

Analisis Kekuatan *Adhesive Bonding* Sambungan Tumpang Tunggol Aluminium 6063 - Komposit Serat Sabut Kelapa

Sri Hastuti^{1*}, Xander Salahudin¹, Catur Pramono¹, Azam Akmal Nur Irsan¹, Akhmad Nurdin²

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang

²Departemen Teknologi Rekayasa Perancangan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Ceper, Klaten

Jl. Kapten Suparman No. 39, Magelang

*E-mail: hastutisrimesin@untidar.ac.id

Diajukan: 03-10-2022; Diterima: 08-08-2023; Diterbitkan: 21-08-2023

Abstrak

Sambungan tumpang tunggal banyak digunakan pada beda material atau sama material antar adherend pada komponen sambungan mekanik. Sambungan ini diaplikasikan pada industri transportasi darat, laut dan udara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan adhesive bonding sambungan tumpang tunggal bermaterial adherend aluminium paduan 6063 dengan komposit serat sabut kelapa. Adherend diberikan kekasaran permukaan menggunakan sandpapering grid 150. Adhesive menggunakan material perekat campuran lateks karet/getah karet dengan resin epoksi (Epoksi A dan Epoksi B dengan perbandingan 1:1). Sambungan tumpang tunggal dengan ketebalan 0,4 mm dicetak dengan cetakan dan tekanan 0,1 MPa. Sambungan di post-curing 100 °C selama 100 menit. Pengujian mekanik dilakukan uji tarik geser mengacu pada standar ASTM D1002. Hasil pengujian kekasaran menunjukkan kekasaran permukaan permukaan adherend 1,93 µm. Pengujian tarik geser menunjukkan kekuatan tertinggi pada variasi campuran perekat dengan penambahan 10% getah karet dengan ketebalan perekat 0,4 mm. Kekuatan tarik geser berbanding lurus dengan modulus elastisitas sambungan tumpang tunggal. Hal ini didukung dengan pengamatan secara makro terjadi mechanical interlocking akibat kekasaran permukaan dan memberikan pengaruh peningkatkan daya rekat adhesive terhadap adherend. Mode kegagalan pada sambungan tumpang tunggal terjadi stock—break failure mode, two-stage failure mode, dan thin layer cohesive failure mode.

Kata kunci: aluminium; komposit; perekat; sambungan tumpang tunggal

Abstract

Single lap joints are widely used in different materials or the same material between adherents on mechanical joint components. This joint is applied to the land, marine, and air transportation industry. This study aims to analyze the adhesive bonding strength of single lap joints with adherend aluminum alloy 6063 with a coconut fiber composite. The adhesive was given a surface roughness using a sandpapering grid of 150. The adhesive uses a mixture of rubber latex adhesive material with epoxy resin (Epoxy A and Epoxy B with a ratio of 1:1). Single lap joints with a thickness of 0.4 mm are molded with a die and a pressure of 0.1 MPa. The joint was post-cured at 100 °C for 60 minutes. Mechanical testing was carried out by shear tensile test referring to the ASTM D1002 standard. The results of the roughness test showed that the surface roughness of the adherend surface was 1.93 µm. The shear tensile test showed the highest strength in the variation of the adhesive mixture with the addition of 10% rubber latex with an adhesive thickness of 0.4 mm. The shear tensile strength is directly proportional to the modulus of elasticity of the single-lap joints. This was supported by macro observations that mechanical interlocking occurs due to surface roughness and has the effect of increasing the adhesive power of the adherend. The failure modes for the single-lap joints are stock—break failure mode, two-stage failure mode, and thin-layer cohesive failure mode.

Keywords: aluminum; composite; adhesive; single lap joint

1. Pendahuluan

Sambungan digunakan dalam dunia industri permesinan dilakukan dengan berbagai metode antara lain pengelasan, rivet, baut, dan *adhesive bonding*. Metode sambungan *adhesive bonding* merupakan metode *mechanical fastening* yang banyak digunakan pada industri transportasi. Proses sambungan material dengan *adhesive bonding* antara dua material misal logam dengan logam, logam dengan komposit, komposit dengan komposit, logam dengan plastik, komposit dengan plastik, plastik dengan plastik, dan logam dengan keramik [1]. Keuntungan menggunakan sambungan *adhesive bonding* antara lain mudah, tanpa permesinan, tahan korosi, murah, desain sederhana, dan tahan terhadap lingkungan [2], [3]. Konfigurasi sambungan *adhesive bonding* banyak digunakan industri yaitu *single lap joint* atau dikenal sambungan

tumpang tunggal. Tipe sambungan digunakan sesuai dengan konstruksi sambungan yang akan digabungkan dan ketebalan *adhesive* serta material *adhesive* akan mempengaruhi kekuatan pada sambungan. *Adhesive bonding* banyak ditemukan untuk aplikasi teknologi konstruksi permesinan dalam industri seperti *aeronautic*, *aerospace*, elektronik, dan otomotif [4] terutama sekarang banyak penggunaan material sambungan yang sederhana dan rapi untuk bodi mobil listrik yang ringan.

Komponen utama dari karet alam adalah *polymer polyisoprene* ($\text{CH}_2\text{-C}=\text{CH}(\text{CH}_3)\text{-CH}_2$) [5]. Karet alam termasuk material *elastomer* yang dapat diregangkan dan dapat kembali ke bentuk semula (elastis). Karet memiliki keunggulan yaitu sifat elastisitas, daya redam getaran, sifat lekuk lentur (*flex-cracking*) dan umur kelelahan (*fatigue*). Perekat epoksi (memiliki kekuatan tinggi dan ketahanan suhu), *cianoacrylates* (kemampuan ikatan cepat untuk plastik dan karet, tetapi ketahanannya buruk terhadap kelembaban dan suhu), anaerobik (cocok untuk ikatan bentuk silinder), akrilik (perekat serbaguna dengan kemampuan pengawetan cepat dan tahan permukaan yang lebih kotor dan kurang siap), poliuretan (fleksibilitas yang baik pada suhu rendah dan tahan terhadap kelelahan), silikon (pelapis yang sangat baik untuk aplikasi stres rendah, tingkat fleksibilitas tinggi dan sangat tahan suhu tinggi), dan perekat suhu tinggi (*fenolik*, *polimida*, dan *bismaleimida*) [6], [7].

Aluminium digunakan dalam berbagai aplikasi industri manufaktur, karena mempunyai tahan terhadap korosi. Aluminium murni memiliki kepadatan hanya $2,70 \text{ g/cm}^3$, paduan aluminium tertentu memiliki rasio kekuatan-berat yang lebih baik dari baja kekuatan tinggi [8]. Kelebihan Silikon (Si) mengakibatkan paduan berkekuatan tinggi tanpa kehilangan mampu bentuk dan mampu las, tetapi cenderung terjadi korosi *intergranular* [9]. Komposit didefinisikan kombinasi antara dua material atau lebih yang berbeda bentuknya, komposisi kimianya, dan tidak saling melarutkan antara materialnya dimana material yang satu berfungsi sebagai penguat dan material yang lainnya berfungsi sebagai pengikat untuk menjaga kesatuan unsur-unsurnya. Material penyusun komposit terdiri dari pengisi/ matrik dan penguat/ *reinforcement* [10]. Penggunaan material serat sabut kelapa dapat mereduksi material *pollutan* karena digantikan dengan komposit berenguat serat alam yang ramah lingkungan.

Perlakuan pengkasaran permukaan *adherend* dapat meningkatkan *mechanical interlocking* dan kegagalan kohesif pada sambungan dengan perekat epoksi [11]. Kekuatan sambungan tumpang tunggal perekat campuran epoksi-*silyl modified polymer*. Penambahan perekat *silyl modified polymer* pada perekat campuran secara banyak akan menurunkan kekuatan tarik geser sambungan tumpang tunggal [2]. Kegagalan sambungan dengan perekat aluminium *powder*-epoksi mengalami kohesif *failure mode* [12]. Penambahan partikel aluminium *powder* dalam perekat epoksi meningkatkan kekuatan sambungan aluminium-komposit GFRP dengan *pattern 90⁰ cross-type*. Mode kegagalan terjadi pada sambungan aluminium-komposit GFRP dengan penambahan aluminium *powder* pada perekat epoksi adalah *mixed mode* [13]. Tipe mode kegagalan sambungan single lap joint (SLJ) antara lain : *adhesive failure* (kegagalan sambungan perekat menempel pada salah satu permukaan *adherend* saja), *cohesive failure* (kegagalan sambungan perekat menempel pada kedua permukaan *adherend* dengan ketebalan yang sama), *thin layer cohesive failure* (kegagalan sambungan perekat menempel pada permukaan *adherend* dengan ketebalan perekat satu sisi tebal dan satu sisi tipis), *fiber-tear failure* (kerusakan berupa robekan pada satu sisi permukaan *adherend fiber* tanpa merobek perekat), *light-tear failure* (kerusakan berupa robekan pada salah satu permukaan *adherend* dan perekat terlepas dari permukaan *adherend*), *stock-break failure* (patahan pada satu sisi *adherend* tanpa merusak area perekat), dan *two-stage failure* (kerusakan pada perekat dan *adherend* yang tidak merata kerusakannya) [14]. Komposit dengan serat alam serat kenaf pada komposit sandwich dengan core kayu *Albizzia Falcataria* mengalami kegagalan pengujian bending berupa patahan karena tidak mampu menahan beban dengan jenis kegagalan salah satunya yaitu fiber pull out [15][16].

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu yang telah dilakukan maka diperlukan suatu inovasi sambungan dengan ketebalan dan perekat campuran serta *adherend* dengan material yang ramah lingkungan daris serat sabut kelapa. Oleh karena itu diperlukan analisis kekuatan mekanik pada sambungan tumpang tunggal terhadap pengujian tarik geser pada sambungan aluminium dengan komposit serat sabut kelapa.

2. Material dan metodologi

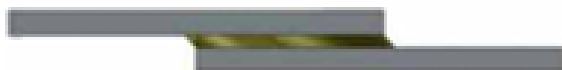
Material *adherend* menggunakan aluminium paduan 6063 dan komposit dengan material serat sabut kelapa acak dengan fraksi volume serat 30%. Matrik komposit menggunakan *Unsaturated Polyester Resin Yukalac BQTN 157*. Adherend komposit serat kelapa mengacu pada ASTM D-790. Perekat campuran pada sambungan tumpang tunggal menggunakan getah karet alam yang disadap dari pohon karet. Perekat Epoksi menggunakan tipe A dan B dengan perbandingan Resin Epoksi A dan *Hardener* B yaitu 1:1.

Pembuatan *adherend* komposit menggunakan metode cetak tekan dengan tekanan 50 bar selama 24 jam [17]. Permukaan *adherend* aluminium dan komposit diberikan perlakuan kekasaran *sandpapering grid 150*. Variasi komposisi perekat campuran lateks karet (LK) dengan epoksi (EP) ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabulasi spesimen sambungan tumpang tunggal

Jenis Spesimen	Perlakuan Permukaan	Tebal perekat	Perekat lateks karet-epoksi
Sambungan tumpang tunggal aluminium - komposit	<i>sandpapering grid 150</i>	0,4 mm	0% : 100%
	<i>sandpapering grid 150</i>	0,4 mm	10% : 90%
	<i>sandpapering grid 150</i>	0,4 mm	20% : 80%
	<i>sandpapering grid 150</i>	0,4 mm	30% : 70%

Sambungan dilakukan tumpang tunggal/ *single lap joint* antar *adherend* menggunakan perekat campuran. *Single lap joint* (SLJ) ditunjukkan pada gambar 1. Sambungan sebelum di uji tarik geser didiamkan selama 24 jam, lalu dilakukan proses post-cure pada temperatur 100⁰ C selama 100 menit [18]. Pengujian tarik geser mengacu ASTM D 1002 dan pengamatan kegagalan sambungan diamati secara makro.

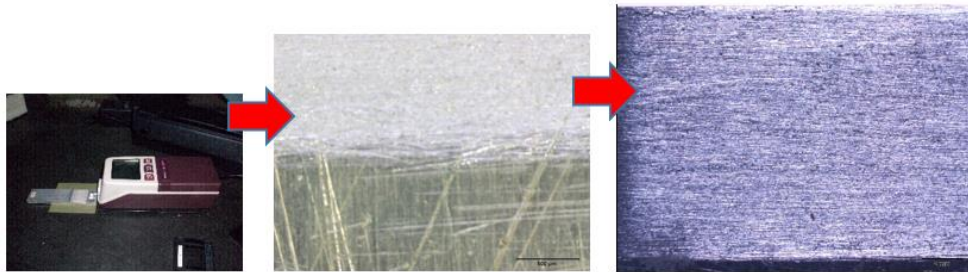


Gambar 1. Sambungan tumpang tunggal

3. Hasil dan pembahasan

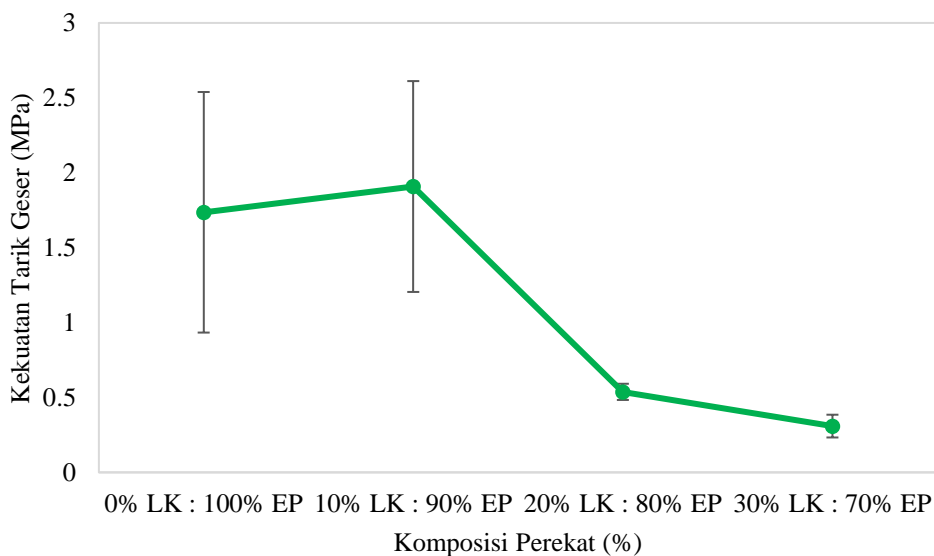
Penampang *adherend* diberikan kesaran berupa *sandpapering* dengan *grid 150*. Kekasaran pada permukaan *adherend* pada permukaan aluminium dan komposit memberikan pengaruh peningkatan kekuatan mekanik sambungan, sehingga

meningkatkan daya rekat. Pengujian kekasaran pada permukaan aluminium didapatkan nilai kekasaran sebesar $1,93 \mu\text{m}$. Foto makro kekasaran permukaan *adherend* aluminium ditunjukkan pada gambar 2. Morfologi permukaan aluminium membentuk sayatan, sehingga memberikan pengaruh kekasaran pada permukaan aluminium dan meningkatkan ikatan bonding yang dapat meningkatkan *mechanical interlocking* pada sambungan tumpang tunggal.



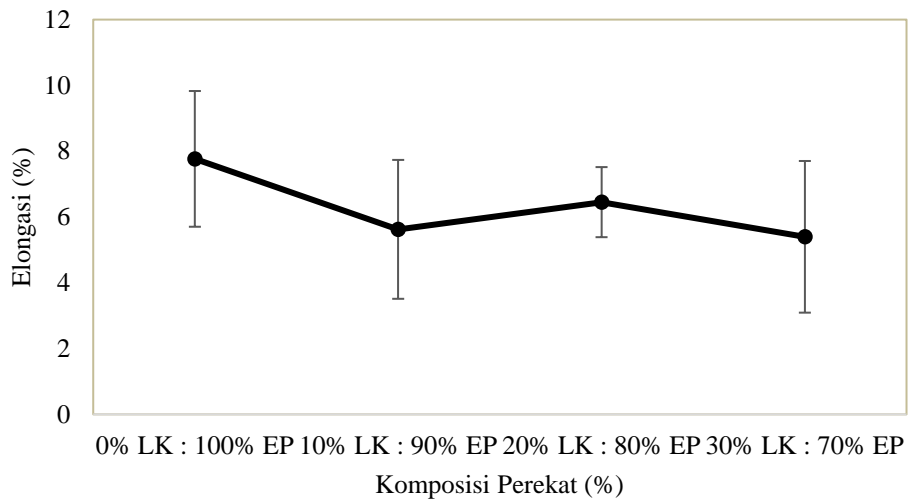
Gambar 2. Morfologi kekasaran permukaan aluminium

Sambungan sambungan tumpang tunggal menggunakan *adherend* aluminium dengan komposit berpenguat serat sabut kelapa merupakan salah satu inovasi rekayasa material pada sambungan beda material *adherend* [19] dan menggunakan perekat campuran. Hasil pengujian tarik geser dari sambungan *adherend* aluminium 6063-komposit serat sabut kelapa dengan ketebalan perekat 0,4 mm ditunjukkan pada gambar 3. Kekuatan sambungan berdasarkan variasi komposisi perekat 0%LK : 100%EP , 10%LK : 90%EP , 20%LK : 80%EP , dan 30%LK : 70%EP menunjukkan trend yang meningkat pada pemberian sedikit perekat lateks karet/ getah karet. Kekuatan Tarik geser tertinggi dibandingkan variasi perekat lain pada variasi komposisi perekat 10% LK : 90% EP ketebalan perekat 0,4 mm dengan nilai 1,908 MPa. Perekat campuran memiliki kekuatan yang cukup kuat karena peran epoksi yang tinggi dengan penambahan sedikit lateks karet/ getah karet, sehingga dapat melekat kuat pada permukaan *adherend*. Lateks karet/ getah karet memiliki peran menjaga daya rekat antara perekat dengan *adherend* karena lemah dan ulet. Pada perekat epoksi kekuatan tarik geser sebesar 1,73 MPa. Epoksi memiliki peran terhadap gaya kohesinya, karena kekuatan dan kekakuannya. Penambahan lebih banyak lateks karet/ getah karet menyebabkan penurunan kekuatan geser sambungan. Hal ini juga dipengaruhi oleh jenis perekat, tebal perekat, dan *area lap join adhesive* [2][3][20][21].

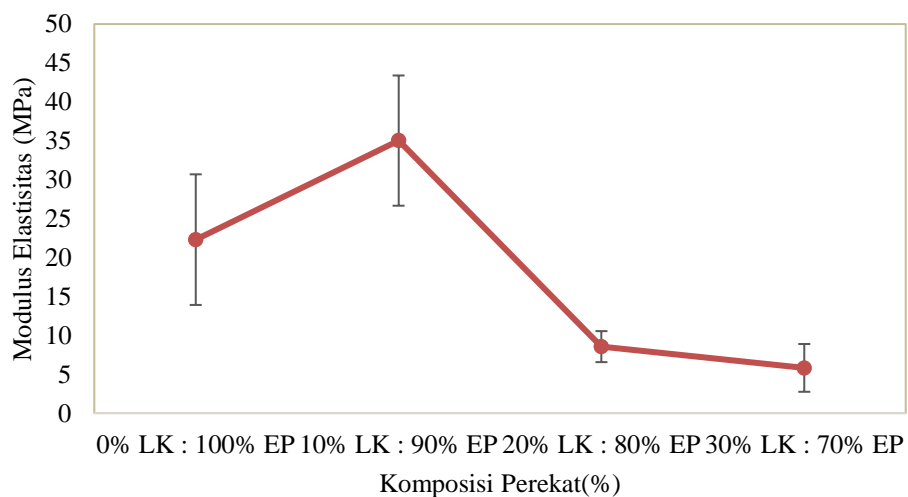


Gambar 3. Kekuatan tarik geser sambungan tumpang tunggal

Modulus elastisitas pada sambungan sambungan tumpang tunggal ditunjukkan pada gambar gambar 5. Elongasi nilainya berbanding terbalik dengan kekuatan tarik geser dan berbanding lurus dengan modulus elastisitas ditunjukkan pada gambar 3., gambar 4., dan gambar 5.. Modulus elastisitas tertinggi pada variasi perak campuran 10% LK : 90% EP sebesar 35,035 MPa. Penambahan sedikit lateks karet/ getah karet pada perekat epoksi dapat meningkatkan nilai modulus elastisitas perekat campuran terlihat pada gambar 5. Semakin banyak kandungan perekat epoksi pada perekat campuran maka nilai modulus elastisitas semakin tinggi dari perekat campuran yang sedikit epoksi. Hal ini karena perekat epoksi memiliki kekakuan yang tinggi, sehingga perekat epoksi memiliki modulus elastisitas tinggi [2], [3], [22]. Elongasi sambungan *adhesive* pada ditunjukkan pada Gambar 4.



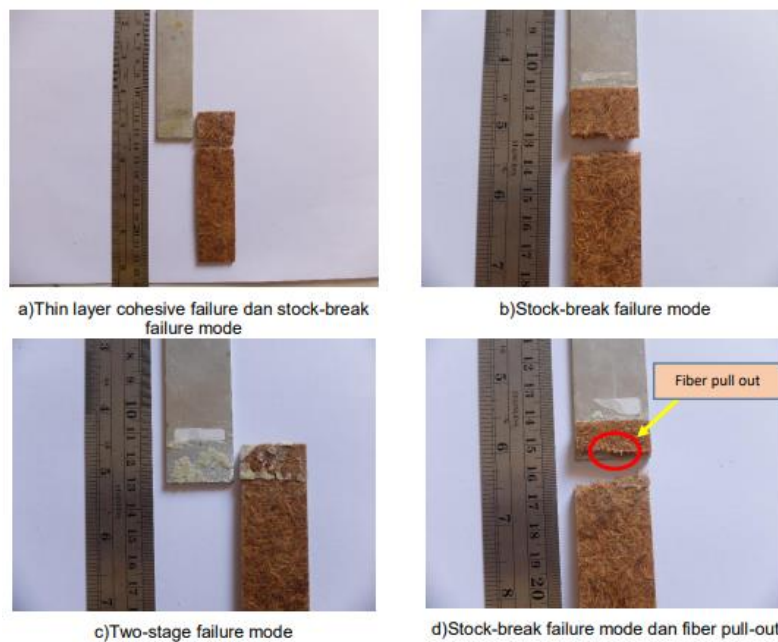
Gambar 4. Elongasi sambungan tumpang tunggal



Gambar 5. Modulus elastisitas sambungan tumpang tunggal

Hasil pengujian tarik geser menunjukkan beberapa patahan yang terjadi. Patahan atau mode kegagalan pada sambungan tumpang tunggal ditunjukkan pada gambar 6. diamati secara makro. Pengamatan ini dilakukan untuk menganalisis mekanisme kegagalan dan peningkatan kekuatan sambungan dengan perekat campuran. Kegagalan pada sambungan gambar 6.a dengan variasi mengalami *thin layer cohesive failure* dan *stock-break failure mode* pada patahan *adherend* komposit. Kegagalan pada sambungan gambar 6.b. mengalami *stock-break failure mode* pada patahan *adherend*

komposit. Kegagalan pada sambungan gambar 6.c. mengalami *two stage failure mode* perekat terobek tidak merata dan masih melekat pada kedua sisi adherend aluminium-komposit. Kegagalan pada sambungan gambar 6.c. dengan penampakan perekat terobek dan masih melekat pada sisi adherend komposit [6], [14]. Kegagalan pada sambungan gambar 6.d. mengalami *stock-break failure mode* dan terjadi *fiber pull-out* pada patahan *adherend* komposit. Penambahan sedikit lateks karet 10% dalam perekat epoksi dapat memberikan pengaruh peningkatan daya rekat *mixed adhesive* dan memberikan mode kegagalan *thin layer* sehingga dapat mengontrol pada sambungan SLJ [3].



Gambar 6. Mode kegagalan pada sambungan tumpang tunggal

4. Kesimpulan

Perekat campuran pada sambungan tumpang tunggal dengan kekasaran permukaan *adherend* 1,93 μm menggunakan *sandpapering grid* 150 dan ketebalan perekat 0,4 mm telah selesai dilakukan pengujian. Hasil studi menunjukkan bahwa pemberian perlakuan kekasaran pada permukaan *adherend* aluminium – komposit memberikan peningkatan daya adhesi yang baik, karena terjadi ikatan antara perekat dengan *adherend*. Penambahan material perekat lateks karet/ getah karet 10 % dengan ketebalan perekat 0,4 mm pada perekat resin epoksi dapat memberikan peningkatan kekuatan tarik geser dan berbanding lurus dengan peningkatan modulus elastisitas. Mode kegagalan terjadi pada sambungan tumpang tunggal antara lain : *stock-break failure mode*, *thin layer cohesive failure mode*, *two-stage failure mode mode*, dan terjadi *fiber pull out*. Hal ini karena perekat terobek saat menerima beban geser dan perekat mempunyai daya tahan adhesi yang kuat, sehingga sambungan mengalami *thin layer cohesive* dan *two-stage failure mode*. Pemberian getah karet memberikan pengaruh sifat perekat menjadi lebih ulet dan menurunkan kekakuan dari perekat epoksi karena proses pencampuran perekat.

Ucapan terima kasih

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada LPPM Universitas Tidar yang sudah memberikan dukungan dana dalam penelitian bidang keilmuan dosen pratama tahun 2022.

Daftar Pustaka

- [1] A. Baldan, “Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment,” *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 1–49, 2004, doi: 10.1023/B:JMSC.0000007726.58758.e4.
- [2] S. H. Triyono and N. S. Suharty, “Shear strength of the mixed adhesive joint silyl modified polymer-epoxy in single lap joint aluminum,” *J. Mech. Eng.*, vol. SI 4, no. 1, pp. 235–248, 2017.
- [3] S. Hastuti, N. S. Suharty, and Triyono, “Joint strength of mixed silyl modified polymer-epoxy adhesive on single lap joint etched aluminum,” *J. Teknol.*, vol. 79, no. 7–2, pp. 39–44, 2017, doi: 10.11113/jt.v79.11873.
- [4] M. D. Banea, L. F. M. Da Silva, and R. J. C. Carbas, “Debonding on command of adhesive joints for the automotive industry,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 59, pp. 14–20, 2015, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2015.01.014.
- [5] W. Andriyanti, Darsono, and W. Faisal, “Kajian metode vulkanisasi lateks karet alam bebas nitrosamin dan protein alergen,” *Pros. PPI - PDIPTN 2010*, pp. 161–169, 2010.
- [6] M. D. Banea and L. F. M. Da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009, doi: 10.1243/14644207JMDA219.
- [7] M. D. Banea and L. F. M. da Silva, “Mechanical characterization of flexible adhesives,” *J. Adhes.*, vol. 85, no. 4–5, pp. 261–285, 2009, doi: 10.1080/00218460902881808.
- [8] K. Mutombo and M. du, “Corrosion Fatigue Behaviour of Aluminium 5083-H111 Welded Using Gas Metal Arc Welding Method,” *Arc Weld.*, 2011, doi: 10.5772/25991.
- [9] M. Nofri, “Analisis Perubahan Sifat Mekanik Al 6063 Setelah Dilakukan Heat Treatment Pada Temperatur Tetap Dengan Waktu Tahan Yang Bervariasi,” *Bina Tek.*, vol. 16, no. 1, p. 35, 2020, doi: 10.54378/bt.v16i1.1757.
- [10] B. Maryanti, A. Sonief, and S. Wahyudi, “Pengaruh Alkalisasi Komposit Serat Kelapa-Poliester Terhadap Kekuatan Tarik,” *Rekayasa Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 123–129, 2011.
- [11] K. S.-N. * Ala Abedinzadeh Andarabi and Tajbakhsh Navid Chakherlou, “S0143749622000173.pdf,” *Eff. laser Surf. Struct. patterns interfacial Resist. Alum. joints Bond. with epoxy Adhes.*, vol. 114, no. 103101, pp. 1–17, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103101>.
- [12] K. Diharjo *et al.*, “Adhesive nanosilica/aluminium powder-Epoxy for joint application on composite car body of electrical vehicle,” *Proc. 2013 Jt. Int. Conf. Rural Inf. Commun. Technol. Electr. Technol. rICT ICEV-T 2013*, pp. 13–17, 2013, doi: 10.1109/rICT-ICeVT.2013.6741521.
- [13] K. Diharjo, Y. Firdaus, W. W. Raharjo, and D. D. D. P. Tjahjana, “Improvement of strength on joint of GFRP/A1-5083 joint using Epoxy/Al-powder adhesive for electric vehicle car body,” *Proc. 2014 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. ICEECS 2014*, no. November, pp. 193–196, 2014, doi: 10.1109/ICEECS.2014.7045244.
- [14] A. Sadeghi, R. Mahshid, M. Heidari-rarani, and L. Lessard, “International Journal of Adhesion and Adhesives Effect of lamina fiber orientation interfaced with semi-flexible adhesive layer on strength and failure mode of composite single-lap joints,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 118, no. August, p. 103232, 2022, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2022.103232.
- [15] S. Hastuti, C. Pramono, and P. Paryono, “Peningkatan Kekuatan Mekanik Komposit Sandwich Serat Kenaf dengan Core Kayu Albizzia Falcataria untuk Material Dinding Komposit,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 2, p. 249, 2022, doi: 10.32497/jrm.v17i2.3216.
- [16] A. Nurdin, S. Hastuti, H. P. D., and R. H., “Pengaruh Alkali dan Fraksi Volume terhadap Sifat Mekanik Komposit Serat Akar Wangi – Epoxy,” *Rotasi*, vol. 21, no. 1, p. 30, 2019, doi: 10.14710/rotasi.21.1.30-35.

- [17] F. Paundra, Z. Z. Muttaqin, F. P. Nurullah, E. Pujiyulianto, F. Budi, and R. Artikel, "PENGARUH VARIASI FRAKSI VOLUM TERHADAP KEKUATAN TARIK KOMPOSIT HYBRID BERPENGUAT SERAT PELEPAH PISANG DAN SERAT," pp. 6–8, 2022.
- [18] W. S. Chow and Y. P. Yap, "Optimization of process variables on flexural properties of epoxy/organo-montmorillonite nanocomposite by response surface methodology," *Express Polym. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 2–11, 2008, doi: 10.3144/expresspolymlett.2008.2.
- [19] M. K. Budzik *et al.*, "Testing mechanical performance of adhesively bonded composite joints in engineering applications: an overview," *J. Adhes.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–77, 2021, doi: 10.1080/00218464.2021.1953479.
- [20] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, M. D. Banea, and L. F. M. Da Silva, "Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 57, pp. 125–132, 2015, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.12.004.
- [21] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, M. D. Banea, and L. F. M. Da Silva, "Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 53, pp. 15–22, 2014, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.01.015.
- [22] H. Long, H. Ma, Y. Wei, and Y. Liu, "A size-dependent model for predicting the mechanical behaviors of adhesively bonded layered structures based on strain gradient elasticity," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 198, no. January, p. 106348, 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106348.