

# ANALISIS INTEGRASI PROSES, PENGUATAN ANTARMUKA, PEMESINAN PRESISI, PEMODELAN KERUSAKAN, DAN MANUFAKTUR BERKELANJUTAN PADA FIBER METAL LAMINATES

Elya Heryana

Program Studi Teknik Mesin  
Sekolah Tinggi Teknologi Indonesia (STTI)  
Email: elyaheryana2022@gmail.com  
Asal Negara: Indonesia

## ABSTRAK

Fiber metal laminates (FMLs) berkembang sebagai kelas material hibrida yang menggabungkan lembaran logam tipis dengan polimer berpenguat serat untuk menghasilkan struktur ringan, kuat, toleran terhadap kerusakan, dan relevan bagi aplikasi transportasi maju. Tinjauan ini menyintesis literatur terbaru yang tersedia dalam sumber data dan referensi ilmiah terbuka. dengan penekanan pada perkembangan teknologi mengenai desain laminat, pembentukan, penguatan antarmuka, pemesinan, respons impak, pemodelan numerik, dan keberlanjutan. Kajian menunjukkan bahwa kinerja FML tidak ditentukan oleh satu variabel tunggal, melainkan oleh ko-desain antara jenis logam, orientasi serat, urutan tumpukan, kualitas ikatan, rute curing atau forming, serta strategi pemotongan akhir. Perkembangan mutakhir menandai pergeseran dari optimasi berbasis uji tunggal menuju pendekatan terpadu yang menghubungkan pemrosesan, kerusakan, dan fungsi akhir. Nanofiller, perlakuan permukaan, hydroforming aktif, laser forming, helical milling, abrasive waterjet cutting, serta simulasi elemen hingga semakin banyak digunakan untuk memperluas batas performa dan mengurangi cacat seperti delaminasi, burr, void, springback, dan aus pahat. Pada saat yang sama, studi ekodesain dan debonding-on-demand memperlihatkan bahwa keberlanjutan FML harus dibahas sejak tahap perancangan, bukan hanya pada akhir umur pakai. Tinjauan ini mengusulkan agenda riset berupa standarisasi pelaporan, dataset terbuka, validasi multiskala, integrasi machine learning, desain antarmuka yang dapat didaur ulang, dan optimasi multi-objektif untuk mempercepat adopsi FML pada struktur ringan generasi berikutnya. Kontribusi utama artikel adalah menyatukan bukti mekanik, proses, pemesinan, dan ekodesain ke dalam kerangka konseptual yang dapat dipakai peneliti untuk merumuskan hipotesis baru dan memandu prioritas eksperimen lanjutan.

**Kata kunci:** fiber metal laminates; FML berkelanjutan; CARALL; penguatan antarmuka; pemesinan komposit hibrida

## ABSTRACT

Fiber metal laminates (FMLs) are emerging hybrid materials that combine thin metal sheets with fiber-reinforced polymers to produce lightweight, high-strength, and damage-tolerant structures for advanced transportation applications. This review synthesizes the literature provided in the scientific databases and open reference sources, focusing on 2024-2026 developments in laminate design, forming, interface strengthening, machining, impact response, numerical modeling, and sustainability. The review shows that FML performance is not governed by a single variable, but by the co-design of metal type, fiber orientation, stacking sequence, interfacial quality, curing or forming route, and final cutting strategy. Recent studies indicate a shift from isolated test-based optimization toward integrated approaches linking processing, damage evolution, and end-use function. Nanofillers, surface treatments, active hydroforming, laser forming, helical milling, abrasive waterjet cutting, and finite element modeling are increasingly used to expand performance limits and reduce defects such as delamination, burrs, voids, springback, and tool wear. At the same time, ecodesign and debonding-on-demand studies demonstrate that sustainability must be considered from the design stage rather than only at end of life. This paper proposes future research directions including standardized reporting, open datasets, multiscale validation, machine learning integration, recyclable interface design, and multi-objective optimization to accelerate the adoption of FMLs in next-generation lightweight structures.

**Keywords:** fiber metal laminates; sustainable FML; CARALL; interface strengthening; hybrid composite machining

## PENDAHULUAN

Fiber metal laminates (FMLs) menempati posisi strategis dalam rekayasa material modern karena mampu menjembatani dua kebutuhan yang sering saling bertentangan: penurunan massa struktur dan peningkatan ketahanan terhadap kerusakan. Dalam FML, lembaran logam memberikan daktilitas,

ketahanan impak, dan kemampuan menahan retak, sedangkan lapisan polimer berpenguat serat menyumbang kekakuan dan kekuatan spesifik yang tinggi. Kombinasi ini membuat FML relevan bagi struktur pesawat, kendaraan listrik, komponen otomotif, panel pelindung, dan sistem yang membutuhkan kemampuan serap energi tanpa penalti

massa yang besar. Literatur terbaru memperlihatkan bahwa FML tidak lagi dipahami hanya sebagai variasi dari komposit sandwiched, tetapi sebagai platform material yang dapat direkayasa melalui pilihan logam, serat, matriks, perlakuan permukaan, proses pembentukan, dan pemesinan akhir (46,2,17). Periode 2024-2026 memperlihatkan peningkatan tajam pada kajian yang bersifat integratif. Studi terbaru tidak hanya menguji kekuatan tarik atau lentur, tetapi juga menghubungkan kualitas antarmuka, urutan tumpukan, proses curing, pemodelan numerik, respons impak, serta strategi keberlanjutan. Hal ini penting karena kegagalan FML sering terjadi sebagai rangkaian peristiwa, dimulai dari cacat proses, konsentrasi tegangan, kerusakan matriks, delaminasi, retak logam, hingga penurunan kapasitas struktur. Oleh karena itu, artikel tinjauan ini mengembangkan sintesis dari ekstraksi literatur yang tersedia, dengan memprioritaskan publikasi paling mutakhir dan menjaga agar semua sitasi berasal dari basis data ilmiah dan sumber referensi terbuka (33,23,18).

Tinjauan ini diarahkan untuk publikasi jurnal bereputasi dengan tujuan menghasilkan pemetaan konseptual, kritik metodologis, dan agenda riset. Fokusnya bukan hanya merangkum temuan, tetapi menilai bagaimana setiap klaster literatur berkontribusi pada desain FML yang lebih kuat, lebih presisi, dan lebih berkelanjutan. Empat pertanyaan pemandu digunakan: bagaimana rute manufaktur baru memengaruhi performa mekanik; bagaimana antarmuka dapat ditingkatkan dan diukur; bagaimana pemesinan dan pembentukan meminimalkan cacat; serta bagaimana pemodelan, optimasi, dan penilaian lingkungan dapat digabungkan ke dalam kerangka desain FML generasi baru (35,7,36).

## METODE PENELITIAN

Artikel ini disusun sebagai tinjauan naratif-kritis berbasis hasil ekstraksi yang diberikan dalam berkas basis data ilmiah dan sumber referensi terbuka. Karena instruksi penulisan melarang penambahan referensi dari web, seluruh rujukan dalam naskah ini dibatasi pada entri yang tercantum dalam kedua berkas tersebut. Strategi sintesis dilakukan dengan mengelompokkan literatur ke dalam tujuh tema: manufaktur dan forming, penguatan antarmuka, perilaku lentur dan mekanik, impak dan balistik, pemesinan, pemodelan serta optimasi, dan keberlanjutan. Pendekatan ini memungkinkan integrasi antara artikel eksperimen, artikel tinjauan, makalah konferensi, bab buku, dan studi numerik yang memiliki relevansi langsung maupun pendukung terhadap FML (20,22,9).

Keterbatasan utama sumber ialah heterogenitas jenis publikasi dan tingkat kedalaman abstrak. Beberapa entri memberikan data numerik rinci seperti peningkatan kekuatan lentur, ketebalan reduksi, penyerapan energi, atau parameter optimum pemesinan, sedangkan entri lain hanya menyediakan

ringkasan konseptual. Untuk menjaga integritas sitasi, naskah ini tidak mengklaim detail yang tidak tersedia dalam abstrak. Jika sebuah studi tidak secara eksplisit membahas FML tetapi relevan sebagai pembandingan pemesinan, hybrid composite, atau struktur sandwich bermuka logam, studi tersebut diposisikan sebagai literatur pendukung, bukan bukti utama. Dengan demikian, sintesis tetap menjaga koherensi topik dan transparansi sumber (4,12,45).

Prioritas diberikan pada literatur 2024-2026 karena file terbaru memuat banyak publikasi pada rentang waktu tersebut. Namun, beberapa publikasi 2023 tetap digunakan ketika berfungsi sebagai landasan pemesinan berkelanjutan atau optimasi abrasive waterjet. Secara metodologis, setiap bagian menghubungkan temuan mutakhir dengan implikasi desain, bukan sekadar menyusun daftar studi. Pola ini penting untuk mencegah tinjauan menjadi katalog, dan mengarahkannya menjadi argumen ilmiah mengenai evolusi FML dari material ringan konvensional menuju sistem hibrida yang dirancang melalui ko-desain proses-antarmuka-kinerja-keberlanjutan (41,27,25).

## HASIL PENELITIAN

### Evolusi desain FML dan material penyusunnya

Desain FML modern semakin bergerak dari sistem klasik berbasis aluminium dan serat gelas menuju arsitektur yang lebih luas, termasuk CARALL, GLARE, laminat berbasis NiTi, magnesium, titanium, rare-earth aluminum alloy, serta kombinasi serat alam, aramid, basalt, karbon, jute, ramie, dan pineapple. Variasi ini menunjukkan bahwa pemilihan material tidak dapat dipisahkan dari fungsi akhir. Untuk aplikasi lentur dan stiffness tinggi, karbon dan aluminium tetap dominan; untuk ketangguhan dan absorpsi energi, kombinasi aramid, Kevlar, basalt, dan logam daktil menjadi menarik; sedangkan untuk keberlanjutan, serat lignoselulosa dan matriks bio-based mulai memperoleh perhatian (21,6,8).

CARALL menjadi fokus penting karena menggabungkan kekakuan spesifik karbon dengan daktilitas aluminium. Tinjauan terbaru tentang perilaku lentur CARALL menekankan bahwa urutan tumpukan, orientasi ply, rasio ketebalan logam-komposit, dan integritas antarmuka menentukan stiffness, kekuatan, springback, serta kegagalan berbasis delaminasi. Temuan ini konsisten dengan studi eksperimen pada CFRP/Al, di mana orientasi [90]<sub>12</sub> menunjukkan penipisan paling rendah dan tidak memperlihatkan retak atau void yang nyata, sedangkan orientasi lain memperlihatkan cacat yang lebih kompleks. Artinya, orientasi serat bukan hanya variabel kekuatan, tetapi variabel manufaktur dan formabilitas (10,31,19).

Pengembangan FML berbasis NiTi memperluas konsep FML dari material struktural pasif menjadi struktur adaptif. Kombinasi resin infusion dan compression molding, ditambah anodisasi NiTi serta

lubang untuk aliran resin, menghasilkan ikatan antarmuka yang kuat, kemampuan shape recovery, dan ketahanan impak. Arah ini penting bagi aerospace adaptif karena FML tidak hanya menahan beban, tetapi juga merespons deformasi melalui pemulihan termal. Dengan demikian, horizon desain FML bergeser dari strength-to-weight ratio menuju functional-to-weight ratio, yaitu kemampuan membawa fungsi tambahan tanpa peningkatan massa yang tidak perlu (38,39,37).

Pada sisi lain, FML berbasis serat alam dan biomassa menghadirkan peluang sekaligus risiko. Serat pineapple, ramie, flax, jute, sisal, coir, dan lignoselulosa lain menawarkan penurunan jejak lingkungan dan penggunaan residu agro, tetapi menghadapi masalah kompatibilitas dengan logam, kelembapan, ketahanan lingkungan, dan variabilitas sifat. Literatur terbaru menunjukkan bahwa penempatan basalt pada lapisan luar dan pineapple pada bagian yang menyerap regangan dapat menghasilkan sinergi, sementara ramie-FML memperlihatkan potensi absorpsi energi balistik. Namun, desain berbasis serat alam harus memprioritaskan perlindungan antarmuka, stabilitas kelembapan, dan strategi end-of-life (34,14,28).

#### **Integrasi proses manufaktur, curing, dan forming**

Rute manufaktur menentukan mutu FML sejak awal karena cacat awal seperti void, wetting yang tidak sempurna, delaminasi mikro, atau ketidaksesuaian deformasi akan berkembang menjadi kegagalan pada tahap forming, pemesinan, atau layanan. Integrasi pre-curing dan forming pada 6061-T6 Al/CFRP memperlihatkan peluang mengurangi waktu proses dan biaya produksi sambil meningkatkan kelayakan aplikasi otomotif. Peningkatan kekuatan lentur hingga 159% pada orientasi tertentu dibanding aluminium tunggal memperlihatkan bahwa integrasi proses dapat menghasilkan manfaat mekanik yang sangat besar jika diikuti dengan kontrol layup, tekanan, dan curing (24,1,16).

Hydroforming FML menjadi area yang menonjol karena menjawab kebutuhan komponen berdimensi kompleks. Studi hydroforming alternatif menunjukkan bahwa kombinasi blank holder force tidak seragam dan cavity pressure dapat mengurangi kerutan, menghasilkan distribusi ketebalan lebih seragam, dan meningkatkan kedalaman pembentukan dibanding proses konvensional. Studi active hydroforming lebih lanjut menegaskan bahwa interaksi antara bulging pressure dan blank holder pressure harus dikendalikan secara hati-hati agar tidak menimbulkan cacat, sekaligus mencapai filling die yang memadai. Dengan demikian, forming FML memerlukan kontrol lintasan proses, bukan hanya pemilihan satu nilai tekanan optimum (3,15,44).

Laser forming memperlihatkan jalur lain untuk membentuk FML aluminium/epoxy/glass tanpa kontak mekanik langsung. Namun, hasil terbaru menunjukkan trade-off yang jelas: peningkatan laser power dan jumlah scan passes dapat meningkatkan sudut tekuk, tetapi menurunkan gaya puncak delaminasi sekitar 15%. Ini menandakan bahwa proses termal harus dirancang dengan batas temperatur, durasi, dan kecepatan yang mempertahankan kualitas ikatan. Keunggulan laser forming terletak pada fleksibilitas dan potensi pembentukan lokal, tetapi kelemahannya adalah risiko degradasi matriks dan penurunan bonding akibat panas (43,29,40).

Sinkronisasi aging dan curing pada laminat rare-earth aluminum alloy menunjukkan bahwa proses metalurgi logam dan polimerisasi matriks dapat disatukan untuk meningkatkan kekuatan, daktilitas, dan performa impak. Pendekatan ini berbeda dari rute konvensional yang memperlakukan perlakuan panas logam dan curing komposit sebagai tahap terpisah. Jika dirancang baik, secondary aging selama curing dapat meningkatkan ketangguhan lapisan aluminium dan memperbaiki kapasitas serap energi. Akan tetapi, delaminasi tetap muncul sebagai mode kegagalan utama pada beban tinggi, sehingga keuntungan proses harus selalu disertai rekayasa antarmuka (11,26,30).

**Tabel 1.** Ringkasan literatur utama tentang desain, proses, antarmuka, dan performa FML

| <b>Fokus kajian</b>            | <b>Material/sistem</b> | <b>Metode</b>                                 | <b>Temuan utama</b>                                                      | <b>Implikasi desain</b>                            | <b>Ref.</b> |
|--------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------|
| Pre-curing dan forming terpadu | 6061-T6 Al/CFRP        | Press dies, pre-curing, full curing           | Kekuatan lentur naik hingga 159%; layup [90] <sub>12</sub> paling stabil | Perlu integrasi desain layup-proses untuk otomotif | (46)        |
| Penguatan antarmuka            | FML dan nanofiller     | Review surface treatment, nanofiller, numerik | Antarmuka tetap bottleneck utama; ML mulai relevan                       | Prioritaskan ko-desain antarmuka dan model         | (2)         |
| Flexural FML-nanopartikel      | 7075-T6 Al FML         | FEM dan uji lentur                            | 0,2% SiO <sub>2</sub> meningkatkan kekuatan lentur 50,2%                 | Dosis nanofiller optimum penting                   | (17)        |

|                         |                                            |                                        |                                                                             |                                               |      |
|-------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------|
| CARALL flexural         | Carbon fiber-reinforced aluminum laminates | State-of-the-art review                | Stacking, rasio ketebalan, dan integritas antarmuka mengontrol respons      | Perlu benchmark dan digital twin              | (23) |
| NiTi smart FML          | NiTi/FML                                   | Resin infusion dan compression molding | Shape recovery penuh dalam tiga siklus termal                               | FML dapat menjadi struktur adaptif            | (18) |
| Ballistic impact        | Al/aramid FML                              | Light-gas gun dan ABAQUS               | Model merekonstruksi kecepatan keluar dan pola kerusakan                    | Validasi eksperimen-model krusial             | (7)  |
| Hydroforming alternatif | Al/GFRP FML                                | Eksperimen dan simulasi                | Forming depth naik 25%; reduksi tebal lebih rendah                          | Kontrol BHF dan cavity pressure penting       | (3)  |
| Active hydroforming     | FML fairing pesawat                        | Abaqus dan Hashin                      | BP-BHP menentukan defect, filling, dan ketebalan                            | Cocok untuk transisi dari fairing Al/komposit | (15) |
| Surface sustainability  | FML                                        | Review functionalization               | Burnishing, laser texturing, sandblasting, etching perlu dinilai lingkungan | Antarmuka harus rendah dampak                 | (6)  |
| LCA dan ekodesain       | 12 desain FML                              | Cradle-to-gate LCA                     | FML12 paling konsisten secara eco-efficiency                                | Gabungkan performa dan dampak                 | (5)  |

### Antarmuka sebagai penentu utama kinerja

Antarmuka adalah zona paling kritis dalam FML karena menjadi lokasi transfer tegangan, inisiasi retak, infiltrasi kelembapan, serta kegagalan delaminasi. Literatur terbaru mengenai penguatan antarmuka menempatkan perlakuan permukaan, nanofiller, adhesive bonding, dan simulasi numerik sebagai pilar utama. Permukaan logam yang terlalu halus dapat mengurangi interlocking mekanik, sementara permukaan terlalu kasar dapat menciptakan konsentrasi tegangan dan void. Oleh sebab itu, surface functionalization harus dipahami sebagai proses optimasi multikriteria, bukan sekadar peningkatan roughness (32,16,6).

Teknik seperti sandblasting, laser texturing, burnishing, chemical etching, anodizing, dan heat treatment bertujuan mengubah topografi, energi permukaan, lapisan oksida, serta kemampuan wetting. Kajian terbaru tentang peran permukaan logam dan keberlanjutan menegaskan bahwa perlakuan permukaan tidak boleh hanya dinilai dari bond strength, tetapi juga konsumsi energi, limbah kimia, dan dampak lingkungan. Prinsip ini sangat penting karena FML sering dipromosikan sebagai

material ringan berkelanjutan; klaim tersebut menjadi lemah jika peningkatan adhesi dicapai melalui proses yang boros energi atau menghasilkan limbah berbahaya (5,42,13).

Nanofiller menjadi strategi populer untuk memperkuat antarmuka dan matriks. Penambahan graphene, SiO<sub>2</sub>, clay, CNT, nano-silica, dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dilaporkan dapat meningkatkan kekuatan lentur, impak, atau crack resistance pada kondisi optimum. Namun, efek nanofiller sering bersifat nonlinier: pada kadar rendah dapat memperkuat mekanisme transfer beban dan menghambat retak, sedangkan pada kadar berlebihan dapat menyebabkan aglomerasi, void, penurunan wetting, dan penurunan performa. Dengan demikian, desain nanofiller perlu menggabungkan dispersi, kompatibilitas kimia, viskositas resin, dan ketebalan garis ikatan (46,2,17).

Kebutuhan daur ulang mulai mengubah cara antarmuka dirancang. Debonding-on-demand berbasis expandable graphite memperlihatkan bahwa antarmuka dapat dirancang untuk kuat selama layanan, tetapi dapat dilepaskan pada akhir umur pakai melalui pemicu panas. Konsep ini penting karena FML sulit didaur ulang akibat kombinasi

logam, serat, dan matriks termoset atau termoplastik. Jika desain antarmuka sejak awal mempertimbangkan pembongkaran, maka FML dapat bergerak dari paradigma lightweight-only menuju circular lightweight structure. Arah ini juga konsisten dengan tinjauan end-of-life aircraft yang memandang struktur pesawat sebagai sumber material bernilai tinggi, bukan hanya limbah (33,23,18).

### **Perilaku lentur, impak, balistik, dan kegagalan**

Perilaku lentur menjadi indikator utama FML karena banyak komponen tipis bekerja di bawah beban bending, tekanan, atau impak yang memicu kombinasi tarik-tekan pada lapisan berbeda. Studi CARALL dan HFML menunjukkan bahwa orientasi serat, posisi serat terhadap sisi tarik atau tekan, serta urutan lapisan menentukan kekuatan, modulus, toughness, dan strain to failure. Hybridisasi glass/Kevlar memperlihatkan bahwa penempatan glass fiber di sisi tekan dan Kevlar di sisi tarik dapat meningkatkan sifat lentur dan ketangguhan dibanding konfigurasi tunggal. Prinsip ini memperkuat gagasan bahwa FML harus dirancang secara asimetris sesuai gradien tegangan aktual (35,7,36).

Respon impak dan balistik memperlihatkan keunggulan khas FML dibanding material homogen. Pada FML, logam menyebarkan deformasi plastis dan menahan penetrasi awal, sementara serat serta matriks menyerap energi melalui retak matriks, delaminasi, fiber breakage, dan pull-out. Studi ballistic impact 2026 memanfaatkan eksperimen dan model ABAQUS untuk menggambarkan skenario partial penetration, embedment, ricochet, dan complete penetration. Sementara itu, studi ramie-FML memperlihatkan bahwa penambahan lapisan komposit meningkatkan energi yang diserap dan mengurangi residual velocity proyektil. Keduanya menunjukkan pentingnya validasi eksperimen-model untuk memahami mekanisme energi (20,22,9).

FML termoplastik dan struktur hybrid juga dikaji untuk beban ledakan dan tekanan dinamis. Simulasi confined explosion menunjukkan bahwa strain rate effect sangat berpengaruh terhadap deformasi global dan kerusakan internal serat, serta dapat digabungkan dengan surrogate model dan Bayesian optimization untuk menurunkan areal density sambil mempertahankan performa proteksi. Analisis dinamika pelat FML berbasis higher-order shear deformation theory menunjukkan bahwa durasi beban, bentuk pulsa tekanan, dan karakteristik fondasi memengaruhi respons getaran. Literatur ini memperluas pemahaman FML dari uji kuasi-statik menuju kondisi layanan ekstrem (4,12,45).

Kegagalan FML bersifat hierarkis. Pada skala mikro, kegagalan dapat berupa void, debonding, retak matriks, fiber breakage, dan adhesi logam-resin yang lemah. Pada skala meso, kerusakan berkembang menjadi delaminasi, shear band, fiber pull-out, atau

plastic hinging pada logam. Pada skala makro, kegagalan tampak sebagai penurunan stiffness, permanent indentation, buckling lokal, penetrasi, atau fraktur total. Karena itu, evaluasi FML tidak cukup memakai satu metrik seperti kekuatan maksimum; diperlukan kombinasi energi serap, toughness, residual strength, toleransi kerusakan, dan stabilitas dimensi (41,27,25).

### **Pemesinan dan kualitas lubang pada FML**

Pemesinan merupakan tahap kritis karena banyak struktur FML membutuhkan lubang untuk rivet, bolt, fastener, atau integrasi komponen. Heterogenitas antara logam dan komposit menyebabkan respons pemotongan yang berbeda: logam cenderung menghasilkan burr, adhesi, panas, dan built-up edge, sedangkan komposit rentan delaminasi, fiber pull-out, uncut fiber, dan degradasi termal. Karena cacat lubang dapat menjadi titik awal kerusakan fatigue dan delaminasi, pemesinan FML harus diperlakukan sebagai bagian dari desain struktur, bukan operasi finishing yang terpisah (21,6,8).

Perbandingan drilling dan helical milling menunjukkan bahwa helical milling sering menurunkan thrust force, temperatur pemesinan, kekasaran permukaan, serta meningkatkan akurasi lubang pada CARALL. Hal ini dapat dijelaskan oleh mekanisme pemotongan yang lebih bertahap dan evakuasi chip yang lebih baik dibanding drilling konvensional. Namun, helical milling juga memerlukan kontrol pitch, strategi toolpath, dan waktu pemrosesan yang mungkin lebih panjang. Oleh karena itu, pilihan proses harus mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas lubang, produktivitas, konsumsi energi, dan persyaratan toleransi komponen (10,31,19).

Perkembangan coated tools, termasuk CVD diamond dan PVD TaC, menunjukkan upaya mengurangi aus pahat, adhesi aluminium, dan kerusakan permukaan. Studi drilling CFRP/Al dengan diamond-coated tools menunjukkan bahwa feed menjadi parameter penting dalam kemunculan cacat, sedangkan studi TaC-coated tools pada material tebal menemukan kombinasi feed dan cutting speed optimum sebagai kompromi antara gaya potong rendah dan material removal rate tinggi. Studi milling dengan monitoring vibrasi menunjukkan bahwa peningkatan cutting speed berkorelasi dengan peningkatan aus permukaan pahat dan perubahan morfologi chip. Secara praktis, monitoring vibrasi dapat dikembangkan menjadi indikator kondisi pahat secara real-time (38,39,37).

Abrasive waterjet cutting dan machining menawarkan alternatif nonkonvensional yang mengurangi panas, tetapi menghadirkan tantangan kerf taper, roughness, delamination factor, dan kontrol parameter. Studi pada magnesium FML berisi r-GO, metal-stacked hybrid fiber laminates, dan fibre intermetallic laminates memperlihatkan penggunaan ANOVA, response surface, dan algoritma

metaheuristik seperti gorilla troops atau moth-flame optimization untuk mencapai multi-response optimum. Temuan berulang menunjukkan bahwa tekanan waterjet, stand-off distance, traverse speed, dan abrasive flow rate sangat menentukan kualitas potong. Ini menegaskan pentingnya optimasi multi-objektif dalam pemesinan FML (34,14,28).

### Pemodelan numerik, digitalisasi, dan machine learning

Pemodelan numerik FML berkembang dari simulasi elastik sederhana menuju model kerusakan progresif, cohesive zone, Hashin failure, Johnson-Cook plasticity, Benzeggagh-Kenane interface law, subroutine strain-rate, dan surrogate modeling. Kebutuhan model yang rinci muncul karena FML memiliki multi-material interface yang tidak dapat direduksi menjadi properti homogen tunggal. Validasi dengan eksperimen tetap penting, karena parameter antarmuka dan kerusakan sering sensitif terhadap proses manufaktur, ukuran spesimen, dan kondisi uji (24,1,16).

Finite element method telah digunakan untuk memprediksi sifat lentur, hot roll bonding, hydroforming, ballistic impact, confined explosion, micro-cutting, dan transverse tensile loading. Pada beberapa studi, deviasi model-eksperimen dilaporkan relatif kecil, tetapi akurasi ini tidak boleh digeneralisasi tanpa memperhatikan material, geometri, kondisi batas, dan parameter damage. Tantangan utama adalah transferabilitas model dari kupon laboratorium ke komponen kompleks. Oleh karena itu, model FML harus dilengkapi protokol verifikasi dan validasi yang konsisten, termasuk

sensitivitas parameter, mesh convergence, dan kalibrasi antarmuka (3,15,44).

Machine learning mulai muncul sebagai peluang untuk memetakan hubungan input proses, kondisi antarmuka, dan performa FML. Tinjauan penguatan antarmuka menyinggung potensi machine learning pada adhesively bonded structures dan riset FML, sedangkan studi confined explosion telah menggunakan Gaussian process regression dan Bayesian optimization untuk optimasi desain. Potensi ini besar karena FML memiliki ruang desain yang luas: jenis logam, ketebalan, orientasi serat, resin, nanofiller, perlakuan permukaan, tekanan, temperatur, dan parameter pemesinan. Namun, machine learning hanya bermanfaat jika didukung dataset terbuka dan pelaporan eksperimen yang standar (43,29,40).

Konsep digital-twin dan data-driven framework mulai relevan terutama untuk forming, crash-relevant structures, pemantauan pemesinan, dan prediksi kerusakan. Digitalisasi FML dapat menggabungkan data proses, sensor vibrasi, temperatur, gaya potong, inspeksi permukaan, dan hasil uji mekanik untuk membangun model prediktif. Namun, tahap ini masih awal karena literatur yang tersedia lebih banyak pada simulasi atau optimasi offline. Agenda ke depan adalah menghubungkan proses real-time dengan model kerusakan dan metrik keberlanjutan, sehingga keputusan manufaktur dapat disesuaikan sebelum cacat menjadi permanen (11,26,30).

**Tabel 2.** Sintesis pemesinan, forming, dan keberlanjutan sebagai dasar agenda riset

| Area proses                 | Temuan kunci                                                       | Cacat/isu kritis                    | Strategi tindak lanjut                | Kontribusi untuk FML            | Ref. |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------|
| Drilling CFRP/Al            | Feed dominan terhadap cacat; Al memberi thrust/torque lebih tinggi | Delaminasi, burr, built-up edge     | Optimasi feed-speed dan inspeksi aus  | Kualitas lubang dan umur pahat  | (9)  |
| Helical milling vs drilling | Thrust force dan temperatur lebih rendah pada helical milling      | Akurasi lubang dan roughness        | Gunakan untuk lubang presisi CARALL   | Kompromi produktivitas-kualitas | (4)  |
| TaC-coated drilling         | Feed 0,15 mm/rev dan 180 m/min optimum                             | Tool wear, roughness, cutting loads | Kembangkan geometri chip-breaking     | Pemesinan kering lebih stabil   | (8)  |
| Vibration monitored milling | Cutting speed meningkatkan aus dan mengubah chip                   | Vibration, chip morphology          | Sensor vibrasi untuk monitoring pahat | Menuju machining digital        | (34) |
| AWJC r-GO Mg-FML            | Stand-off distance dan                                             | Kerf width, roughness, taper        | Optimasi metaheuristik multi-respons  | Kurangi cacat termal            | (37) |

|                            | pressure signifikan                                   |                                  |                                         |                                 |      |
|----------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|------|
| AWJ metal-stacked laminate | Water pressure paling berpengaruh pada Fd-top dan Ra  | Delaminasi dan roughness         | Naikkan pressure dalam batas aman       | Kualitas potong dan efisiensi   | (16) |
| Laser forming              | Sudut tekuk naik tetapi peak delamination force turun | Thermal degradation, bonding     | Batasi power dan scan passes            | Trade-off formability-antarmuka | (41) |
| Debonding-on-demand        | GF/PA6-Al adhesive                                    | Expandable graphite heat trigger | Antarmuka dapat dilepas untuk recycling | Circular FML                    | (22) |

### Keberlanjutan, ekodesain, dan akhir umur pakai

Keberlanjutan FML tidak dapat dinilai hanya dari pengurangan berat selama penggunaan. Walaupun penurunan massa dapat menghemat energi operasional kendaraan atau pesawat, produksi aluminium, serat karbon, resin, perlakuan permukaan, curing, autoclave, dan pemesinan juga membawa beban lingkungan. Oleh karena itu, studi life cycle assessment dan sustainability assessment menjadi semakin penting. LCA cradle-to-gate pada desain FML berbasis aluminium, matriks bio-PU, serat alam, dan perlakuan permukaan menunjukkan bahwa pilihan material dan perlakuan menentukan trade-off antara performa mekanik dan dampak lingkungan (32,16,6).

Ecodesign FML harus mengintegrasikan pemilihan bahan, energi proses, kualitas antarmuka, masa pakai, perbaikan, dan daur ulang. Salah satu temuan penting dari studi LCA adalah bahwa desain dengan performa mekanik tinggi tidak selalu memiliki dampak lingkungan rendah, sehingga indikator eco-efficiency diperlukan untuk menilai kombinasi keduanya. Pendekatan ini relevan untuk FML karena substitusi serat sintetis dengan serat alam mungkin menurunkan dampak tertentu, tetapi dapat menurunkan durabilitas atau meningkatkan risiko kelembapan. Keputusan berkelanjutan harus didasarkan pada multi-impact comparison, bukan satu indikator tunggal (5,42,13).

Sustainability-oriented manufacturing juga menuntut perubahan pada pemesinan. Proses kering, coated tools, helical milling yang menurunkan temperatur, dan abrasive waterjet yang menghindari panas dapat berkontribusi pada pengurangan coolant atau kerusakan termal, tetapi masing-masing membawa biaya energi, konsumsi abrasive, dan limbah. Karena itu, pemesinan berkelanjutan harus mengukur bukan hanya surface roughness atau tool wear, melainkan juga energi spesifik, umur pahat, scrap rate, kebutuhan rework, dan kemungkinan reuse material. Integrasi metrik teknis-lingkungan akan menjadi pembeda tinjauan FML generasi berikutnya (46,2,17).

End-of-life aircraft dan hybrid structures memperlihatkan tantangan besar karena material bernilai tinggi terkunci dalam struktur multi-material. Pendekatan unconventional mining mengusulkan bahwa pesawat akhir umur dapat menjadi sumber material strategis jika proses dismantling, sorting, dan recovery dikembangkan. Untuk FML, desain antarmuka yang dapat dilepas, penggunaan termoplastik, debonding-on-demand, dan standarisasi material menjadi kunci. Tanpa strategi akhir umur, FML berisiko memindahkan beban lingkungan dari tahap penggunaan ke tahap produksi dan pembuangan (33,23,18).

### Sintesis kritis dan agenda riset

Sintesis literatur memperlihatkan bahwa kemajuan FML paling kuat terjadi ketika desain material, antarmuka, proses, pemodelan, dan keberlanjutan diperlakukan sebagai sistem terhubung. Studi yang hanya mengejar kekuatan maksimum berisiko mengabaikan formabilitas, kualitas lubang, sensitivitas kelembapan, atau daur ulang. Sebaliknya, desain yang terlalu fokus pada keberlanjutan material dapat gagal memenuhi syarat struktural jika antarmuka dan proses tidak matang. Karena itu, agenda utama FML adalah ko-desain multi-objektif yang menyatukan performa mekanik, manufacturability, machinability, durability, dan circularity (35,7,36).

Kesenjangan pertama adalah standarisasi pelaporan. Banyak abstrak menyebut peningkatan kekuatan atau penurunan roughness, tetapi tidak selalu menyediakan konteks lengkap seperti ketebalan lapisan, fraksi volume serat, kondisi permukaan, viskositas resin, parameter curing, kelembapan, atau protokol inspeksi cacat. Tanpa standar data, sulit membandingkan hasil antar studi atau membangun model machine learning yang kuat. Komunitas FML perlu mengadopsi minimum reporting checklist yang mencakup arsitektur laminat, kondisi proses, uji mekanik, statistik, dan deskripsi kegagalan (20,22,9).

Kesenjangan kedua adalah validasi multiskala. Banyak model numerik berhasil pada kupon, tetapi

belum tentu berlaku pada komponen dengan curvature, lubang, tepi bebas, variasi ketebalan, atau beban gabungan. Penelitian masa depan perlu menghubungkan RVE, cohesive interface, progressive damage, dan model komponen. Validasi juga harus memasukkan inspeksi non-destruktif seperti mikro-CT, thermography, acoustic emission, atau digital image correlation jika tersedia. Tanpa validasi multiskala, model FML akan sulit digunakan sebagai dasar sertifikasi atau desain industri (4,12,45).

Kesenjangan ketiga adalah integrasi proses akhir. FML yang kuat pada tahap manufaktur dapat gagal setelah drilling, milling, AWJ, atau forming karena cacat baru. Oleh sebab itu, desain FML harus memasukkan pemesinan sebagai bagian dari lifecycle performance. Studi drilling, helical milling, coated tools, vibrasi, dan AWJ menunjukkan bahwa proses akhir dapat mengubah permukaan, mikrohardness, delaminasi, kerf, dan distribusi kerusakan. Agenda riset perlu menghubungkan parameter pemesinan dengan fatigue, corrosion, dan residual impact performance (41,27,25).

Kesenjangan keempat adalah keberlanjutan yang belum sepenuhnya dinamis. LCA FML mulai berkembang, tetapi masih perlu dihubungkan dengan variabilitas proses, scrap rate, rework, umur pahat, konsumsi energi aktual, dan skenario daur ulang. Riset masa depan sebaiknya mengembangkan eco-mechanical design map yang memperlihatkan trade-off antara performa dan dampak lingkungan pada berbagai kombinasi logam, serat, matriks, perlakuan permukaan, dan proses pemesinan. Pendekatan ini akan membantu memilih desain yang tidak hanya kuat, tetapi juga layak diproduksi dan bertanggung jawab lingkungan (21,6,8).

#### **Kerangka konseptual untuk tinjauan FML generasi berikutnya**

Berdasarkan sintesis di atas, kerangka konseptual FML generasi berikutnya dapat dipahami sebagai hubungan berantai antara pemilihan konstituen, rekayasa antarmuka, lintasan proses, pembentukan cacat, kinerja layanan, dan dampak siklus hidup. Pada tahap awal, keputusan mengenai logam, serat, matriks, nanofiller, dan ketebalan lapisan menentukan jendela proses yang tersedia. Keputusan ini kemudian membatasi jenis perlakuan permukaan, tekanan konsolidasi, temperatur curing, serta metode forming yang mungkin dilakukan tanpa merusak antarmuka. Setelah laminat terbentuk, pemesinan lubang, trimming, atau pemotongan menjadi sumber cacat sekunder yang dapat memperburuk performa fatigue dan dampak. Dengan demikian, performa akhir bukan hasil satu keputusan, melainkan akumulasi keputusan yang saling bergantung dari desain sampai akhir umur pakai (10,31,19).

Kerangka tersebut menuntut indikator evaluasi yang lebih kaya. Untuk aspek mekanik, kekuatan maksimum perlu dilengkapi dengan modulus,

toughness, energi serap, residual strength, fatigue life, dan stabilitas dimensi. Untuk aspek proses, evaluasi perlu mencakup waktu siklus, kebutuhan energi, scrap rate, risiko delaminasi, toleransi geometrik, serta sensitivitas parameter. Untuk aspek lingkungan, penilaian harus memasukkan sumber bahan baku, perlakuan permukaan, energi curing, konsumsi pahat atau abrasif, dan opsi pemulihan material. Jika semua indikator tersebut digabungkan, peneliti dapat membangun peta keputusan yang menunjukkan desain yang kuat tetapi sulit diproses, desain yang mudah diproduksi tetapi kurang tahan impact, atau desain yang ramah lingkungan tetapi membutuhkan perlindungan antarmuka lebih baik.

Dari perspektif publikasi ilmiah, naskah FML yang kuat sebaiknya tidak hanya melaporkan peningkatan persentase terhadap kontrol, tetapi juga menjelaskan mengapa peningkatan itu terjadi. Penjelasan mekanistik dapat diturunkan dari morfologi kerusakan, kondisi permukaan, distribusi void, hasil SEM, perubahan chip, pola retak, atau hasil simulasi yang tervalidasi. Tanpa penjelasan mekanistik, angka peningkatan sulit ditransfer ke sistem material lain. Karena itu, artikel masa depan perlu menggabungkan data kuantitatif dan bukti visual kerusakan, serta menempatkan temuan pada konteks desain yang lebih luas (38,39,37).

Pada tingkat industri, adopsi FML akan ditentukan oleh kemampuan memastikan reproduktibilitas dan kelayakan biaya. Proses seperti autoclave, compression molding, resin infusion, VARTM, hydroforming, laser forming, dan abrasive waterjet memiliki keunggulan masing-masing, tetapi juga memerlukan kendali mutu yang berbeda. Industri tidak hanya membutuhkan material yang kuat di laboratorium, melainkan material yang dapat diproduksi berulang, dipotong, dirakit, diperiksa, diperbaiki, dan didaur ulang. Oleh karena itu, kerangka riset FML perlu bergerak lebih dekat ke manufacturing readiness, termasuk toleransi proses, inspeksi cepat, dan standardisasi data.

Akhirnya, masa depan FML kemungkinan berada pada integrasi material cerdas dan desain sirkular. NiTi-FML menunjukkan potensi fungsi adaptif, sementara debonding-on-demand dan serat lignoselulosa menunjukkan arah circularity. Kedua jalur ini tidak harus dipisahkan. Struktur ringan masa depan dapat dirancang agar kuat selama layanan, mampu merespons beban atau temperatur, mudah dipantau, dan tetap dapat dipisahkan setelah tidak digunakan. Tantangannya adalah menyeimbangkan fungsi tambahan tersebut dengan biaya, kompleksitas proses, dan stabilitas antarmuka jangka panjang. Inilah alasan mengapa FML perlu diteliti melalui kolaborasi mekanika, manufaktur, kimia permukaan, komputasi, dan ilmu lingkungan.

#### **Rekomendasi format pelaporan untuk naskah FML**

doi: <https://doi.org/10.62299/jeme.v3i2.36> p-issn/e-issn: 3030-9867/3046-5850

*Journal of Energy and Mechanical Engineering*, Universitas Nahdlatul Ulama Gorontalo

Untuk meningkatkan nilai publikasi, setiap artikel FML sebaiknya menyajikan identitas material secara lengkap: jenis dan seri logam, kondisi perlakuan panas, ketebalan tiap lapisan, jenis serat, arsitektur kain atau prepreg, sistem matriks, fraksi volume, dan urutan tumpukan. Informasi ini sering dianggap detail teknis, tetapi sebenarnya menentukan kemampuan pembaca mereplikasi hasil. Perbedaan kecil dalam ketebalan logam atau orientasi serat dapat mengubah posisi sumbu netral, pola tegangan, dan mekanisme delaminasi. Oleh karena itu, pelaporan material harus ditempatkan sebagai bagian dari kontribusi ilmiah, bukan sekadar lampiran metode.

Bagian proses juga harus lebih eksplisit. Parameter curing, tekanan konsolidasi, waktu tahan, laju pemanasan, kondisi pendinginan, jenis perlakuan permukaan, kebersihan permukaan, dan jeda waktu antara perlakuan permukaan dan bonding perlu dilaporkan secara terstruktur. Pada tahap forming atau pemesinan, penulis perlu mencatat kondisi alat, geometri pahat, parameter proses, lingkungan pendinginan, dan metode pengukuran cacat. Dengan cara ini, pembaca dapat membedakan apakah performa tinggi berasal dari material yang unggul, proses yang stabil, atau kombinasi keduanya.

Pelaporan kerusakan perlu menghindari istilah umum yang tidak operasional. Misalnya, pernyataan bahwa sampel mengalami delaminasi sebaiknya dilengkapi lokasi, arah propagasi, panjang atau luas kerusakan, energi yang terkait, dan bukti visual. Untuk studi numerik, parameter damage harus dijelaskan bersama asumsi, hukum material, ukuran elemen, kondisi kontak, serta kriteria validasi. Untuk studi keberlanjutan, batas sistem, unit fungsional, basis data, kategori dampak, dan asumsi daur ulang perlu dijelaskan agar pembaca dapat menilai ketahanan kesimpulan.

Rekomendasi terakhir adalah menyediakan matriks ringkas yang menghubungkan tujuan aplikasi dengan konfigurasi FML. Aplikasi aerospace mungkin memprioritaskan damage tolerance dan sertifikasi; otomotif menekankan biaya dan waktu siklus; proteksi balistik menuntut energi serap; sedangkan aplikasi berkelanjutan menekankan material bio-based dan kemampuan daur ulang. Dengan menyatakan konteks aplikasi sejak awal, artikel FML dapat menghindari klaim umum bahwa satu konfigurasi adalah terbaik untuk semua kondisi. Pendekatan ini akan memperkuat relevansi industri sekaligus meningkatkan kualitas ilmiah tinjauan.

Selain itu, tabel ekstraksi pada artikel tinjauan perlu dipakai sebagai alat argumentasi, bukan hanya inventaris. Tabel yang baik harus memperlihatkan

hubungan antara variabel proses, jenis cacat, indikator performa, dan konsekuensi desain. Dengan membaca tabel, pembaca jurnal harus dapat melihat pola umum, misalnya bahwa peningkatan tekanan dapat memperbaiki kualitas bentuk tetapi berisiko merusak antarmuka, atau bahwa nanofiller meningkatkan ketangguhan hanya pada rentang konsentrasi tertentu. Oleh karena itu, tabel ringkasan dalam naskah ini disusun untuk mendukung pembahasan, bukan menggantikan pembahasan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Tinjauan ini menunjukkan bahwa FML pada periode 2024-2026 berkembang menuju material hibrida yang semakin fungsional, adaptif, dan berorientasi keberlanjutan. Kemajuan terbesar terlihat pada integrasi pre-curing-forming, hydroforming aktif, laser forming, sinkronisasi aging-curing, penguatan antarmuka berbasis surface functionalization dan nanofiller, pemesinan presisi dengan helical milling atau AWJ, serta pemodelan kerusakan yang lebih rinci. Namun, tantangan mendasar tetap sama: menjaga integritas antarmuka, mengendalikan cacat proses, memvalidasi model, dan memastikan bahwa klaim lightweight benar-benar menghasilkan manfaat lingkungan sepanjang siklus hidup (34,14,28).

Untuk publikasi dan riset lanjutan, FML sebaiknya diposisikan sebagai sistem material-proses, bukan sekadar material baru. Setiap klaim performa perlu dikaitkan dengan rute manufaktur, kondisi antarmuka, metode pemesinan, dan metrik keberlanjutan. Prioritas riset berikutnya meliputi dataset terbuka, standarisasi pelaporan, pemodelan multiskala tervalidasi, machine learning yang dapat dijelaskan, debonding-on-demand, dan optimasi multi-objektif. Dengan arah tersebut, FML berpotensi menjadi fondasi struktur ringan generasi baru pada aerospace, otomotif, proteksi dampak, dan aplikasi teknik yang menuntut kombinasi kekuatan, ketangguhan, presisi, dan circularity. Pengembangan berikutnya juga perlu memperhatikan kesiapan rantai pasok, kemampuan inspeksi kualitas di lantai produksi, serta kompatibilitas standar pengujian agar hasil penelitian tidak berhenti pada skala kupon, tetapi dapat diterjemahkan menjadi komponen nyata yang aman, efisien, dan dapat dipertanggungjawabkan secara lingkungan (24,1,16).

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak yang menyediakan hasil ekstraksi literatur basis data ilmiah dan sumber referensi terbuka sebagai dasar penyusunan artikel tinjauan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Awang Julaihi, A.M.I., Wong, I.M.M., Dayou, S., & Ngu, H.J.. (2026). Mechanical Properties of Fibre Metal Laminates with Unsaturated Polyester Resin: Effects of Fibre Orientations. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 55-65. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-9740-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-96-9740-3_4)
2. Bakhbergen, U., Abbassi, F., Kalimuldina, G., Montazami, R., Shehab, E., & Araby, S.. (2024). Recent approaches of interface strengthening in fibre metal laminates: Processes, measurements, properties and numerical analysis. *Composites Part B: Engineering*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111744>
3. Blala, H., Pengzhi, C., Shenglun, Z., Gang, C., Shangwen, R., & Zhang, M.. (2025). Experimental and numerical investigation of an alternative hydroforming process of aluminum/glass fiber-reinforced polymer-based fiber metal laminates. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 11(4), 2058-2075. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2403817>
4. Bolar, G., Dinesh, A.A., Polishetty, A., Shetty, R., Hiremath, A., & Neelakantha, V.L.. (2024). Performance Analysis of Helical Milling and Drilling Operations While Machining Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Laminates. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/jmmp8030113>
5. Braga, G.G., Giusti, G., César dos Santos, J., Silva, D.A.L., Christoforo, A.L., Panzera, T.H., & Scarpa, F.. (2024). Life cycle assessment of fibre metal laminates: An ecodesign approach. *Composites Part C: Open Access*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100435>
6. Caggiano, M., Saffioti, M.R., & Rotella, G.. (2025). Fiber Metal Laminates: The Role of the Metal Surface and Sustainability Aspects. *Journal of Composites Science*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/jcs9010035>
7. Cefis, N., Rosso, R., Astori, P., Airoidi, A., & Fedele, R.. (2026). Ballistic Impact Tests on Fiber Metal Laminates: Experiments and Modeling. *Journal of Composites Science*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/jcs10030147>
8. Costa, R., Kučera, P., Zetek, M., Povolný, M., Bakša, T., Silva, T., Figueiredo, D., de Jesus, A., & Silva, F.. (2025). Performance evaluation of PVD TaC-coated tools in the drilling of thick CFRP/Al multi-materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16957-y>
9. Costa, R.D.F.S., Duro, J.N.S., Sousa, V.F.C., Silva, T.E.F., Figueiredo, D.A., & Jesus, A.M.P.. (2024). Drilling of CFRP/Al multi-material stacks using WC-Co CVD diamond coated tools. *Procedia Structural Integrity*, 53, 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.044>
10. Dhanaraj, R., Venkateshwaran, N., & Vigneshwaran, K.. (2026). Unveiling synergistic and mechanical performance of hybrid fiber metal laminates by optimized aluminum/basalt/pineapple fiber stacking sequence. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 45(3-4), 513-526. <https://doi.org/10.1177/07316844251332222>
11. Doluk, E., Magdziak, M., Sułkiewicz, P., & Buk, J.. (2025). Influence of machining conditions on the surface quality after circumferential milling of carbon fiber reinforced aluminum laminate. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(10), 223-237. <https://doi.org/10.12913/22998624/207601>
12. Esakkiraj, E.S., Ismail, S.O., Nagarajan, R., Mohammad, F., Krishnan, K., & Indira Devi, M.P.. (2025). Enhanced mechanical and thermomechanical performance of basalt-carbon hybrid composites reinforced with titanium wire mesh. *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 4963-4972. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.10.155>
13. Fadly, M.S., Hair, J., Chandrabakty, S., Anwar, K., & Hamzah, M.S.. (2024). BALLISTIC IMPACT RESPONSE OF FIBRE METAL LAMINATES BASED ON RAMIE FIBRE WOVEN REINFORCED POLYESTER. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 19(24), 1447-1454. <https://doi.org/10.59018/122478>
14. Fragassa, C., & Santulli, C.. (2025). Hybridization of Lignocellulosic Biomass into Aluminum-Based Materials: Comparing the Cases of Aluminum Matrix Composites and Fiber Metal Laminates. *Journal of Composites Science*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/jcs9070356>
15. Gang, C., Blala, H., Pengzhi, C., Shenglun, Z., Shangwen, R., & Zhang, M.. (2025). Failure Analysis and Process Optimization in Hydroforming of Fiber Metal Laminates: An Experimental and Numerical Investigation. *Applied Composite Materials*, 32(2), 733-761. <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10299-w>

16. Gnanasekaran, K., Rajesh, M., & Hariram, V.. (2025). Advanced Material Processing: Optimization of Abrasive Water Jet Parameters for Metal-Stacked Hybrid Fiber Laminate. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(14), 14708-14721. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10198-y>
17. Gurbanov, N.A.. (2024). EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHODS IN DETERMINING THE FLEXURAL PROPERTIES OF FIBRE METAL LAMINATE COMPOSITES. *Progress in Physics of Metals*, 25(2), 364-385. <https://doi.org/10.15407/UFM.25.02.364>
18. Hussain, M., Zaki, W., & Umer, R.. (2025). Manufacturing and performance evaluation of NiTi-based fiber metal laminates for adaptive aerospace structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109022>
19. Kartal, F.. (2025). Abrasive Water Jet Machining of Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites: Optimization of Machinability and Surface Integrity for High-Precision Applications. *Polymers*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/polym17040445>
20. Kavitha, K., & Vijayan, R.. (2024). Enhancement and Characteristics Evaluation of Fibre Metal Laminate Composed of Woven Glass Fibre and Nano-Alumina via Hand Layup Method. *Fibers and Polymers*, 25(9), 3513-3524. <https://doi.org/10.1007/s12221-024-00670-w>
21. Kong, X., Zhu, Z., Zheng, C., Zhou, H., & Wu, W.. (2025). Numerical investigation on the dynamic behavior of thermoplastic fiber-metal laminates subject to confined explosion loading. *Thin-Walled Structures*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113354>
22. Laachachi, A., Kachouri, O., Berndt, J., Zucker, G., Zopp, C., Bartelt, J., & Makradi, A.. (2026). Use of expandable graphite as debonding on demand technology between glass fibre reinforced polyamide 6 and aluminium. *Journal of Advanced Joining Processes*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100369>
23. Liang, C., Chen, J., Gu, J., Luo, X., & Evsyukov, S.A.. (2026). State-of-the-art review on the flexural behavior of carbon fiber-reinforced aluminum laminates (CARALL). *Composites Part B: Engineering*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2026.113444>
24. Lin, J.. (2025). Investigating dynamics of fiber metal laminate plates exposed to time-dependent uniform pressure loading. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. <https://doi.org/10.1007/s43538-025-00429-8>
25. Liu, Z., Shan, Z., Huang, H., Liu, J., Sun, F., Zhang, Q., Li, X., & Zhang, H.. (2026). Investigation of secondary aging and curing synergy in glass fiber–reinforced rare earth aluminum alloy laminates toward property enhancement. *Composites Part B: Engineering*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.113283>
26. Malekinejad, H., Ramezani, F., Carbas, R.J.C., Marques, E.A.S., & da Silva, L.F.M.. (2024). Study of CFRP Laminate Gradually Modified throughout the Thickness Using Thin Ply under Transvers Tensile Loading. *Materials*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/ma17102388>
27. Medjahed, A.B., Youcef, L., Toufik, S., Abdelkhalek, H., Abdeldjalil, Z., & Mehdi, D.. (2025). On the bending behavior of hybrid fiber–metal laminates (HFMLs) based on aluminum and glass/Kevlar fibers reinforced epoxy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 239(2), 207-220. <https://doi.org/10.1177/14644207241257442>
28. Mohanta, D.K., Sahoo, B., & Mohanty, A.M.. (2024). Experimental analysis for optimization of process parameters in machining using coated tools. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00370-5>
29. Overberg, M., Badrul Hasan, M.M., Abdkader, A., Rehra, J., Schmeer, S., & Cherif, C.. (2024). Investigations on the development of impact-resistant thermoplastic fibre hybrid composites from glass and steel fibre. *Journal of Composite Materials*, 58(14), 1675-1687. <https://doi.org/10.1177/00219983241246128>
30. Rehra, J., Overberg, M., Schmeer, S., Abdkader, A., & Cherif, C.. (2025). Micro-Level Hybridization of Steel, Glass, and Polypropylene Filaments via Air Texturing: Mechanical and Morphological Analysis. *Journal of Composites Science*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/jcs9010012>
31. Salamat-Talab, M., Kazemi, H., Safari, M., & Joudaki, J.. (2025). Aluminum-based fiber metal laminates in the aircraft industry. *Aluminum Technologies in Aerospace Applications*, 93-126. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-82447-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-82447-0_5)
32. Saleh, M., Yarmohammad Tooski, M., Khorshidvand, A.R., & Javadi, M.. (2025). Experimental study of the effect of carbon nanotubes and nano-silica on the impact resistance of FML sheets under low velocity Impact. *Functional Composites and Structures*, 7(3). <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ade75a>
33. Sales-Contini, R.C.M., Arruda, M.A., Sebbe, N.P.V., Lopes, H.M., Silva, F.J.G., Costa, R.D.F.S., & Pedroso, A.F.V.. (2024). Wear Behaviour Studies of TaC-Coated Tools in CFRP/Al/CFRP Stacks in the Milling Process Using Vibrational Analysis. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 56-65. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-74485-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-74485-3_7)
34. Sales-Contini, R.C.M., Sebbe, N.P.V., da Silva, F.J.G., Bernardi, H.H., & Matsushima, J.T.. (2026). Vibration Monitoring and Tool Wear Analysis in Milling Fiber Metal Laminates for Aerospace

- Applications. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 41-52. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-07144-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-032-07144-6_4)
35. Santhanakrishnan, R., Marichamy, S., Anandavelu, K., Gomathy, V., Vinu, A.T., Veerappan, G., Ram, S., & Sheeba, T.B.. (2025). Parametric analysis in the machining of gun metal using computer numerical control turning process. *Interactions*, 246(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-025-02269-w>
  36. Singh, P., Sheikh, J., & Behera, B.K.. (2024). Metal-faced sandwich composite panels: A review. *Thin-Walled Structures*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111376>
  37. Siva Kumar, M., & Rajamani, D.. (2024). Abrasive waterjet cutting of r-GO infused magnesium fiber metal laminates: Experimental investigations and optimization through gorilla troops algorithm. *Polymer Composites*, 45(12), 10666-10685. <https://doi.org/10.1002/pc.28499>
  38. Vieille, B., Vivet, A., & Bâ, A.. (2026). Influence of Hybridization on the Pyrolysis and Mechanical Behaviour of Carbon and Flax Fibres Reinforced Epoxy Laminates Under Fire Conditions. *Applied Composite Materials*, 33(2). <https://doi.org/10.1007/s10443-025-10428-z>
  39. Xu, W., Xia, C., & Ni, C.. (2024). Numerical Simulation and Experimental Verification of Hot Roll Bonding of 7000 Series Aluminum Alloy Laminated Materials. *Metals*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/met14050551>
  40. Yousaf, A., Abas, M., Khawaja, A.U.H., Khan, M.S., Shaheed, K., & Muhammad, A.. (2025). Enhancing mode-I fracture toughness of GLARE composites through pre-crack insert film thickness variation. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 13(4), 3844-3851. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2025.01.005>
  41. Zal, V., Moslemi Naeini, H., Konarang, M., & Roohi, A.H.. (2024). An Experimental Investigation on the Laser Forming of Aluminum/Epoxy/Glass FMLs. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 11(2), 402-418. <https://doi.org/10.1007/s40516-024-00250-z>
  42. Zalilah, U., Kumar, D., Kumar, S., & Mustapha, M.. (2025). TAGUCHI OPTIMIZATION OF X70 CARBON STEEL HEAT TREATMENT: A STUDY ON HARDNESS, THICKNESS AND PHASE ANALYSIS. *Jurnal Teknologi*, 87(5), 1007-1014. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.23474>
  43. Zecchi, S., Cristoforo, G., Rosso, C., Tagliaferro, A., & Bartoli, M.. (2025). Unconventional Mining of End-of-Life Aircrafts: A Systematic Review. *Recycling*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/recycling10050187>
  44. Zhang, H., & Xie, X.. (2024). FEM model optimization study of mechanical properties and material selection in stamping process. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns-2024-2461>
  45. Zhang, P., Wang, S., Zhang, J., & Yu, Y.. (2025). Study on the micro-cutting mechanism and tool wear mechanism of aluminum matrix composites reinforced with FeCoNiCrAl high entropy/medium entropy alloy fibers. *Vacuum*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114253>
  46. Zhang, Z., Wang, Q., Yu, S., Wang, T., Jia, H., & Ren, M.. (2024). Feasibility study of an integrated pre-curing and forming process for 6061 Al alloy and carbon fiber hybrid composites. *Polymer Composites*, 45(11), 10392-10403. <https://doi.org/10.1002/pc.28481>