G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan
Vol. 8, No. 1, Januari 2024, pp. 632-643
E-ISSN: 2623-064X | P-ISSN: 2580-8737

Design Join Composite Memanfaatkan Ketahanan Alam dari Cabang Pohon untuk Meningkatkan Toleransi Kerusakan

Jusef Saiful[1]✉, Muhammad Yusuf[2], Sunarko[3]

[1, 2] Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Banyuwangi, Indonesia
[3] Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Banyuwangi, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diserahkan : 15-01-2024
Direvisi : 18-01-2024
Diterima : 20-01-2024

ABSTRAK

Optimalisasi dan inovasi diperlukan dalam meningkatkan ketahanan transportasi, khususnya melalui perbaikan sambungan. Sambungan memainkan peran penting, terutama dalam desain struktur yang sering menggunakan berbagai jenis sambungan. Penggunaan komponen sambungan komposit yang terinspirasi dari alam, seperti sambungan ranting pohon, dapat menjadi solusi untuk meningkatkan ketahanan sambungan. Ranting batang pohon memiliki sifat struktural yang diinginkan, termasuk kekuatan, ketangguhan, ketahanan terhadap kelelahan, dan toleransi terhadap kerusakan. Penerapan *Advanced Addictive Manufacturing*, seperti *stereo-lithography*, digunakan untuk menggabungkan struktur serat dalam desain sambungan. Sambungan ini bertujuan menggantikan baut dan mur, yang dapat merusak serat penahan beban dan meningkatkan tekanan lokal. Pengujian menunjukkan bahwa desain sambungan terinspirasi dari ranting pohon, khususnya dengan 37,5% tertanam, memberikan hasil paling optimal dengan nilai tegangan, *displacement*, dan *safety* factor terbaik dibandingkan variasi desain lainnya.

Kata Kunci:

Join Composite, Cabang pohong, Toleransi kerusakan

Keywords **:**

Join Composite, Tree branches, Damage tolerance.

ABSTRACT

Optimization and innovation are necessary to enhance the resilience of transportation, particularly through the improvement of connections. Connections play a crucial role, especially in structural designs that often utilize various types of joints. The use of composite connection components inspired by nature, such as tree branch connections, can be a solution to improve joint resilience. Tree branch connections exhibit desired structural properties, including strength, toughness, fatigue resistance, and damage tolerance. The application of Advanced Additive Manufacturing, such as stereo-lithography, is employed to integrate fiber structures in joint designs. These joints aim to replace bolts and nuts, which can damage load-bearing fibers and increase local stresses. Testing indicates that tree branch-inspired joint designs, especially with 37.5% embedding, provide the most optimal results with the best values for stress, displacement, and safety factors compared to other joint design variations.

Corresponding Author **:**
Jusef Saiful
Pogram Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Banyuwangi, Indonesia
Jl. Laksda Adi Sucipto, Taman Baru, Banyuwangi, Jawa Timur
Email: jusefsaiful@untag-banyuwangi.ac.id

This is an open access article under the CC BY license

PENDAHULUAN

Industri transportasi terus berupaya mengembangkan sturktur yang lebih efisien, kuat, daya akan kerusakan tinggi, serta mengurangi bobot total sebuah kendaraan, terdapat tiga poin pengembangan utama yang dapat dioptimalkan, seperti bahan bakar yang efisien, inovasi teknologi, dan kontruksi kendaraan (W. S. De Carvalho, 2022). Penggunaan sambungan merupakan salah satu kunci dalam menentukan kekuatan dan beban total sebuah desain struktur. Menganalisis kekuatan sambungan penting untuk dilakukan agar mengetahui seberapa kuat sambungan pada desain struktur, sehingga terhindar dari kerusakan pada saat penggunaan desain tersebut(L. A. Burns, 2012). Pengomptimalan dan inovasi perlu dilakukan untuk meningkatkan produktivitas dan daya tahan sebuah transportasi.

Pesawat merupakan salah satu contoh dimana sambungan menjadi salah satu aspek penting yang harus diperhatikan, hal tersebut dikarenakan dalam pembuatan desain strukturnya menggunakan banyak sambungan (C. He, F. Zhan, 2023). Penggunaan struktur komposit *black aluminium* menjadi pilihan utama dalam pembuatan sambungan kapal dan pesawat. Komponen komposit tersebut umumnya disambung menggunakan baut dan paku keling, hal tersebut dapat merusak serat penahan beban yang menimbulkan *local stresses* meningkat sehingga mengakibatkan daerah yang sudah melemah terputus . Berbagai teknik dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi struktural dan toleransi kerusakan pada sambungan komposit, seperti menggunakan *toughened adhesives*, *thermoplastic interleaving*, dan *through-thickness reinforcement by stitching*, *pinning or tufting*.

Inovasi pendekatan untuk meningkatkan toleransi kerusakan sambungan komposit salah satunya denfan memodisfikasi desain dengan terinspirasi alam atau yang biasa disebut *biomimetic*. Ilmu biomimetic bertujuan untuk menerapkan prinsip-prinsip desain dari alam serta diterapkan juga pada material dan struktur rekayasa(P. Chen and A. Y. Lin, 2008). Prinsip join dapat ditemukan di alam seperti pada kayu atau tulang yang mengoptimalkan diri dengan regangan maksimal(L. A. Burns, 2012). Memaksimalkan regangan batas yang seragam pada setiap sambungannya menjadi nilai tambahan pada desain struktur, karena tidak ada mertial yang terbuang dan tidak ada titik lemah tertentu yang sangat rentan mengalami keretakan.

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan desain sambungan struktural yang ditemukan di alam sekitar, hal tersebut untuk meciptakan konsep baru pada sambungan komposit. Fokus utama penelitian terletak pada peningkatan toleransi kerusakan pada join, desain sambungan pohon memberikan efisiensi struktural dan toleransi kerusakan yang tinggi. Pohon menjadi inspirasi dalam pembuatan join karena memiliki struktur serat yang mirip dengan bahan *reinforced polymer* (M. Eder, 2009). Sambungan ranting batang pohon memiliki sifat struktural yang diinginkan dalam sambungan komposit, seperti *strength, toughness, fatigue resistance* dan *damage tolerance*.

Pohon dapat merespon pembebanan yang disebabkan oleh angin dan berat dari cabang dengan menyesuaikan sifat material dinding sel kayu dan struktural sambungan (Z. Bo and Y. Yan, 2007). Menggabungkan elemen kayu dari skala nano, mikro, dan makro untuk menetralkan konsentrasi tegangan, hal tersebut bisa terjadi dikarenakan geometri cabang terhubung ke batang pohon. Peneliti umumnya melakukan pendekatan material dan desain struktur dengan terpisah, tetapi dalam di alam desain menggunakan interaksi material dan struktur yang saling terhubung (K. J. Æ. Ju, 2009). Hasil dari pedekatan alam tersebut, pohon dapat mencapai respon maksimal regangan pada seluruh sambungannya.

Penerapan inovasi desain komposit ini sedikit sulit dilakukan karena kerterbatasan teknologi manufaktur. Beberapa struktur komposit dibuat dari bahan *fabricated* yang sudah memiliki struktur sebelumnya, teknologi manufaktur yang dapat digunakan untuk menempatkan struktur serat yang sesuai seperti *fibre steering* yang memiliki kemampuan menggabungkan struktur serat terinspirasi dari ilmu biologi . Penerapan *Advanced Addictive Manufacturing* seperti *stereo-lithography* juga dapat dilakukan untuk menggabungkan struktur serat, desain sambungan pohon dapat diadaptasi ke sambungan industri dengan menggunakan metode manufaktur komposit modern. Salah satu penerapatnya dapat diaplikasikan pada sambungan T, dengan bagian tengah

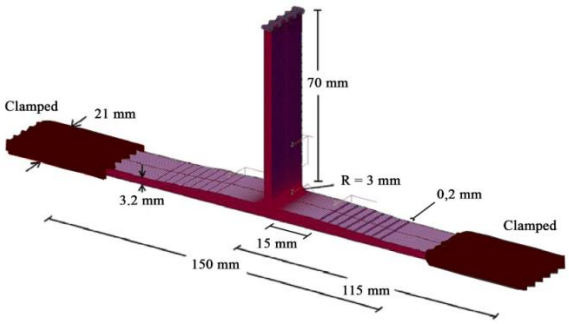
tertanam pada batang dengan tujuan untuk meningkatkan toleransi kerusakan sambungan. Penelitian ini mengacu pada maksimal beban dan regangan yang diuji melalui metode komputasional.

Beberapa penelitian sebelumnya telah melalukan uji eksperimen terhadap sambungan *epoxy* T-peelimg menggunakan model zona kohesif potensial, model terssbut digunakan untuk memodelkan adhesi antar strip logam yang terikat (M. Alfano, 2011). Sifat kohesif seperti kekuatan dan energi patah memiliki pengaruh signifikan pada kulit yang mengelupas akibat pembebanan yang dilakukan. Perbandingan hasil eksperimental dan simulasi numerik menunjukkan bahwa ketangguhan sambungan *epoxy* T-peeling memiliki kekuatan yang lebih tinggi . Berkembangnya teknologi manufaktur membuat penerapan komposit semakin luas, hal tersbut karena komposit mempunyai berat yang ringan namun memiliki kekuatan yang tinggi. Inspirasi sambungan dari alam dapat menjadi alternatif, kekuatan kayu dan optimalisasi struktur internal pohon dapat berfungsi sebagai model untuk meningkatkan perilaku mekanis komposit yang diperkuat dengan struktur serat (K. Götz and C. Mattheck, 2001). Teori kegagalan Tsai-Hill digunakan dalam pengujian, teori tersebut mengukur kekuatan komposit. Eksperimen yang telah dilakukan dengan memberikan informasi tentang margin fraktur pada suatu titik tetapi tidak memprediksi kegagalan pada seluruh komponen, hasil yang didapat berupa meniru serat pohon pada komposit berfungsi untuk meningkatkan sifat mekanis komposit .

Penelitian terhadap dua inovasi tersebut diterapkan pada sambungan T komposit yang terinspirasi dari cabang pohon. Pengujian yang dilakukan secara garis besar menjelaskan strategi desain terinspirasi bio berbasis sambungan cabang pohon untuk meningkatkan toleransi kerusakan dari sambungan T komposit. Fitur desain dari sambungan cabang pohon yang dimanfaatkan seperti desain terintegrasi, susunan serat tiga dimensi, dan kerapatan serat yang bervariasi, diadaptasi ke dalam sambungan T karbon/epoksi . Namun, terdapat kekurangan dalam penelitian tersebut dalam variasi pengujiannya yang hanya dilakukan pada ketebalan 0,2 mm dan strutuk lapisan tertanam 25%, 50%, dan 75%. Penelitian lebih lanjut pada lapisan dan ketebalan yang belum diuji perlu dilakukan, hal tersebut bertujuan untuk mengetahui nilai toleransi kerusakan yang optimal pada desain sambungan T yang terinspirasi dari cabang pohon.

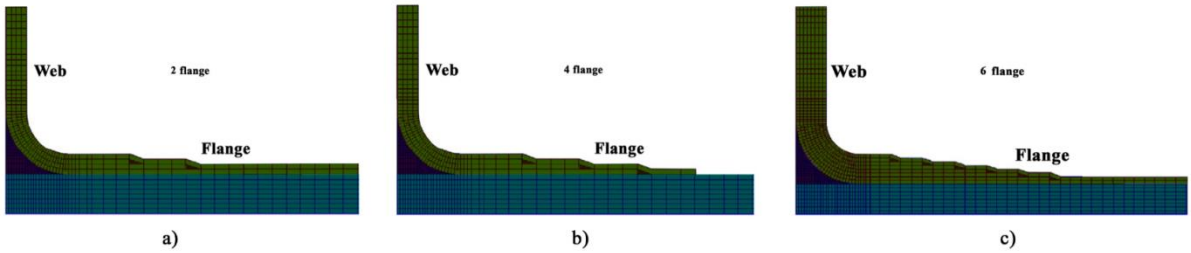
METODE KOMPUTASIONAL

Spesimen sambungan T dengan geometri yang ditunjukkan pada Gambar 1, dibuat dari pra-preg karbon/epoksi yang diawetkan dalam *auto-clav* pada suhu 180°C selama 2 jam dengan tekanan 690 kPa (100 psi). Komposit tersebut terdiri dari matriks epoksi (3501-6) yang diperkuat dengan satin lima harness karbon 6 K (*Carbon UD* 230 GPa) dengan ketebalan lapisan yang diawetkan sebesar 0,2 mm. Radius 3 mm pada spesimen dijaga konstan untuk semua desain sambungan-T. Wilayah D-fillet di dasar jaring di setiap desain sambungan diisi dengan segitiga yang dibentuk dari karbon atau epoksi pra-preg untuk meminimalkan pembentukan rongga. Kulit dan *flange* dari T-*joint* diikat dengan proses *co-curing* tanpa perekat film. Sambungan desain termasuk jaring vertikal 70 mm, radius jari-jari luar 3 mm, panjang sebelum *flange* 15 mm, *horizontal skin* 230 mm yang berisi bagian yang berfungsi dari 150 mm dan lebar 21 mm.

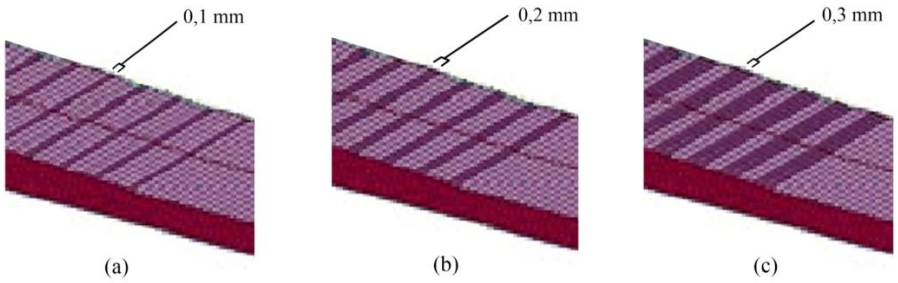


Gambar 1. Geometri Sambungan T

Penelitian ini menguji dengan tiga klasifikasi sendi tertanaman yang terinspirasi dari batang pohon, klasifikasi dilakukan berdasarkan perbedaan lapisan dan tingkat integrasi *flange* ke kulit batang. Tiga tingkatan klasfikasi pada batang dan sambungan diteliti dari 12,5%, 25%, dan 37,5% dari kedalaman kulit. Klasifikasi 12,5% terdapat 2 lapisan *flange* dari total 16 lapisan, 25% terdiri dari 4 lapisan *flange* dari total 16 lapisan, dan 37,5% terdiri dari 6 lapisan *flange* dari total 16 lapisan antara batang dan sambungan. Tiga klasifikasi juga dilakukan pada ukuran ketebalan lapisan *flange* pada sambungan yaitu 0,1 mm, 0,2 mm, dan 0,3 mm.



Gambar 2. Lapisan Sambungan T (a) Lapisan 12,5% tertanam (b) Lapisan 25% tertanam (c) Lapisan 37,5% tertanam

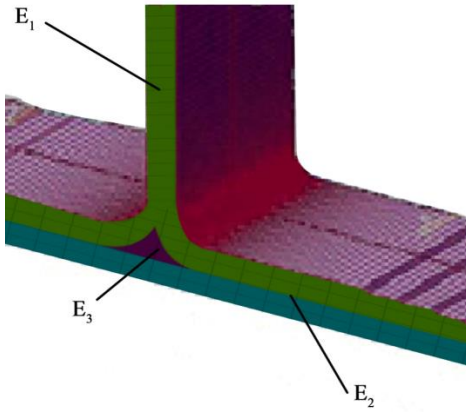


Gambar 3. Tebal Lapisan Sambungan T (a) Tebal Lapisan 0,1 mm (b) Tebal Lapisan 0,2 mm (c) Tebal Lapisan 0,3 mm

Sambungan T dengan jumlah lapisan yang semakin banyak memiliki wilayah *D-fillet* yang lebih besar, hal tesebut menyebabkan meningkatnya radius dalam pada sambungan. Pendekatan luas *D-fillet* dapat dilakukan dengan segitiga, dimana tinggi menggunakan radius dalam dan panjang menggunakan dua kali radius dalam. Sambungan T *bio-inspered* memiliki lebih sedikit material pada *flange* karena menggunakan konsep kulit seperti pada batang pohon. Hasil beban-perpindahan disesuaikan dengan area *flange*, yang dihitung sebagai *flange* rata-rata lebar ketebalan *T-joint*. Hal tersebut dilakukan untuk menguji sifat mekanik dari sambungan *bio-inspired* yang spesifik dalam sambungan.

Boundary Condition

Terdapat beberapa perlakuan khusus terhadap sifat material yang digunakan dalam penelitian ini, hal tersebut dikarenakan penggunaan serat lapisan yang diterapkan. Gambar 3 menunjukkan bagian yang memiliki sifat khusus setelah dilakukan pengujian secara eksperimental(L. Burns, 2014). Menggunakan *meshing* 1 mm dan bagian raidus dengan detail 0,5 mm, validasi terhadap penelitian sebelumnya dilakukan. Menyesuaikan dimensi yang paling optimal pada penelitian sebelumya yaitu 4 lapisan dengan tebal 0,2 mm , menghasilkan *displacement* sebesar 4,3 mm pada uji tarik dan 17,42 mm pada uji *bending*.



Gambar 4. (E_1) *In-plane* (E_2) *Transverse* (E_3) *Interlaminar*

Sambungan garis dasar, pelapisan kulit, dan *flange* masing-masing memiliki pola penumpukan lapisan *quasi-isotropic* yang merupakan pola lapisan yang digunakan pada sebagian besar sambungan komposit pada pesawat terbang . Menentukan lapisan yang optimal pada sambungan untuk mengurangi tegangan puncak yang mengakibatkan pengelupasan kulit sambungan merupakan hal yang ingin dicapai. Terinpirasi dari kayu, meniru pada bagian sudut mikrofibril yang dapat menyesuaikan dengan kondisi pembebanan eksternal menggunakan sambungan yang terbuat dari *Epoxy Carbon UD* (230 GPa) *Prepreg* . Kelebihannya terletak pada sambungan yang dapat mencapai kondisi regangan yang seragam, sehingga dapat memaksimalkan toleransi kegagalan pada sambungan T . Desain yang dibuat masih memiliki perbedaan terhadap sambungan cabang pohon pada alam, tetapi dengan menyesuaikan sudut *lay-up* lapisan yang berbeda dari penumpukan *quasi-tropic* diharapkan bagian *interlaminar* pada daerah radius dapat berkurang dan mengakibatkan beban yang diterima sambungan T akan menjadi lebih kecil. Sifat dari *Epoxy Carbon UD* (230 GPa) *Prepreg* ditunjukan pada Tabel 1.

Tabel 1. *Epoxy Carbon UD* (230 GPa) *Prepreg properties*

Material property	***Epoxy Carbon UD* (230 GPa) *Prepreg***
Cured ply thickness	0,2 mm
In-plane Young's modulus (E_1)	8.600 MPa
Transverse Young's modulus (E_2)	1,21 x 10^5 MPa
Interlaminar Young's modulus (E_3)	8.600 MPa
Poisson's ratio (E_{12})	0,27
Poisson's ratio (E_{13})	0,40
Poisson's ratio (E_{23})	0,27
In-plane shear modulus (E_{12})	4,1 GPa
Interlaminar shear modulus (E_{13})	4,1 GPa
Interlaminar shear modulus (E_{23})	2,3 GPa

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sambungan T komposit yang terinspirasi dari cabang pohon ini diuji pada tiga model lapisan dan ketebalan , yaitu tertanam 12,5%, 25%, dan 37,5% dari kedalaman kulit dan ketebalan 0,1 mm, 0,2 mm, dan 0,3 mm. Bentuk dan dimesi spesimen ditunjukan pada Gambar 1 dan ilustrasi lapisan tertanam serta ketebalan ditunjukan pada Gambar 2 dan 3. Berikut merupakan hasil dari simulasi uji tarik dan *bending*.

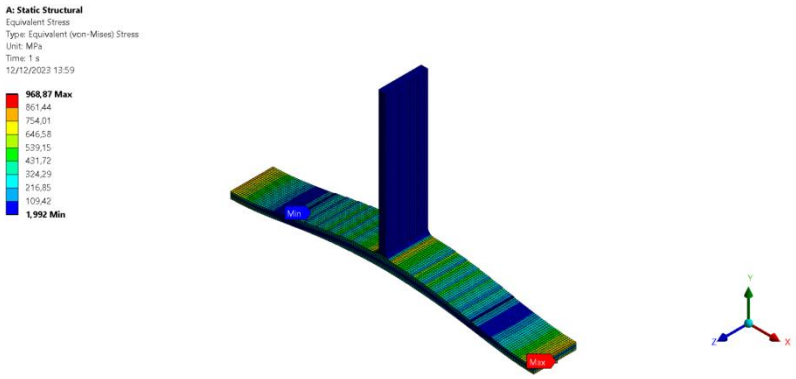
Stress

Hasil simulasi uji tarik dan *bending* menghasilkan nilai tegangan maksimal sambungan yang ditunjukan pada Tabel 2 sebagai berikut.

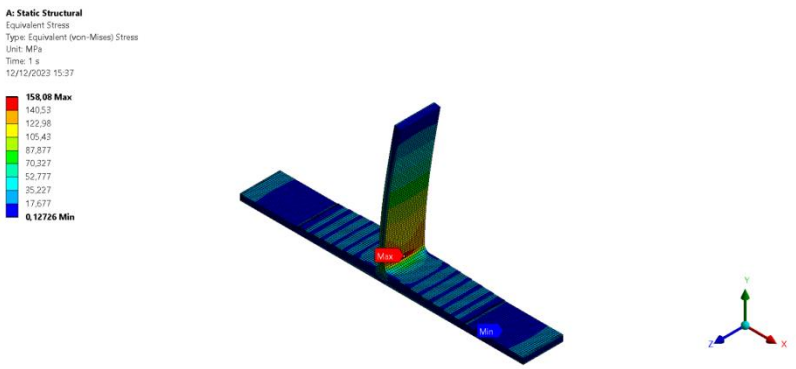
Tabel 2. Hasil Tegangan Maksimal Sambungan menggunakan Uji Tarik dan *Bending*

Jumlah *Flange*	Ketebalan *Flange* (mm)	Tegangan Maksimal	
		Uji Tarik (MPa)	Uji Bending (MPa)
12,5% (2 Lapisan)	0,1	1.272,5	160,7
	0,2	1.163,7	159,97
	0,3	1.136,7	160,58
25% (4 Lapisan)	0,1	1.2000	160,04
	0,2	1.098,2	160,36
	0,3	1.046,1	160,66
37,5 % (6 Lapisan)	0,1	1.130,2	160,87
	0,2	1.038,2	161,23
	0,3	968,87	158,08

Hasil data simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimal yang paling minimal dengan pemberian beban uji tarik dan uji *bending* terjadi pada sambungan dengan model tertanam 37,5% dan ketebalan *flange* 0,3 mm. Membuktikan bahwa material yang lebih tebal memiliki ketahan yang lebih tinggi terhadap *stress*, karena terjadi peningkatan luas penampang pada sambungan (F. R. Basri, 2016). Simulasi uji tarik yang dilakukan pada variasi model join memiliki tegangan maksimal tertinggi dengan nilai 1.272,5 MPa yang terjadi pada sambungan 12,5% tertanam dengan ketebalan 0,1 mm, sedangkan simulasi uji *bending* memiliki nilai tertinggi 160,87 MPa pada sambungan 37,5% tertanam dengan ketebalan 0,1 mm. Hal tersebut dapat terjadi karena bahan yang lebih tipis memiliki ketahan yang lebih rendah terhadap *stress* , dibuktikan dengan tegangan maksimal tertinggi pada uji tarik dan *bending* terjadi pada sambungan dengan ketebalan lapisan 0,1 mm. Perbedaan tegangan maksimal yang terjadi antar variasi model ±200 MPa pada uji tarik dan ±3 MPa pada uji *bending*.



Gambar 5. Hasil Simulasi Uji Tarik pada Spesimen 37,5% tertanam (6 lapisan) dengan ketebalan 0,3 mm



Gambar 6. Hasil Simulasi Uji *Bending* pada Spesimen 37,5% tertanam (6 lapisan) dengan ketebalan 0,3 mm

Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi uji tarik, dapat dilihat bahwa bagian berwarna merah menunjukkan tegangan dengan nilai yang paling besar. Persebaran warna merah sangat sedikit dibandingkan dengan warna hijau atau biru, hal tersebut menunjukkan sambungan optimal dalam menanggung pembebanan yang diberikan. Tegangan maksimal yang terjadi paling banyak pada (E_2) *Transverse* dan (E_3) *Interlaminar*, tegangan maksimal paling besar terjadi pada ujung dan radius pada sambungan. Warna biru memenuhi (E_1) *In-plane*, menunjukkan bahwa tegangan pada bagian tersebut tidak terlalu menerima tegangan yang besar. Hasil simulasi uji *bending* ditunjukan pada Gambar 6, pada hasil tersebut menunjukkan bahwa tegangan maksimal yang terjadi terletak pada (E_1) *In-plane.* Bagian (E_2) *Transverse* dan (E_3) *Interlaminar* tidak menerima banyak tegangan yang terjadi akibat pembebanan. Perbedaan tesebut dapat terjadi karena perbedaan arah pembebanan pada uji tarik dan *bending*, hubungan spesifik antara ketebalan material dan tegangan tergantung pada berbagai faktor seperti sifat material, geometri, dan kondisi pemuatan .

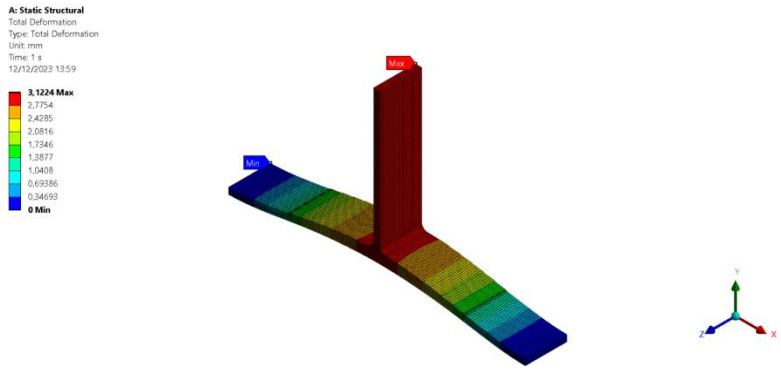
Displacement

Hasil simulasi uji tarik dan *bending* menghasilkan nilai *displacement* yang terjadi pada sambungan yang ditunjukan pada Tabel 3 sebagai berikut.

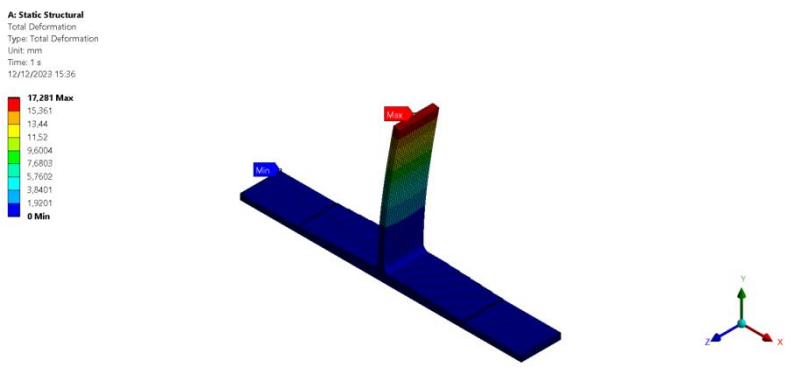
Tabel 3. Hasil *Displacement* Sambungan menggunakan Uji Tarik dan *Bending*

Jumlah *Flange*	Ketebalan *Flange* (mm)	*Displacement*	
		Uji Tarik (mm)	Uji Bending (mm)
12,5% (2 Lapisan)	0,1	5,4851	17,571
	0,2	5,1154	17,518
	0,3	4,7848	17,474
25% (4 Lapisan)	0,1	5,0558	17,508
	0,2	4,3711	17,420
	0,3	3,8180	17,356
37,5 % (6 Lapisan)	0,1	4,6685	17,456
	0,2	3,7677	17,349
	0,3	3,1224	17,281

Displacement tidak selalu meningkat secara linear seiring dengan waktu, melainkan sejalan dengan peningkatan tegangan yang diterapkan selama uji tarik(M. I. Maulana and A. H. A. Rasyid, 2022). Hasil simulasi uji tarik dan *bending* terhadap *displacement* dilakukan dengan pembebanan yang sama dengan sebelumnya. Nilai *displacment* paling kecil ditunjukan oleh sambungan dengan variasi 37,5% tertanam dengan ketebalan 0,3 mm. Luas area pembebanan pada struktur berpengaruh pada kekakuan, di mana semakin besar luas area yang menerima pembebanan maka nilai *displacement* akan semakin kecil (A. H. Ramadhan, 2014). Hal tersebut dibuktikan dengan meilhat data pada variasi tertanam 12,5% dan 25%, data menunjukkan bahwa *displacemnt* dengan nilai paling minimal terjadi pada ketebalan 0,3 mm yang memiliki luas area lebih besar dibanding dengan ketebalan 0,1 mm dan 0,2 mm. *Displacement* yang terjadi pada uji tarik antara 3-5 mm, sedangkan pada uji *bending* hasilnya tidak berfluktuatif pada kisaran ±17 mm.



Gambar 7. Hasil Simulasi Uji Tarik pada Spesimen 37,5% tertanam (6 lapisan) dengan ketebalan 0,3 mm



Gambar 8. Hasil Simulasi Uji *Bending* pada Spesimen 37,5% tertanam (6 lapisan) dengan ketebalan 0,3 mm

Hasil simulasi uji tarik terhadap displacement ditunjukan pada Gambar 7, menunujukan bahwa displacement merata terjadi pada (E_1) *In-plane*. Hal tersebut dikarenakan arah pembebanan searah dengan (E_1) *In-plane,* sehingga displacement yang terjadi terbagi secara merata di seluruh bagian permukaan (R. Puasay et al., 2023). Pada (E_2) *Transverse* dan (E_3) *Interlaminar* terjadi displacement yang beragam, dikarenakan perbedaan arah pembebanan serta semakin jauh titik dari pembebanan maka semakin kecil *displacement* yang terjadi. Gambar 8 menunjukkan hasil dari uji *bending*, *displacement* yang terjadi hanya pada (E_1) *In-plane.* Hal tersebut dapat terjadi karena arah pembebanan yang perbeda dengan sambungan, sehingga menyebabkan beban terpusat pada ujung (E_1) *In-plane.* Nilai *displacement* yang terjadi pun terpusat hanya pada bagian merah, tidak terbagi merata seperti pada uji tarik. Pada beban terpusat, *displacement* mencapai nilai maksimum karena bahan mengalami kegagalan (Suzdayan and Romadhoni, 2018). Warna biru pada (E_2) *Transverse* dan (E_3) *Interlaminar* membuktikan bahwa bagian tersebut tidak mengalami deformasi, sehingga perlu diperhatikan bahwa pembebanan hanya terjadi pada ujung sambungan. Analisis tersebut tentunya sangat berguna dalam menentukan kekuatan sebuah sambungan, sehingga dapat menentukan sambungan yang tepat dengan mempertimbangkan *tensile stress* dan *bending stress* yang terjadi.

Safety Factor

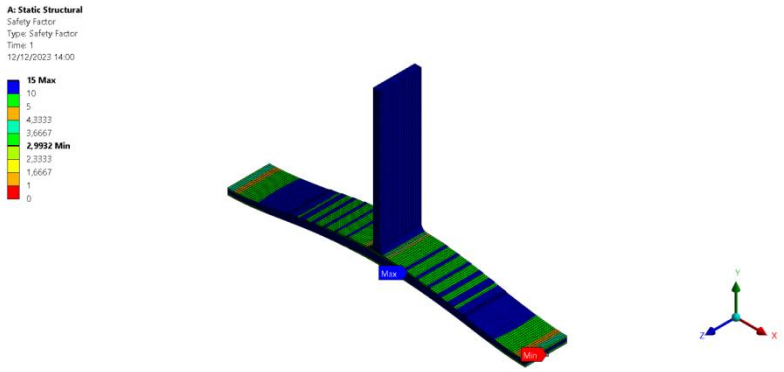
Hasil simulasi uji tarik dan *bending* menghasilkan nilai *safety factor* pada sambungan yang ditunjukan pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil *Safety Factor* Sambungan menggunakan Uji Tarik dan *Bending*

Jumlah *Flange*	Ketebalan *Flange* (mm)	*Safety Factor*	
		Uji Tarik	Uji Bending
12,5% (2 Lapisan)	0,1	2,279	1,426
	0,2	2,492	1,432
	0,3	2,551	1,415
25% (4 Lapisan)	0,1	2,417	1,431
	0,2	2,641	1,429
	0,3	2,772	1,426
37,5 % (6 Lapisan)	0,1	2,566	1,423
	0,2	2,793	1,421
	0,3	2,993	1,424

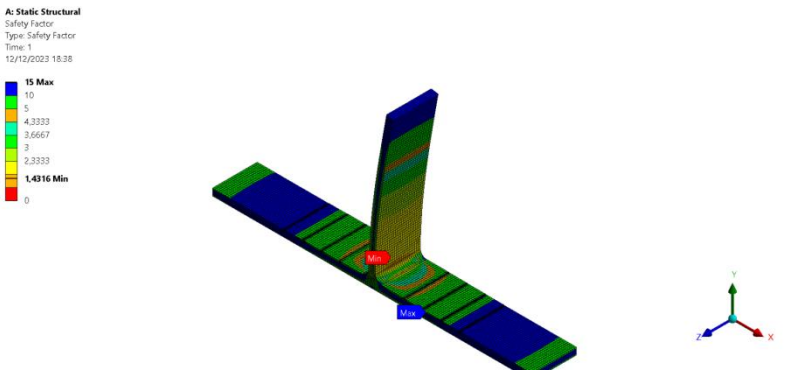
Ketebalan dari material dapat menghasilkan *safety factor* yang tinggi, hal tersebut terbukti pada data hasil uji tarik Tabel 4 (A. B. Anam and S. Adiwidodo, 2021). Variasi sambungan tertanam 37,5% dengan ketebalan 0,3 mm pada uji tarik memiliki nilai *safety factor* minimal tertinggi dibanding dengan variasi sambungan lainnya. Hal tersebut diperkuat dengan hasil simulasi tegangan maksimal dan *displacement* pada variasi tersebut, meskipun memiliki deformasi yang merata pada (E_1) *In-plane* (Gambar 8) tegangan sambungan ini juga merata (Gambar 6). Pada (E_2) *Transverse* dan (E_3) *Interlaminar* terjadi deformasi sekitar 0,3-2,7 mm, tetapi tegangan maksimal yang terjadi didominasi oleh warna hijau serta biru muda. Hal tersebut membuktikan bahwa mayoritas

sambungan tidak mengalami tegangan maksimal sehinnga dapat memenuhi nilai *safety factor*. Hasil simulasi nilai *safety factor* uji *bending* menunjukkan nilai tertinggi pada sambungan 25% tertanam dengan ketebalan 0,1 mm. Perbedaan safety factor dalam uji tarik dan bending mungkin saja terjadi, dikarenakan hubungan antara ketebalan material dan tegangan tergantung pada berbagai faktor seperti lapisan, geometri, dan kondisi pemuatan . Namun, dari keseluruhan hasil simulasi data yang dihasilkan tidak berfluktuatif yaitu ±1,4.



Gambar 9. Hasil Simulasi Uji Tarik pada Spesimen 37,5% tertanam (6 lapisan) dengan ketebalan 0,3 mm

Faktor keamanan pada kekuatan luluh bertujuan untuk mencegah deformasi yang merugikan, sedangkan faktor keamanan pada kekuatan tarik maksimum bertujuan mencegah keretakan (L. A. N. Wibawa,). Gambar 9 menunjukkan area *safety factor* yang terjadi pada uji tarik, sepeti yang dapat dilihat warna biru dan hijau mendominasi pada sambungan tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa sambungan tidak akan mengalami keretakan pada (E_1) *In-plane,* (E_2) *Transverse,* dan (E_3) *Interlaminar*, dikarenakan nilai minimal dari *safety factor* masih lebih dari 1 . Warna orange yang menujukan nilai safety factor paling rendah hanya sedikit pada ujung sambungan, sehingga dapat dikatakan bahwa sambungan aman terhdapan keretakan pembebanan tarik. Hasil *safety factor* uji *bending* yang ditunjukan pada Gambar 10 didominasi oleh warna orange, hijau, dan biru yang menunjukkan bahwa sambungan ini lebih kuat menahan pembebanan tarik dibanding dengan *bending*. Nilai *safety factor* terendah terletak pada sambungan antara (E_2) *Transverse* dan (E_3) *Interlaminar* dengan (E_1) *In-plane*, hal tersebut dikarenakan uji *bending* menciptakan momen yang harus ditahan oleh sambungan. Sambungan 50% tertanam memiliki kekuatan yang paling tinggi diantara variasi lainnya, dikarenakan seimbangnya antara *flange* yang tertanam dengan timbul yang mengakibatkan lebih kuat menahan beban *bending* (Istianto Budhi Rahardja et al., 2021).



Gambar 10. Hasil Simulasi Uji *Bending* pada Spesimen 25% tertanam (4 lapisan) dengan ketebalan 0,1 mm

Pengaruh Ketebalan dan Jumlah Lapisan

Sambungan yang lebih tipis memiliki ketahanan yang lebih rendah terhadap *stress* , hal tersebut ditunjukan pada Tabel 2. Data tersebut menunjukkan bahwa semakin tipis ketebalan dari *flange* maka nilai tegangan maksimal yang terjadi dengan pembebanan yang sama semakin besar. Hal tersebut dikarenakan bahan yang lebih tebal memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap *stress* karena peningkatan luas penampangnya . Pengaruh jumlah lapisan tertanam pada sambungan juga dapat mempengaruhi nilai tegangan maksimal yang terjadi, semakin tebal lapisan maka semakin rendah tegangan maksimal yang terjadi. Namun, pengaruh tebal lapisan juga mempengaruhi dalam sambungan tersebut, seperti pada sambungan 25% tertanam dengan ketebalan 0,1 mm memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi daripada sambungan 12,5% tertanam dengan ketebalan 0,2 mm. Hubungan spesifik antara ketebalan material dan *stress* juga tergantung pada berbagai faktor seperti sifat material, geometri, dan kondisi pemuatan .

Luas area pembebanan pada struktur berpengaruh pada kekakuan, di mana semakin besar luas area yang menerima pembebanan maka nilai *displacement* akan semakin kecil . Gambar 7 dan 8 menunjukkan hal tersebut, besar luasan pada Gambar 7 yang lebih besar membuat nilai *displacement* semakin kecil dibandingan dengan Gambar 8 yang besar asre pembebanannya terpusat. Ketebalan sambungan juga berpengaruh terhadap dicplacement, semakin tebal suatu sambungan maka nilai dicplacement semakin kecil. Data hasil simulasi uji tarik dan *bending* yang ditunjukan pada Tabel 3, dimana semakin tebal *flange* maka semakin kecil juga nilai *displacement* yang terjadi. Nilai displacement juga dipengaruhi dengan berbagai faktor seperti hubungan ketebalan dan jumlah lapisan, hal tersebut ditunjukan dimana sambungan tertanam 12,5% dengan ketebalan 0,3 mm memiliki nilai *displacement* yang lebih besar daripada sambungan tertanam 25% dengan ketebalan 0,2 mm.

Faktor keamanan perlu diuji pada sambungan untuk mencegah deformasi yang merugikan, sedangkan faktor keamanan pada kekuatan tarik maksimum bertujuan mencegah keretakan pada sambungan . Tabel 4 menunjukkan data hasil uji *safety factor*, data menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan *flange* berbanding lurus dengan nilai *safety factor*. Hal tersebut dikarenakan bahan yang lebih tebal memiliki ketahanan yang lebih tinggi serta area pembebanan, sedangkan pada pengujian *bending* nilai tertinggi didominasi oleh sambungan dengan 25% tertanam, dikarenakan seimbangnya lapisan antara *flange* yang tertanam dengan timbul dalam menahan gaya momen yang terjadi . Hubungan spesifik antara ketebalan material dan *safety factor* juga tergantung pada berbagai faktor seperti sifat, geometri dan kondisi pemuatan . Hal tersebut ditunjukkan pada data sambungan tertanam 25% pada seluruh ketebalan merupakan hasil terbaik uji bending dari variasi ketebalan lainnya. Secara keseluruhan, variasi sambungan memenuhi nilai *safety factor* yaitu melebihi nilai 1 .

Kesimpulan

Hasil pengujian simulasi menunjukkan nilai terbaik dan paling optimal terdapat pada spesimen 37,5% dengan ketebalan 0,3 mm. Spesimen tersebut menunjukkan nilai tegangan maksimal pada uji tarik sebesar 968,87 MPa dan uji *bending* sebesar 158,08 MPa, sedangkan untuk nilai *displacement* pada uji tarik sebesar 3,1224 mm dan uji bending sebesar 17,281 mm. Nilai tersebut didapat karena beberapa faktor, geometri yang dipengaruhi oleh ketebalan spesimen dengan tebal 0,3 mm serta memiliki banyak lapisan yang tertanam sebanyak 6 lapisan mempengaruhi tegangan dan kondisi pemuatan yang diaplikasikan pada spesimen. Bahan yang lebih tebal memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap *stress*. Uji *bending* yang dilakukan pada simulasi tidak memiliki perbedaan nilai yang signifikan, namun nilainya makin mengecil dengan bertambahnya jumlah lapisan dan nilai ketebalan lapisan. Pengujian untuk *displacement* dipengaruhi oleh luas area pembebanan pada masing-masing spesimen, semakin luas area yang menerima pembebanan maka nilai displacement akan semakin kecil. Hasil pada pengujian

menunjukkan *displacement* yang semakin kecil dengan bertambahnya jumlah lapisan dan ketebalan lapisan karena pertambahan luasan area pada spesimen.

Penelitian ini menghasilkan geometri terbaru yang mampu menahan *stress* yang lebih tinggi ketika dilakukan uji tarik maupun dikenakan *bending*. Geometri baru didapatkan dengan cara membandingkan hasil simulasi dari total sembilan spesimen berupa variasi jumlah lapisan dan ketebalan lapisan. Hasil yang terbaik dari simulasi adalah spesimen yang nilai *maximum stress* dan *displacement* nya kecil serta mempunyai nilai *safety factor* yang tinggi sehingga *design* dalam penelitian ini mampu meminimalisir *damage* yang diterima. Penelitian terhadap geometri lain perlu dilakukan untuk menemukan *design* yang paling optimal untuk kebutuhan kedepannya. Geometri lain dapat diteliti dengan variasi ukuran dari *flange* ataupun geometri dari t *joint* sekalipun tentunya dengan material dan ukuran yang mempertimbangkan berat total dari sebuah struktur agar tetap efisien.

REFERENSI

Alfano, M., Furgiuele, F., Lubineau, G., & Paulino, G. H. (2011). Simulation of debonding in Al/epoxy T-peel joints using a potential-based cohesive zone model. *Procedia Engineering*, *10*, 1760-1765.

Anam, A. B., & Adiwidodo, S. (2021, December). Simulasi Kekuatan Dan Ergonomi E-Scooter Untuk Mobilitas Di Area Kampus. In *Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Manufaktur* (Vol. 1, pp. 84-88).

Basri, F. R., Yudo, H., & Amiruddin, W. (2016). Analisa Kekuatan Sambungan Pipa T Joint Menggunakan Pelat Penguat Dengan Variabel Dh/Db Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*, *4*(3).

Burns, L. A., Mouritz, A. P., Pook, D., & Feih, S. (2012). Bio-inspired design of aerospace composite joints for improved damage tolerance. *Composite Structures*, *94*(3), 995-1004.

Burns, L. A., Mouritz, A. P., Pook, D., & Feih, S. (2012). Strength improvement to composite T-joints under bending through bio-inspired design. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *43*(11), 1971-1980.

Burns, L., Mouritz, A. P., Pook, D., & Feih, S. (2015). Bio-inspired hierarchical design of composite T-joints with improved structural properties. *Composites Part B: Engineering*, *69*, 222-231.

Cheng, H. E., Fengjiang, Z. H. A. N., Luchuang, M. A., Gang, C. H. E. N., & Jianying, M. A. (2023). Aero-structural design of joined-wing aircraft based on high-fidelity model. *Chinese Journal of Aeronautics*.

de Carvalho, W. S., & Amancio-Filho, S. T. (2022). On the feasibility of joining additively-manufactured 316L stainless steel and poly-ether-ether-ketone by ultrasonic energy. *Additive Manufacturing Letters*, *3*, 100098.

Eder, M., Jungnikl, K., & Burgert, I. (2009). A close-up view of wood structure and properties across a growth ring of Norway spruce (Picea abies [L] Karst.). *Trees*, *23*, 79-84.

Goetz, K., & Mattheck, C. (2001). Trees as a model for technical fibre composites. *WIT Transactions on The Built Environment*, *54*.

Jungnikl, K., Goebbels, J., Burgert, I., & Fratzl, P. (2009). The role of material properties for the mechanical adaptation at branch junctions. *Trees*, *23*, 605-610.

Maulana, M. I., & Rasyid, A. H. A. (2022). Simulasi Parameter Pengelasan Gesek Rotari Pada Al Alloy 6061 T-6 dan AISI 1018 Dengan Finite Element Method (FEM). *Otopro*, 38-47.

Meyers, M. A., Chen, P. Y., Lin, A. Y. M., & Seki, Y. (2008). Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in materials science*, *53*(1), 1-206.

Puasay, R., Mustafa, M., Naharuddin, N., Fadly, M. S., & Yandi, Y. Analisis Teoritis Dan Eksperimental Defleksi Pada Kayu Dengan Variasi Jenis Dan Posisi Perletakan. *Jurnal MEKANIKAL*, *14*(1).

Rahardja, I. B., Rahdiana, N., Mulyadi, D., Al Afghani, A., & Ramadhan, A. I. (2020). Analisis Pengaruh Radius Bending Pada Proses Bending Menggunakan Pelat Spcc-Sd Terhadap Perubahan Struktur Mikro. *Jurnal Teknik Mesin Mechanical Xplore*, *1*(1), 1-10.

Ramadhan, A. H., Widyanto, S. A., & Widodo, A. (2014). Simulasi defleksi beban statis dan analisis perilaku damping konstruksi kayu untuk pengembangan bed mesin perkakas. *Jurnal Teknik Mesin*, *2*(3), 305-314.

Suzdayan, R. Pengaruh Kekuatan Struktur Material Komposit Sandwich Plate Fiberglass Terhadap Biro Klasifikasi.

Wibawa, L. A. N. (2020). Pengaruh Ketebalan Cap dan Tekanan Internal terhadap Tegangan Von Mises Silinder Berdinding Tebal untuk Tabung Motor Roket. *Jurnal Teknik*, *41*(2), 111-118.

Zhang, B., Fei, B. H., Yu, Y., & Zhao, R. J. (2007). Microfibril angle variability in Masson pine (Pinus massoniana Lamb.) using X-ray diffraction. *Forestry Studies in China*, *9*, 33-38.