

Pengaruh Penambahan CNT dan Serbuk Aluminium pada Ikatan *Dissimilar Material* Aluminium – CFRP

Sekar Alin Fatmawati¹, Ferry Setiawan^{1*}, Dhimas Wicaksono¹

¹Program Studi Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan
Jalan Parangtritis Km. 4.5, Sewon, Bangunharjo, Bantul, Yogyakarta, 55187, Indonesia

*Penulis korespondensi; E-mail: ferry.setiawan@sttkd.ac.id

ABSTRAK

Aplikasi metode *adhesive bonding* dalam pembuatan struktur *dissimilar material* mempunyai keterbatasan salah satunya pada kekuatan ikatan yang tidak sebaik dengan sambungan berbasis logam. Penelitian ini bertujuan meningkatkan kekuatan geser sambungan Aluminium dan serat karbon yang diperkuat polimer epoksi, dengan penambahan *nano adhesive* berupa *carbon nanotube* (CNT) dan serbuk Aluminium. Pengujian dilakukan dengan spesimen *single lap joint* sesuai standar *American Society for Testing and Materials (ASTM) D1002*. Spesimen serbuk Aluminium - *carbon reinforced polymer* dibuat menggunakan metode manufaktur *vacuum bagging*. Pengujian spesimen dilakukan dengan 4 variasi yaitu; sambungan dengan perekat epoksi, sambungan perekat epoksi + perlakuan permukaan, sambungan perekat epoksi + perlakuan permukaan + serbuk Aluminium, sambungan dengan perekat epoksi + perlakuan permukaan + CNT. Kekuatan geser terbaik didapat dari variasi dengan penambahan *nano adhesive* CNT dengan nilai rata-rata kekuatan geser sebesar 3,31 MPa. Disusul dengan variasi penambahan *nano adhesive* serbuk Aluminium dengan nilai rata-rata kekuatan geser sebesar 3,06 MPa. Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan *nano adhesive* Al-Powder maupun CNT pada area sambungan dapat meningkatkan kekuatan geser dimana penambahan *nano adhesive* CNT menghasilkan kekuatan ikatan yang paling baik. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi aplikasi *nano adhesive* untuk menambah kekuatan ikatan material tidak sejenis sehingga dapat diaplikasikan pada berbagai produk di sektor industri seperti otomotif, penerbangan, dan konstruksi.

Kata Kunci : komposit hibrida, uji geser, *nano adhesive*, *carbon nano tube*, *vacuum bagging*.

ABSTRACT

The application of adhesive bonding methods in the fabrication of dissimilar material structures has limitations, one of which is that the bond strength is not as good as with metal-based joints. This research aims to improve the shear strength of aluminum and carbon reinforced polymer with epoxy polymer, by adding nano adhesive in the form of carbon nanotube (CNT) and aluminum powder. The testing was conducted using single lap joint specimens, in accordance with the American Society for Testing and Materials (ASTM) D1002 standard. Aluminium powder – carbon reinforced polymer specimens were made using the vacuum bagging manufacturing method. The specimen testing was carried out with four variations: joints with epoxy adhesive, joints with epoxy adhesive + surface treatment, joints with epoxy adhesive + surface treatment + Al powder, and joints with epoxy adhesive + surface treatment + CNT. The best shear strength was obtained from the variation with the addition of nano adhesive CNT, with an average shear strength value of 3.31 MPa. This was followed by the variation with the addition of nano adhesive Al powder, which had an average shear strength value of 3.06 MPa. This study demonstrated that the application of nano adhesives Al-Powder and CNT in the joint area could enhance the shear strength, with the addition of nano adhesive CNT resulting in the best bond strength. This research shows the potential application of nano adhesive to enhance the bonding strength of dissimilar materials, making it applicable to various products in industrial sectors such as automotive, aviation, and construction.

Keywords: *hybrid composite, shear test, nano adhesive, carbon nano tube, vacuum bagging.*

PENDAHULUAN

Salah satu kemajuan dalam era industri adalah di sektor otomotif, di mana *Additive Manufacturing* menjadi dasar utama untuk memajukan industri digital. Sementara itu, material komposit, yang memiliki kelebihan seperti ringan, kuat, tahan terhadap korosi, dan mudah dibentuk, muncul sebagai pilihan alternatif yang menjanjikan dalam pembuatan bodi kendaraan [1]. Komposit yang tersedia umumnya memiliki *serat* yang lebih kaku dan kuat atau fase partikel yang lebih kuat daripada fase matrik *kontinue*. Fase matrik berfungsi sebagai pembawa beban utama dan perekat pada bagian dan komponen, serta sebagai media transfer beban antara serat. Dalam hal beban, matrik bahkan mungkin harus membawa beban melintang ke serat. Matrik lebih ulet daripada serat dan berfungsi sebagai sumber kekakuan penguat. Bahan gabungan baru terlihat lebih kuat ketika diproduksi secara efisien daripada yang akan menjadi praktik untuk setiap material individu. Komposit digunakan dalam aplikasi listrik, termal, dan lingkungan, serta untuk sifat strukturalnya. [2]. *Fiber metal laminates (FML)* dan struktur ikatan sambungan *dissimilar* material logam – komposit merupakan struktur komposit berbentuk lapisan yang menggabungkan keuntungan dari material logam dan matrik yang diperkuat serat. Material logam yang merupakan material isotropik memiliki sifat mekanik kekuatan dan ketahanan impak yang tinggi, namun material logam bersifat korosif, sedangkan material yang secara keseluruhan komposit memiliki karakteristik kelelahan yang baik kemudian kekuatan dan kekakuan yang tinggi. Kedua material ini yang memiliki keunggulan pada sifat mekanisnya masing-masing dikombinasikan menjadi satu material yang disebut FML atau sambungan *dissimilar* material yang bertujuan memperbaiki kekurangan pada masing-masing material [3].

Penerapan *adhesive bonding* di industri, terutama dalam penerbangan, sudah banyak berkembang. Metode ini banyak digunakan pada pesawat Cirrus SR20 dan PZL I-23, yang hampir seluruhnya menggunakan perekatan untuk penyambungan struktur. Penerapan *bonding join* juga sangat populer pada pesawat Boeing 737 dan Airbus A350, di mana hampir separuh dari struktur mereka terbuat dari komposit yang direkatkan [4]. Ikatan perekat adalah proses penyambungan material di mana perekat, yang ditempatkan di antara permukaan yang melekat, mengeras untuk menghasilkan ikatan perekat. Sambungan dengan ikatan perekat meningkatkan alternatif untuk sambungan mekanis dalam aplikasi teknik dan memberikan banyak keuntungan dibandingkan pengencang mekanis konvensional. Di antara keuntungan ini adalah bobot struktural yang lebih rendah, biaya fabrikasi yang lebih rendah, dan toleransi kerusakan yang lebih baik. Penerapan sambungan ini pada komponen struktural yang terbuat dari komposit yang diperkuat serat telah secara signifikan meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Pengencang tradisional yang berbasis logam biasanya menghasilkan pemotongan serat dan logam yang akan disambung, sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan, yang keduanya mengurangi integritas struktural [5].

Material komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih bahan untuk menciptakan material dengan sifat mekanik yang unggul dibandingkan bahan asalnya. Komposit memiliki kekakuan dan kekuatan jenis yang lebih tinggi daripada logam. Pembentukan komposit bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik, memudahkan desain yang kompleks, memberikan fleksibilitas bentuk, serta menghasilkan bahan yang lebih ringan dan efisien biaya [6]. Serat karbon, banyak digunakan sebagai penguat dalam material komposit membentuk sebuah struktur komposit polimer yang diperkuat serat karbon, yang lebih dikenal dengan nama *serat karbon reinforced polymer (CRFP)*, material ini biasa digunakan pada industri dirgantara karena mempunyai kekuatan dan kekakuan yang tinggi dan bobot yang ringan. Serat karbon unggul dengan berat jenis yang lebih ringan dari serat kaca serta memiliki kekakuan yang tinggi, kekuatan tarik, dan tekan yang tinggi. Namun, material ini mempunyai kelemahan termasuk ketahanan benturan yang rendah dan konduktivitas tinggi, yang bisa menyebabkan masalah seperti konsleting pada mesin listrik [7].

Paduan Aluminium merupakan logam ringan yang memiliki kekuatan tinggi, tahan karat, dan cukup baik sebagai konduktor listrik. Logam ini banyak digunakan dalam industri kimia, listrik, konstruksi, transportasi, dan pembuatan alat penyimpanan. Perkembangan terbaru dalam teknik pengelasan busur listrik dengan gas mulia telah membuat pengelasan Aluminium dan paduannya menjadi lebih mudah dan andal. Akibatnya, penggunaan Aluminium dan paduannya telah meluas di berbagai bidang [8]. *Carbon nanotube (CNT)* adalah bahan berskala *nano* yang menarik karena memiliki sifat luar biasa untuk berbagai aplikasi mekanik, listrik, dan termal. Penemuan struktur

tabung dari atom karbon berbentuk heksagonal ini, dengan perbandingan panjang terhadap diameter yang sangat tinggi. Sifat mekanik CNT jauh lebih unggul dibandingkan banyak material lainnya, dengan modulus tinggi hingga 1 TPa dan kekuatan tarik mencapai 30 GPa. Kombinasi unik dari sifat-sifat ini, ditambah dengan kepadatan CNT yang rendah, membuatnya sangat cocok untuk digunakan dalam industri kedirgantaraan [9].

CNT menjadi fokus utama dalam ilmu material *nano* dan telah diteliti dalam waktu yang cukup lama. Dengan diameter yang sangat kecil, CNT dianggap ideal untuk memperkuat sambungan perekat antara substrat dan Aluminium serta antarmuka dalam struktur laminasi CRFP yang umum digunakan di industri penerbangan dan otomotif [10]. Serbuk Aluminium adalah bahan penelitian yang digunakan dalam industri pengolahan logam. Produk yang dihasilkan dari serbuk Aluminium yang mengalami oksidasi dengan oksigen dikenal sebagai Alumina atau Al_2O_3 . Al_2O_3 adalah senyawa yang stabil dan berbentuk bubuk putih, menyerupai garam meja. Dengan titik leleh di atas $2050^\circ C$, dibutuhkan banyak energi untuk menghasilkan Alumina dari Aluminium. Al_2O_3 biasanya diproduksi dalam ukuran skala 1-100 nm. Aplikasi Al_2O_3 meliputi penggunaan dalam pelapisan berbagai benda [11].

Resin epoksi adalah jenis polimer *thermoset* yang mengeras saat dicampur dengan katalis atau pengeras. Di antara berbagai jenis resin *thermoset*, resin epoksi sangat populer digunakan dalam adhesi struktural, pelapisan permukaan, komposit teknik, dan laminasi listrik. Sebagian besar aplikasi komposit memanfaatkan epoksi sebagai bahan matriks [12]. Larutan *resin pre-coating* (RPC) dengan perbandingan berat Aseton terhadap resin sebesar 90:10, kemudian larutan RPC ditambah CNT dengan komposisi 1% larutan, selanjutnya diterapkan pada substrat selama 30 detik. Setelah Aseton menguap sepenuhnya, CNT tetap terdistribusi di dalam cekungan mikro substrat. Semua substrat logam yang telah diperkaya dengan CNT dan dilapisi resin dirancang untuk dihubungkan dengan CRFP. Penggunaan resin polimer juga meningkatkan kemampuan substrat untuk menyerap. Hal ini disebabkan oleh lapisan resin yang sangat tipis (tanpa pengeras) yang masih tersisa di permukaan substrat, yang mempertahankan kelembapan setelah penguapan Aseton [10].

Vacuum bagging (VB) adalah teknik produksi komposit yang menggunakan tekanan atmosfer untuk menekan lapisan-lapisan komposit. Lapisan tersebut dibungkus dalam plastik kedap udara, lalu proses vakum diterapkan untuk mengurangi tekanan internal. Perbedaan tekanan antara bagian luar dan dalam plastik menyebabkan lapisan komposit terkompresi secara merata [5]. Uji geser adalah pengujian yang mirip dengan uji tarik, tujuan uji geser yaitu untuk mengetahui kekuatan geser pada spesimen yang diuji pada bidang sejajar dengan permukaannya. Pengujian ini dilakukan dengan menahan salah satu ujung dan ujung lainnya ditarik sampai spesimen mengalami kegagalan. Uji geser penting untuk mengukur kekuatan dan ketahanan material atau sambungan terhadap gaya geser, yang menggambarkan kemampuan material dalam aplikasi nyata. Hasilnya membantu menentukan keandalan dan kinerja material dalam kondisi beban geser, penting untuk desain struktur yang aman dan efisien dalam berbagai industri [13].

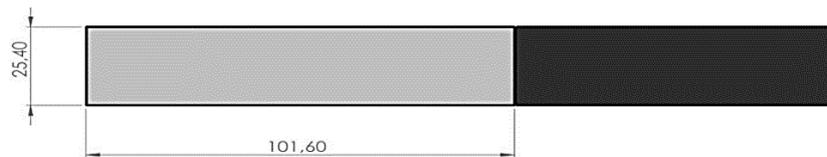
Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang menjadi acuan penelitian kali ini, yaitu pada penelitian yang dilakukan oleh *Dobrzański dan Oleksiak* [4] menjelaskan mengenai metode pengembangan teknik praktis untuk sambungan yang ditempel dengan metode *adhesive bonding*. Ramezani dkk [14] menyimpulkan bahwa sambungan komposit yang dikat dengan metode *adhesive bonding* atau metode perekat mempunyai keuntungan tanpa penambahan berat struktural dan tanpa adanya pengeboran lubang sehingga menghilangkan konsentrasi tegangan dalam struktur, namun metode *adhesive bonding* ini juga mempunyai beberapa keterbatasan antara lain kekuatan struktural yang masih di bawah sambungan dengan basis metal dan ketahanan ikatan dalam jangka panjang akibat pengaruh efek lingkungan atau operasional [14].

Dari adanya keterbatasan metode *adhesive bonding*, maka diperlukan penelitian untuk memperkuat ikatan pada sambungan *dissimilar* material, khususnya pada material hibrida antara Aluminium - CFRP dengan aplikasi metode RPC dan penambahan *nano reinforced adhesive* (NRA) berupa CNT dan serbuk Aluminium. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan NRA berupa CNT dan Al terhadap kekuatan geser dan mengetahui tipe failure joining pada komposit hibrida Aluminium - CFRP. Pada penelitian ini, sambungan spesimen dibuat dengan tipe sambungan *single lap joint* (SLJ) yang akan dianalisis kekuatan ikatan

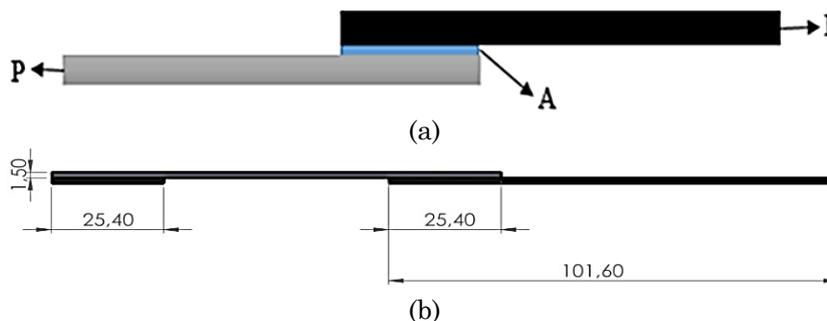
sambungannya dengan uji geser, selanjutnya juga dianalisis tipe kegagalan ikatan antarmuka pada sambungan Al dan perekat epoksi dengan foto makro.

METODE

Penelitian ini menggunakan beberapa teknik pengumpulan data, yaitu metode studi pustaka dan eksperimen. Studi pustaka digunakan untuk memperoleh informasi relevan mengenai topik atau masalah yang diteliti. Penelitian ini menggunakan teknik VB pada proses penggabungan *dissimilar* material Aluminium-CFRP, dimana metode ini terbukti banyak digunakan, misalnya pada pembuatan komposit *serat karbon* pada badan *unmanned aerial vehicel* (UAV) *Skywalker* 1900 [15]. Proses pembuatan Ikatan *dissimilar* material Aluminium-CFRP menggunakan metode VB. Aluminium yang telah diberi perlakuan permukaan menggunakan amplas dan dikasari dengan tekstur segiempat, kemudian dioleskan larutan RPC secara merata dengan kuas di atas permukaan substrat Alumunium. Larutan RPC ini divariasikan dengan serbuk Aluminium dan CNT sebanyak 1% berat, yang bertujuan untuk meningkatkan karakteristik material komposit. Setelah larutan RPC terdistribusi merata dan membentuk gel pada permukaan substrat AL, maka diletakkan serat karbon di atas permukaan Al yang akan di gabung yang kemudian spesimen dibuat dengan metode VB [15]. Spesimen akan diuji dengan pengujian geser untuk mengetahui sifat mekanik yang diuji. Sambungan akan menggunakan struktur tipe SLJ seperti terlihat pada Gambar 1. Sambungan ini menghubungkan dua material dengan tipe ikatan tumpang tindih pada satu sisi, biasanya digunakan dalam konstruksi struktur komposit dan logam. Sambungan ini efektif untuk menahan beban geser, namun rentan terhadap konsentrasi tegangan di sekitar area tumpang tindih, yang dapat mempengaruhi kekuatan dan keandalan sambungan. Pengujian geser yang dilakukan berdasarkan standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D1002 (Gambar 2).



Gambar 1. Gambar Sambungan *Single Lap Joint*



Gambar 2. Dimensi ASTM D1002 (a) Tampak Atas, (b) Tampak Samping

Variabel – variabel dalam penelitian kali ini adalah;

a) Variabel Bebas (Variasi Penelitian)

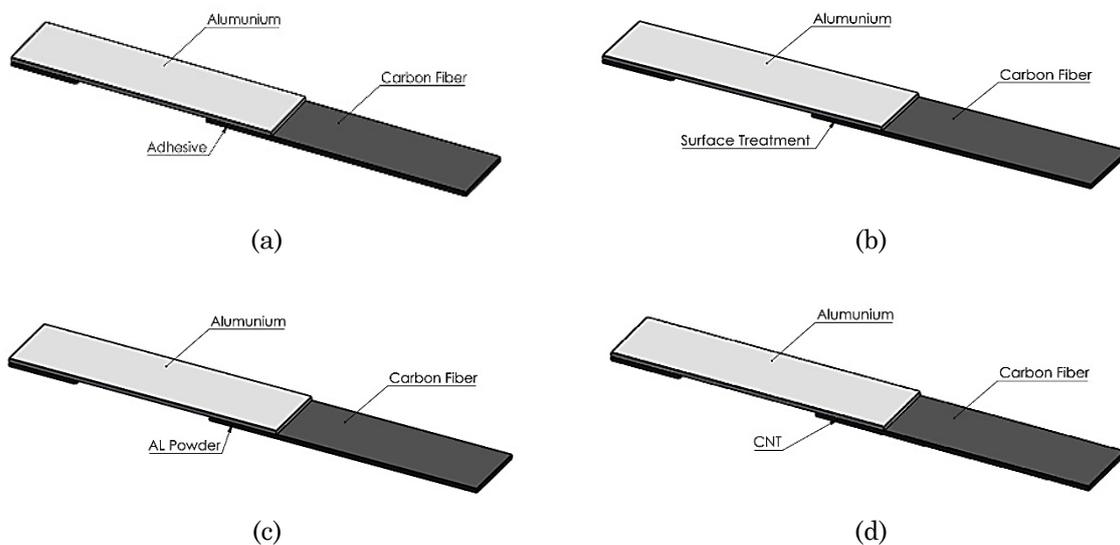
- Variasi 1 Sambungan dengan perekat epoksi tanpa perlakuan permukaan dan NRA
- Variasi 2 Sambungan dengan perekat epoksi + perlakuan permukaan
- Variasi 3 Sambungan dengan perekat epoksi + perlakuan permukaan + serbuk Aluminium
- Variasi 4 Sambungan dengan perekat epoksi + perlakuan permukaan + CNT

b) Variabel Tetap (Parameter Yang Di kontrol)

- Proses manufaktur *one step joining* dengan metode *vacuum bagging* (VB)
- Proses VB diatur pada tekanan vacuum 55 – 60 CmHg
- Waktu proses VB adalah 4 jam, kemudian didiamkan selama 12j am dengan di press dengan lat untuk pengepresean spesimen 4,8 Kg
- Komposit CFRP dengan matrik epoksi, perekat juga menggunakan epoksi

- Perlakuan permukaan dengan amplas dan membuat garis tekstur persegi panjang
 - Komposisi larutan RPC; 90% Aseton dan 10% resin epoksi tanpa pengeras
 - Penambahan CNT sebesar 1% berat pada larutan RPC
 - Sebelum dilakukan penyambungan dilakukan proses RPC pada permukaan Aluminium
 - Aluminium yang dipakai Seri AA 1100
- c) Variabel Terikat (hasil pengujian)
- Pengujian geser
 - Pengujian foto makro untuk analisis jenis kegagalan

Rancangan penelitian berfungsi untuk memastikan material yang akan diuji memenuhi standar yang sama secara geometri sehingga akan mendapatkan hasil akurat dan andal. Rancangan penelitian kali ini mencakup bentuk sambungan yang akan digunakan dan mekanisme penyambungan antara permukaan material Aluminium dan perekat yang akan digunakan. Rancangan spesimen yang akan dibuat dengan dapat dilihat pada Gambar 3.



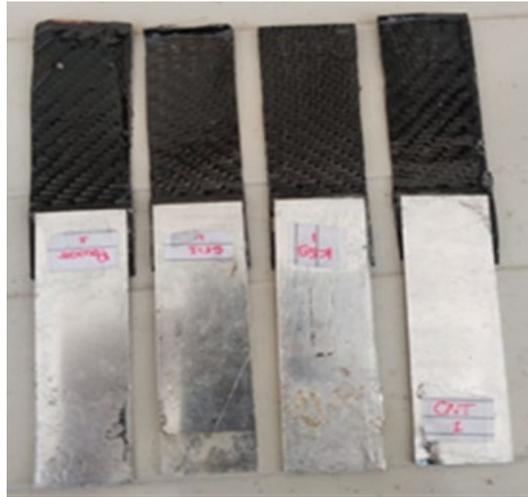
Gambar 3. (a) Sambungan Perekat Epoksi, (b) Sambungan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan, (c) Sambungan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan + Serbuk Al, (d) Sambungan dengan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan + CNT

HASIL DAN PEMBAHASAN

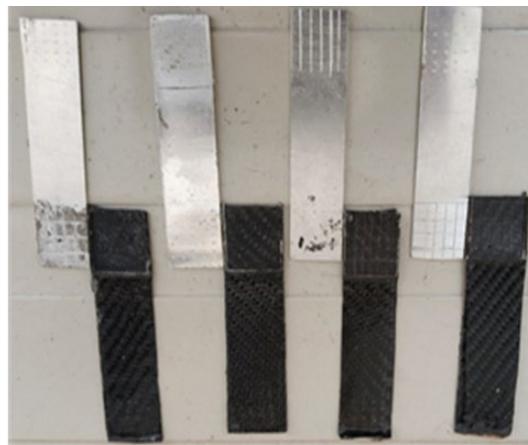
Spesimen sambungan SLJ disiapkan dengan dimensi dan spesifikasi sesuai standar ASTM D1002. Material yang digunakan adalah Aluminium dan komposit berpenguat serat karbon dengan perekat yang telah ditambahkan serbuk CNT atau Aluminium sebagai penguat. Permukaan material diperlakukan dengan amplas untuk meningkatkan adhesi sebelum perekat diaplikasikan secara merata. Hasil Sambungan SLJ dapat dilihat pada Gambar 4. Setelah melalui pengujian geser, spesimen sambungan SLJ menunjukkan variasi kekuatan geser tergantung pada jenis penguat yang digunakan dalam perekat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen dengan perekat berpenguat CNT memiliki tegangan geser tertinggi, sedangkan spesimen tanpa penguat nano menunjukkan tegangan geser terendah. Pengujian ini mengungkapkan efektivitas penguat nano dalam meningkatkan kekuatan mekanik sambungan SLJ. Spesimen setelah di uji dapat dilihat pada Gambar 5.

Kekuatan Geser Maksimum

Kekuatan geser maksimum dihitung berdasarkan hasil gaya maksimum (F_{maks}) yang tercatat selama pengujian geser. Dari beberapa variasi penelitian, dianalisis pengaruh perlakuan permukaan dan pengaruh penambahan penguat nano dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan permukaan dan penguat nano, sebagai spesimen control, terhadap karakteristik mekanis kekuatan geser.



Gambar 1. Spesimen Sebelum Diuji



Gambar 2. Spesimen Setelah Diuji

Variasi Sambungan dengan Perekat epoksi

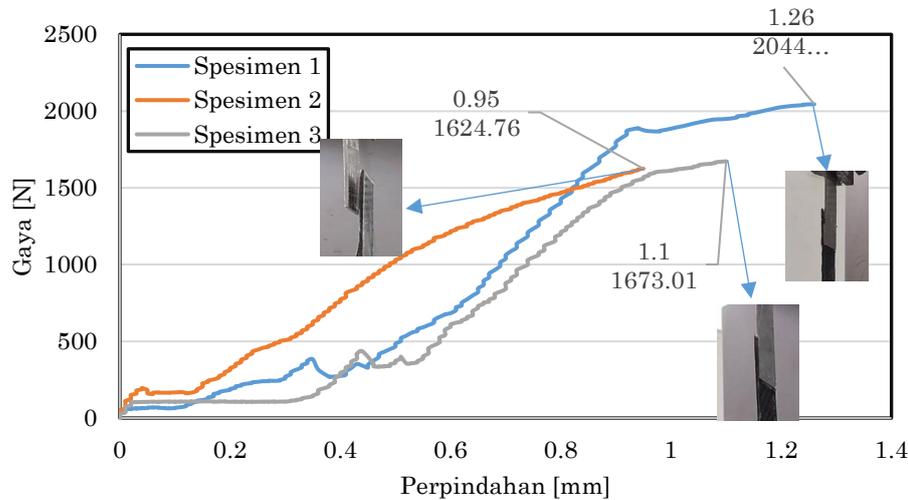
Pada variasi penelitian ini, sambungan SLJ dibuat secara langsung dan dalam satu tahap manufaktur dimana perekatan sambungan dibuat secara bersamaan dengan pembuatan material komposit dengan matrik polimer berpenguat serat karbon. Matrik dan perekat menggunakan bahan yang sama yaitu perekat epoksi. Hasil data pengujian geser pada variasi sambungan dengan perekat epoksi dapat dilihat pada Tabel 1. Dari hasil pengujian diatas dapat dilihat bahwa untuk tegangan geser tanpa penambahan perekat mendapatkan rata – rata gaya geser maksimal 1.780,84 N. Grafik korelasi gaya dan perpindahan pada variasi perekat epoksi dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel 1. Variasi sambungan dengan perekat epoksi

No	Spesimen	F_{maks} [N]
1	Spesimen ke 1	2.044,76
2	Spesimen ke 2	1.624,76
3	Spesimen ke 3	1.673,01
	Rata-rata	1.780,84

Dari Gambar 6, spesimen 1 membutuhkan nilai perpindahan 1,26 mm dengan beban gaya geser maksimal sebesar 2.044,76 N, selanjutnya spesimen 2 mempunyai nilai perpindahan 0,95 mm untuk dengan beban gaya geser maksimal maksimal yaitu sebesar 1.624,76 N, dan yang terakhir spesimen 3 membutuhkan nilai perpindahan 1,1 mm dengan nilai beban gaya geser maksimal sebesar 1.673,01 N. Spesimen *perekat epoksi* dan tanpa perlakuan permukaan mendapatkan rata-

rata sebesar 1.780,84 N. Nilai ini lebih rendah dari spesimen yang diberi tambahan CNT dan serbuk Aluminium. Dari grafik terlihat bahwa pola grafik gaya dan perpindahan pada variasi 1 cenderung berhimpit hal ini menandakan bahwa kualitas spesimen 1 lebih sudah seragam.



Gambar 6. Grafik Gaya dan Perpindahan pada Variasi Sambungan dengan Perekat Epoksi

Variasi Sambungan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan

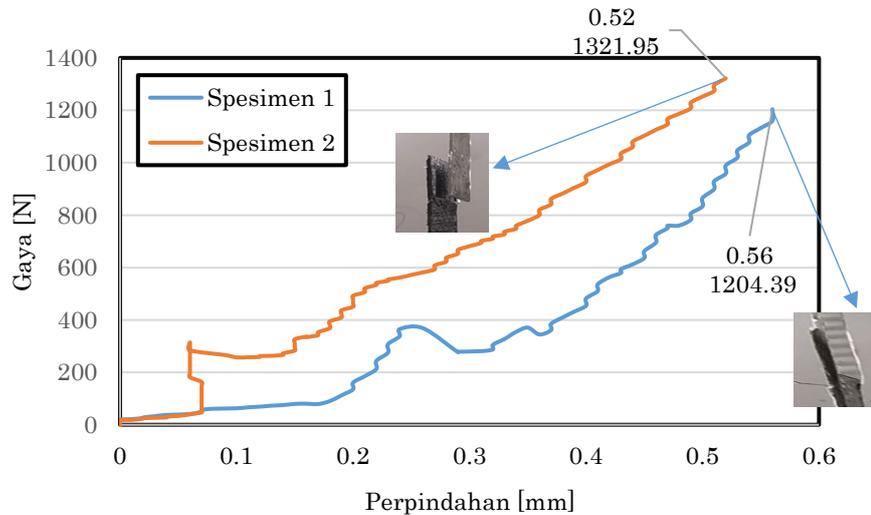
Pada variasi penelitian ini, sambungan SLJ dibuat secara langsung dan dalam satu tahap manufaktur dimana perekatan sambungan dibuat secara bersamaan dengan pembuatan material komposit dengan matrik polimer berpenguat serat karbon. Matrik dan perekat menggunakan bahan yang sama yaitu perekat epoksi dengan material Aluminium AA1100 dilakukan perlakuan permukaan dengan membentuk tekstur ruang garis segiempat dan ditambahkan NRA dengan material CNT. Hasil data pengujian geser pada variasi sambungan perekat epoksi dan penambahan perlakuan permukaan perlakuan permukaan dapat dilihat pada Tabel 2. Dari hasil pengujian diatas dapat dilihat bahwa untuk tegangan geser perekat epoksi mendapatkan rata – rata gaya geser maksimal 1.263,17 N. Grafik korelasi gaya dengan perpindahan pada variasi perekat epoksi dengan perlakuan permukaan dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 2. Variasi sambungan perekat epoksi + perlakuan permukaan

No	Spesimen	F _{maks} [N]
1	Spesimen ke 1	1.204,39
2	Spesimen ke 2	1.321,95
3	Spesimen ke 3	Tidak terbaca
4	Spesimen ke 4	Tidak terbaca
Rata-rata		1.263,17

Berdasarkan hasil pengujian kekuatan geser variasi perekat epoksi dengan perlakuan permukaan mendapatkan rata-rata dengan beban gaya geser maksimal 1263,17 N. Gambar 7 merupakan grafik korelasi gaya dengan perpindahan, spesimen 1 mempunyai nilai perpindahan 0,56 mm untuk mencapai gaya maksimal yaitu sebesar 1.204,39 N, selanjutnya spesimen 2 membutuhkan nilai perpindahan 0,52 mm untuk mencapai gaya maksimal yaitu sebesar 1.321,95 N. Pada variasi ini terdapat 2 spesimen yang tidak terbaca ketika di uji. Spesimen dengan variasi perekat epoksi dengan tambahan perlakuan permukaan garis tekstur segiempat mendapatkan rata-rata sebesar 1.263,17 N. Pada grafik gaya dan perpindahan pada variasi sambungan perekat epoksi dengan tambahan perlakuan permukaan, terlihat pola garis cenderung melebar, hal ini disebabkan karena kualitas antar spesimen yang tidak seragam, dibuktikan juga dengan adanya 2 spesimen yang tidak terbaca nilai beban geser nya ketika dilakukan uji geser. Sepesimen pada variasi sambungan perekat epoksi dengan kondisi perlakuan permukaan mempunyai nilai tegangan geser rata – rata yang lebih kecil dari variasi yang hanya menggunakan perekat epoksi, hal ini dapat kemungkinan terjadi karena proses resin *precoating* tidak bisa mencapai lubang –

lubang mikro pada tekstur garis segiempat sehingga timbul ruangan kosong berupa *void* berisi udara diantara ruang garis yang ada dengan komposit yang disambung, hal ini membuat kekuatan geser menjadi turun.



Gambar 7. Grafik gaya dan perpindahan pada variasi sambungan perekat epoksi + perlakuan permukaan

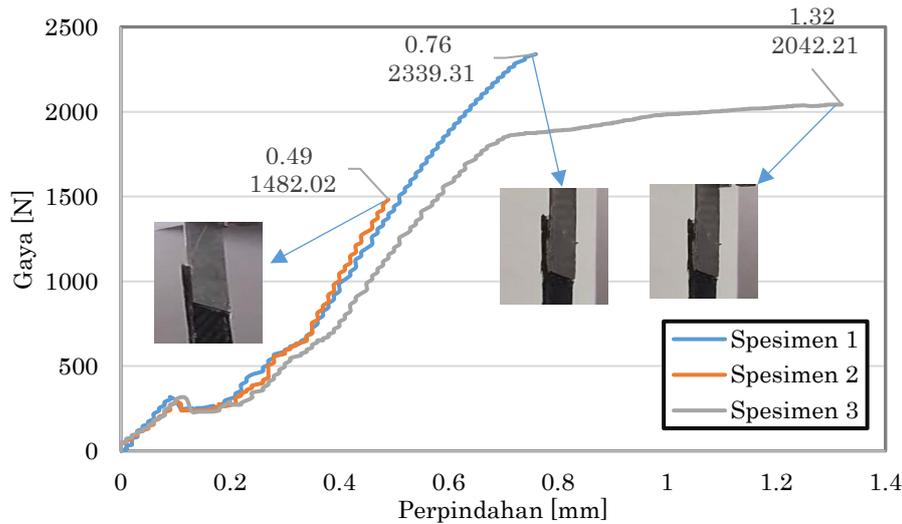
Variasi Sambungan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan + Serbuk Aluminium

Pada variasi penelitian ini, sambungan SLJ dibuat secara langsung dan dalam satu tahap manufaktur dimana perekatan sambungan dibuat secara bersamaan dengan pembuatan material komposit dengan matrik polimer berpenguat serat karbon. Matrik dan perekat menggunakan bahan yang sama yaitu perekat epoksi dengan material Aluminium AA1100 dilakukan perlakuan permukaan dengan membentuk tekstur ruang garis segiempat dan dilakukan juga penambahan penguat *nano adhesive* berbahan serbuk Aluminium. Hasil data pengujian geser pada variasi sambungan sambungan perekat epoksi dengan penambahan perlakuan permukaan dan serbuk Aluminium dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan hasil uji geser pada variasi sambungan yang dibuat dengan menggunakan perekat epoksi dan diberi perlakuan *perlakuan permukaan* membentuk tekstur alur segiempat dan dengan penambahan penguat *nano adhesive* berbahan serbuk Aluminium mendapatkan rata-rata beban gaya geser maksimal 1.954,51 N, dimana grafik korelasi antara gaya dengan perpindahan dapat di lihat pada Gambar 8.

Tabel 3. Variasi sambungan perekat epoksi + perlakuan permukaan + serbuk aluminium

No	Spesimen	F_{maks} [N]
1	Spesimen ke 1	2.339,31
2	Spesimen ke 2	1.482,02
3	Spesimen ke 3	2.042,21
Rata-rata		1.954,51

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa spesimen 1 mendapatkan nilai perpindahan 0,76 mm dengan beban gaya geser maksimal sebesar 2.339,31 N. Spesimen 2 mempunyai nilai perpindahan 0,49 mm, dengan beban gaya geser maksimal yaitu 1.482,02 N. Spesimen powder 3 mendapatkan nilai perpindahan 1,32 mm untuk beban gaya geser maksimal yaitu 2.042,21 N. Dari Gambar 8. dapat dilihat bahwa pola garis grafik juga terlihat cenderung berhimpit, hal ini dapat disimpulkan bahwa kualitas antar spesimen pada variasi ini sudah relatif seragam. Spesimen dengan penambahan penguat *nano adhesive* berpenguat Serbuk Aluminium sudah memberikan dampak peningkatan kekuatan geser sambungan jika dibandingkan dengan spesimen tanpa penambahan penguat nano, meskipun nilai kekuatannya masih dibawah dengan penambahan penguat nano berbahan CNT.



Gambar 8. Grafik Gaya dan Perpindahan untuk Variasi Sambungan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan + Serbuk Aluminium

Variasi Sambungan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan + CNT

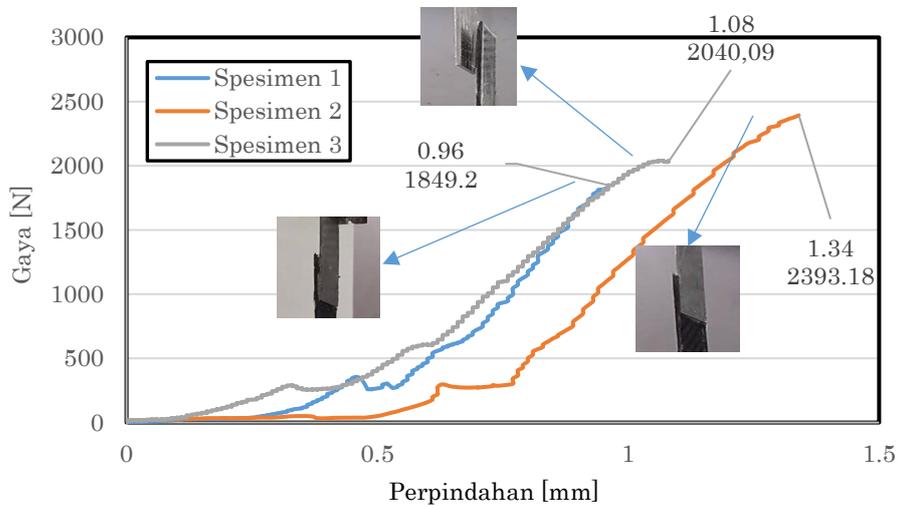
Pada variasi penelitian ini, sambungan SLJ dibuat secara langsung dan dalam satu tahap manufaktur dimana perekatan sambungan dibuat secara bersamaan dengan pembuatan material komposit dengan matrik polimer berpenguat serat karbon. Matrik dan perekat menggunakan bahan yang sama yaitu perekat epoksi dengan material Aluminium AA1100 dilakukan perlakuan permukaan dengan membentuk tekstur ruanggaris segiempat dan dilakukan juga penambahan penguat nano adhesive berbahan CNT. Hasil data pengujian geser pada variasi sambungan perekat epoksi dengan penambahan perlakuan permukaan dan CNT dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Sambungan dengan perekat epoksi + perlakuan permukaan + CNT

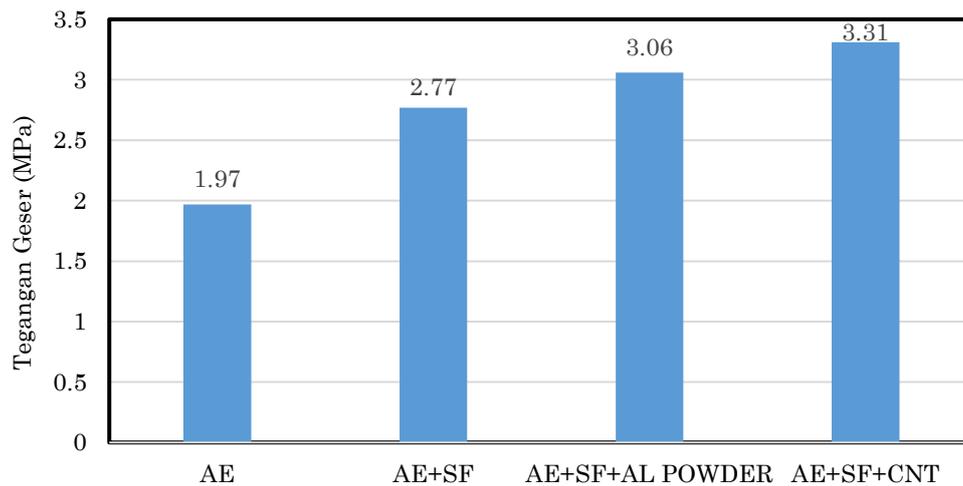
No	Test sampel	F_{maks} [N]
1	Spesimen ke 1	1.849,20
2	Spesimen ke 2	2.393,18
3	Spesimen ke 3	2.040,09
Rata-rata		2.094,15

Berdasarkan tabel hasil uji geser menggunakan campuran CNT mendapatkan rata-rata beban gaya geser maksimal sebesar 2.094,15 N. Gambar 9 adalah grafik korelasi gaya dengan perpindahan. Spesimen 1 mempunyai nilai perpindahan 0,96 mm dengan beban gaya geser dengan beban gaya geser maksimal yaitu sebesar 1.849,2 N. Selanjutnya spesimen 2 mempunyai nilai perpindahan 1,34, dengan beban gaya geser maksimal sebesar 2.393,18 N dan yang terakhir spesimen 3 mempunyai nilai perpindahan 1,08 mm, dengan beban gaya geser maksimal sebesar 2.040,09 N. Sehingga pada variasi spesimen dengan penambahan CNT dengan perlakuan permukaan dan tambahan penguat nano berupa CNT mendapatkan rata-rata beban gaya geser maksimal 2.090,84 N. Nilai tersebut dapat dilihat pada grafik korelasi antara gaya dengan perpindahan pada Gambar 9. Gambar 9 memperlihatkan pola garis pada spesimen 1, spesimen 2 dan spesimen 3 cenderung berhimpit hal ini menandakan bahwa hasil kualitas antar spesimen pada variasi ini mempunyai kualitas yang sudah cukup seragam. Kualitas yang seragam ini dihasilkan dari aplikasi metode RPC pada plat Aluminium seri AA1100, dimana proses ini membuat difusi perekat beserta penguat nano dan perekat ke dalam struktur mikro pada permukaan plat Aluminium AA1100 berlangsung dengan baik, fenomena ini sama dengan penelitian sebelumnya [10]. Difusi epoksi sebagai perekat dan penguat nano inilah yang akhirnya memperkuat kekuatan ikatan sambungan. Dapat disimpulkan bahwa variasi dengan penambahan penguat nano berbahan CNT yang menghasilkan kekuatan ikatan yang terbaik, sehingga bisa dikatakan penggunaan penguat nano berbahan CNT dapat meningkatkan kualitas sambungan

yang dilihat meningkatnya kekuatan geser sambungan jika dibandingkan dengan spesimen tanpa penguat perekat nano ataupun spesimen dengan penguat perekat nano berupa serbuk Aluminium, hal ini juga memperkuat kesimpulan penelitian sebelumnya tentang pengaruh penambahan CNT sebagai penguat ikatan sambungan pada material hibrida [10].



Gambar 9. Grafik Gaya dan Peprindahan pada Variasi Sambungan Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan + CNT



Gambar 10. Grafik Rata-Rata Tegangan Geser pada Variasi Penelitian

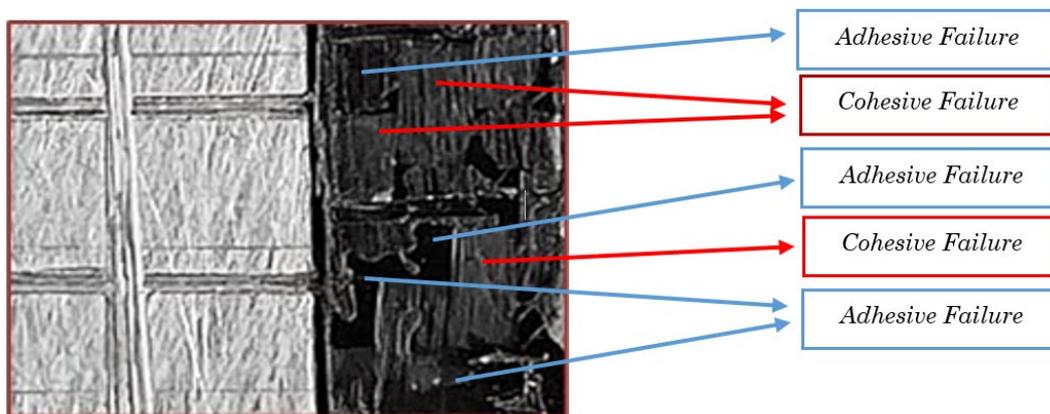
Variasi penelitian perekat epoksi + perlakuan permukaan + CNT (AE+SF+CNT) terlihat memiliki kekuatan ikatan yang paling tinggi, dengan nilai tegangan geser 3,31 MPa dan nilai luluh 93,6 MPa, yang berarti mereka dapat menahan tegangan yang lebih besar sebelum patah atau sebelum mengalami deformasi, hal ini membuat perekat yang mengandung CNT lebih mampu menahan beban geser yang tinggi daripada variasi yang lain. Penambahan CNT ke dalam perekat dapat meningkatkan *internal adhesive cohesion*, yang didapatkan dari ikatan jaringan polimer dalam *adhesive* dengan struktur penguat CNT, dimana hal ini mengurangi kemungkinan kegagalan kohesi di dalam lapisan perekat. CNT dapat membantu mendistribusikan tegangan secara lebih merata di seluruh area sambungan, mengurangi konsentrasi tegangan di titik-titik tertentu, yang biasanya menjadi penyebab utama kegagalan perekat yang kegagalan pada ikatan antar muka perekat dan plat Aluminium seri AA 1100.

Hasil Pengujian Foto Makro

Dari analisis hasil foto makro dapat diketahui bahwa tipe kegagalan atau tipe kegagalan yang terjadi pada hampir seluruh spesimen mempunyai tipe kegagalan berjenis campuran yaitu tipe

adhesive dan *cohesive failure*. Spesimen dengan variasi tanpa *nano adhesive* cenderung mengalami *adhesive failure* karena tidak menggunakan perlakuan permukaan dan tidak ada campuran *nano adhesive*, meskipun tetap terlihat kegagalan bertipe *cohesive* walupun kecil atau tidak dominan. Tipe kegagalan *adhesive* disebabkan perekat berupa epoksi tidak menempel dengan sempurna pada permukaan plat Aluminium seri AA1100. Variasi tanpa *adhesive* dengan *perlakuan permukaan* juga mengalami *adhesive failure* karena lemahnya ikatan antarmuka perekat dan plat Al seri AA 1100, hal ini membuktikan adanya peran positif pada penambahan bahan *nano adhesive* untuk meningkatkan kekuatan ikatan. Spesimen dengan tambahan penguat nano berupa CNT dan variasi Al lebih dominan mengalami *cohesive failure* dengan presentase area yang lebih banyak dari pada *adhesive failure* hal ini dapat dilihat pada Gambar 11.

Gambar 11 menunjukkan ikatan *interlaminar* (antar muka) yang diberi perlakuan dengan penambahan NRA sangat efektif untuk menambah kekuatan ikatan. Fenomena ini terlihat karena adanya sebagian besar resin yang tersisa pada plat Aluminium yang terletak pada bagian permukaan substrat hasil perlakuan permukaan. Resin yang dengan penambahan penguat CNT dapat terdistribusi ke permukaan perlakuan permukaan dengan merata, sehingga dapat menambah kekuatan ikatan antara substrat Aluminium dan perekat epoksi. Penguat perekat nano berupa Serbuk Aluminium dan CNT dapat terdistribusi secara merata pada permukaan substrat dan mengisi lubang – lubang mikro dari hasil perlakuan permukaan dikarekan aplikasi metode RPC [10].



Gambar 11. Hasil Foto Makro pada Spesimen dengan Variasi Perekat Epoksi + Perlakuan Permukaan + CNT

Kegagalan pada ikatan perekat (*adhesive failure*) terjadi ketika ikatan antara *adhesive* (perekat) dan *substrat* (Al atau CFRP) lebih rendah kekuatannya dibandingkan pada kekuatan internal substrat (matrik epoksi atau Al) ataupun pada area internal *adhesive*. Sehingga ikatan mengalami kegagalan pada daerah antar muka material, kegagalan ini terjadi karena ikatan yang kurang bagus. Ini berarti bahwa perekat tidak mampu menempel dengan baik pada permukaan bahan yang dihubungkan, sehingga menyebabkan ikatan terlepas di permukaan antarmuka. Kegagalan pada struktur internal perekat (*cohesive failure*) merupakan kegagalan yang terjadi di dalam lapisan *adhesive* itu sendiri. Artinya, perekat mengalami keretakan atau patah di dalam struktur internalnya sendiri tanpa terlepas dari permukaan *substrat*. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan perekat tidak cukup untuk menahan beban geser yang diterapkan. Pada penelitian kali ini terjadi mode kegagalan campuran sehingga dapat disimpulkan bahwa sebagian besar spesimen masih mempunyai ikatan *interlaminar* antara perekat dan *substrat* yang kurang baik, sehingga disarankan untuk penelitian selanjutnya menggunakan perlakuan permukaan yang lebih baik seperti menggunakan laser, *anodizing*, *pre-treatment* dengan bahan kimia dll.

KESIMPULAN

Penambahan *carbon nanotube* (CNT) dan serbuk Aluminium pada kekuatan geser sambungan *dissimilar material* antara Aluminium seri 1100 dan komposit berpenguat serat karbon menggunakan metode *vacuum bagging*, menunjukkan bahwa spesimen dengan penambahan *nano adhesive* CNT memiliki kekuatan geser tertinggi, dengan rata-rata mencapai 3,31 MPa, diikuti oleh spesimen

dengan *nano adhesive* Serbuk Aluminium sebesar 3,06 MPa. Spesimen yang hanya menggunakan perlakuan permukaan memiliki kekuatan geser rata-rata 1,97 MPa, sedangkan spesimen dengan perlakuan permukaan tanpa penguat nano memiliki rata-rata 2,77 MPa. Penambahan CNT dan Serbuk Aluminium sebagai penguat nano pada perekat epoksi secara signifikan meningkatkan kekuatan geser sambungan Aluminium-CFRP. Hasil analisis foto makro mengidentifikasi bahwa kegagalan yang dominan pada spesimen yang diuji adalah kegagalan campuran (*mixed mode failure*) yang meliputi *adhesive* dan *cohesive failure*. Penggunaan CNT sebagai penguat nano terbukti paling efektif dalam meningkatkan kekuatan sambungan karena kemampuannya untuk mendistribusikan tegangan dengan lebih merata, mengurangi konsentrasi tegangan di titik-titik kritis, dan memperkuat ikatan antar muka antara *adhesive* dan material yang disambung. Dengan demikian, penambahan penguat nano, khususnya CNT, membuka peluang aplikasi yang lebih luas dalam industri otomotif, penerbangan, dan konstruksi dengan keuntungan peningkatan efisiensi material dan pengurangan dampak lingkungan.

DEKLARASI

Tim penulis mengucapkan terimakasih sebanyak – banyaknya pada kampus Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta, yang telah memberikan fasilitas sarana dan prasarana sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Dengan ini penulis menyatakan bahwa pembuatan jurnal ini menggunakan bantuan teknologi kecerdasan buatan (AI) hanya untuk menerjemahkan ke bahasa Inggris di bagian Abstrak. Sedangkan bagian lain sepenuhnya dilakukan tanpa bantuan teknologi kecerdasan buatan (AI). Setiap tahap proses, mulai dari pengumpulan data, kajian literatur, hingga analisis dan penulisan, dilakukan secara manual. Penulis mengutamakan integritas akademik dan keaslian, sehingga setiap informasi yang disajikan dalam jurnal ini merupakan hasil dari penelitian yang teliti dan komprehensif. Penulis menyatakan bahwa penelitian ini tidak menerima hibah atau bantuan dana dari pihak manapun. Seluruh biaya yang dikeluarkan, termasuk untuk pembelian bahan penelitian dan pengujian laboratorium, ditanggung secara mandiri oleh tim penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Roza, I. Muthohar, S. Priyanto, "Pesawat udara kecil tanpa awak (small drone) untuk pengiriman barang", *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 14, no. 2, 2022, doi: 10.28989/angkasa.v14i2.1305.
- [2] K. Karthik, D. Rajamani, A. Manimaran, J. Udayaprakash, "Evaluation of tensile properties on glass/carbon/kevlar fiber reinforced hybrid composites", *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 1655–1660, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.049.
- [3] H. I. Firmansyah, W. Wirawan, M. N. Hariyanto, "Analysis of fiber metal composite shear strength using independent variables of fiber angle orientation and metal surface roughness", *J. Energi dan Teknol. Manufaktur JETM*, vol. 5, no. 02, pp. 29–34, 2022, doi: 10.33795/jetm.v5i02.136.
- [4] P. Dobrzański & W. Oleksiak, "Design and analysis methods for composite bonded joints", *Trans. Aeronaut. Res.*, vol. 2021, no. 1, pp. 45–63, 2021, doi: 10.2478/tar-2021-0004.
- [5] K. Diharjo dkk., "Adhesive nanosilica/Aluminium powder — Epoksi for joint application on composite car body of electrical vehicle," dalam *2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT & ICeV-T)*, Bandung, Indonesia: IEEE, Nov 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/rICT-ICeVT.2013.6741521.
- [6] F. Setiawan, & H. Ardianto, H., "Karakteristik sifat mekanis kekuatan tarik komposit *nano* partikel daur ulang pet dengan limbah abu bagase boiler", *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 5, no. 2, pp. 30-44, 2018
- [7] H. Fajarudin & R. D. Widodo, "Kekuatan tarik material fiber carbon dan fiber glass berdasarkan orientasi serat berbasis matriks epoksi", *J. Inov. Mesin*, vol. 3, no. 1, pp. 20–26, 2021, doi: 10.15294/jim.v3i1.48939.
- [8] Lumley, Roger N. www.woodheadpublishing.com *Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [9] S. Morad, "Fabrication and characterization of aluminum-carbon nanotubes (Al-CNT) functionally graded cylinders" [Master's Thesis, the American University in Cairo. AUC Knowledge Fountain, 2016, <https://fount.aucegypt.edu/etds/590>

- [10] G. Han, B. Tan, F. Cheng, B. Wang, Y.-K. Leong, X. Hu, "CNT toughened aluminium and CFRP interface for strong adhesive bonding", *Nano Mater. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 266–275, 2022, doi: 10.1016/j.nanoms.2021.09.003.
- [11] I.S. Iwanata, G. Jatisukamto, M.D. Nashrullah, M. Darsin, & A. Syuhri, "Pengaruh panjang api dan sudut injeksi terhadap produktivitas mesin DC thermal plasma dalam pembuatan nano partikel alumina", *STATOR: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 43-46, 2022.
- [12] Y. Suyoko & B.I. Muhtadi, "Ketangguhan retak komposit epoksi-serbuk cangkang kerang", *Politeknosains*, vol. 19, pp. 27-32, 2020
- [13] Sehonno & H. Ardianto, "Efek friction stir spot welding dalam pemasangan rivet terhadap sifat mekanik material aluminium seri 2024", *Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine*, vol. 7, no. 2, pp. 184–192, 2021, doi: 10.56521/teknika.v7i2.319.
- [14] F. Ramezani, B. D. Simões, R. J. C. Carbas, E. A. S. Marques, L. F. M. Da Silva, "Developments in laminate modification of adhesively bonded composite joints", *Materials*, vol. 16, no. 2, pp. 568, Jan 2023, doi: 10.3390/ma16020568.
- [15] C. Febriyanto, F. Setiawan, I.R. Putra, "Testing the bending strength of serat karbon composites using the vacuum infusion and vacuum bagging method on the UAV Skywalker 1900 Fuselage Material", *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, vol. 6, no. 1, pp. 9-19, 2023