Meskipun metode tersebut mampu meningkatkan performa sambungan, penerapannya masih menghadapi tantangan berupa kerumitan proses, kebutuhan kontrol parameter yang ketat, serta potensi keterbatasan dalam proses manufaktur skala besar [50], [51]. Selain itu, sejumlah penelitian lain mengeksplorasi *hybrid method* dengan mengombinasikan sambungan mekanis dan *adhesive bonding*. Meskipun metode hibrida ini mampu meningkatkan kapasitas pembebanan pada struktur [52], [53], penerapannya tetap memerlukan proses pengeboran yang berisiko merusak serat dan memicu konsentrasi tegangan pada material CFRP [54], [55].

Alternatif yang mulai dikembangkan adalah penggunaan *mechanical interlocking* sebagai mekanisme penguncian fisik antara adhesive dan permukaan material [56]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penerapan *mechanical interlocking* mampu meningkatkan kapasitas beban sambungan, memperbaiki transfer beban antarmuka, serta menghambat atau memperlambat meluasnya retakan melalui mekanisme *crack bridging* dan redistribusi tegangan [57-61]. Studi sebelumnya telah merancang *spiked metal insert* berupa lembaran logam yang dimodifikasi menjadi tonjolan-tonjolan (*spike*) guna membentuk *mechanical interlocking* tiga dimensi pada sambungan adhesif komposit [62]. Desain tersebut terbukti mampu meningkatkan transfer beban serta kekuatan sambungan jika dibandingkan dengan sambungan adhesif konvensional. Di sisi lain, prinsip *mechanical interlocking* juga banyak ditemukan pada sistem biologis, antara lain struktur berpori yang menyerupai ligamen sehingga material pengikat (*adhesive*) dapat mengisi rongga secara optimal, serta morfologi duri yang menghasilkan efek penguncian secara alami. Berlandaskan konsep-konsep tersebut, penelitian ini mengusulkan desain *mechanical interlocking* yang memadukan *ligamen copper mesh* sebagai media penetrasi sekaligus distribusi perekat dengan geometri penguncian yang terinspirasi dari morfologi duri [60],[63]. Penelitian ini diterapkan pada sambungan adhesif CFRP dengan variasi geometri *Single Lap Joint* (SLJ) dan *Scarf Joint* (SJ) guna mengkaji pengaruhnya terhadap distribusi beban dan

peningkatan sifat mekanik sambungan aspek yang belum dilaporkan dalam literatur yang ada.

Sebagai arah penelitian masa depan, penelitian ini dibuat guna mengembangkan konsep atau variasi pada sambungan CFRP yang sederhana namun tetap efektif dan mudah diterapkan di industri. Metode yang digunakan yaitu dengan membandingkan berbagai variasi sambungan CFRP *adhesive bonding* dengan penambahan insert penguncian tembaga yang telah di modifikasi, variasi pada permukaan yang diampelas atau di perusakan area bonding, dan sambungan adhesive tanpa insert guna melihat pengaruh perbedaan variasi perlakuan dari kekuatan bonding dan distribusi tegangan yang dihasilkan. Dalam sisi keselamatan, khususnya pada kondisi kerja ekstrem seperti suhu tinggi atau beban besar, pemahaman terhadap perilaku dan mekanisme kegagalan sambungan menjadi sangat penting karena berkaitan langsung dengan keandalan struktur dan keselamatan pengguna. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan melalui pengujian tarik dengan acuan standar ASTM D-5868-01 serta analisis mode kegagalan yang mengacu pada ASTM D-5573-99, sehingga diharapkan dapat menjadi dasar dalam merancang sambungan CFRP yang lebih optimal, aman, kuat, dan mampu meminimalkan risiko kegagalan dini dalam pengaplikasiannya.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, berikut poin-poin yang menjadi fokus dalam penelitian ini, diantaranya sebagai berikut :

1. Sambungan merupakan aspek yang sangat penting dalam struktur berbahan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) karena menjadi titik perpindahan beban dan berpotensi menimbulkan konsentrasi tegangan. Kondisi ini dapat menyebabkan kelemahan lokal pada struktur, sehingga mempengaruhi kekuatan dan keandalan secara keseluruhan.
2. Metode adhesive bonding digunakan sebagai alternatif karena mampu mendistribusikan tegangan secara lebih merata dan tidak merusak struktur serat. Namun, sambungan ini masih berpotensi mengalami kegagalan pada bagian antarmuka (*interface*) yang dapat menurunkan kekuatan sambungan.

3. Penggunaan *insert copper* (Cu) sebagai upaya meningkatkan kekuatan sambungan melalui mekanisme penguncian mekanis (*mechanical interlocking*) masih belum banyak dikaji, khususnya dalam kombinasi dengan adhesive bonding pada material CFRP.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup penelitian dibatasi sebagai berikut :

1. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dengan metode penyambungan *adhesive bonding* menggunakan perekat Araldite 2015.
2. Variasi sambungan yang diteliti terbatas pada *Single Lap Joint* (SLJ) dan *Scarf Joint* (SJ) dengan variasi penggunaan *copper interlayer* dan perlakuan permukaan.
3. Pengujian yang dilakukan dibatasi pada uji tarik (*tensile test*) berdasarkan standar ASTM D-5868 dan analisis karakteristik patahan berdasarkan standar ASTM D-5573.
4. Penelitian ini tidak membahas pengaruh faktor lingkungan seperti temperatur, kelembapan, dan korosi terhadap sambungan.

1.4 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh variasi jenis sambungan *Single Lap Joint* (SLJ) dan *Scarf Joint* (SJ) terhadap sifat mekanik sambungan CFRP?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan *copper insert* dan perlakuan permukaan terhadap kekuatan sambungan adhesif CFRP?

1.5 Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis pengaruh variasi jenis sambungan *Single Lap Joint* (SLJ) dan *Scarf Joint* (SJ) terhadap sifat mekanik sambungan adhesif CFRP.

2. Menganalisis pengaruh penggunaan metode *mechanical interlocking* terhadap kekuatan sambungan adhesive CFRP.

1.6 Kegunaan Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kegunaan sebagai berikut :

1. Menambah pengetahuan dan referensi ilmiah mengenai pengaruh variasi sambungan, penggunaan *copper interlayer*, serta perlakuan permukaan terhadap sifat mekanik sambungan CFRP.
2. Memberikan informasi dan acuan dalam menentukan desain sambungan CFRP yang lebih kuat dan andal, khususnya dengan metode *adhesive bonding* dan penguncian mekanis.
3. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan material komposit dan pengembangan teknologi sambungan CFRP.

