

# Pengaruh Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) pada performa aerodinamis dan struktural sayap pesawat: kajian pada Boeing 787 Dreamliner dan Airbus A350

Aisah, Muhammad Rosyid Suseno, Nova Nur Elisa Dewi

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (SinafiX) & International Physics Conference (IPC)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

9 November 2024

## Abstract

*This narrative review aims to evaluate the influence of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) utilization on the aerodynamic and structural performance of aircraft wings, using a comparative study of the Boeing 787 Dreamliner and Airbus A350. CFRP is a composite material made of carbon fibers as reinforcement within a polymer matrix, possesses superior properties such as high strength-to-weight and modulus-to-weight ratios, low thermal expansion coefficient, and excellent fatigue strength and thermal conductivity. The application of CFRP in wing structures, a crucial component for generating aerodynamic lift, has the potential to enhance aircraft efficiency and performance. Through a review of national and international literature, this study analyzes the effect of CFRP on key parameters including lift-to-drag ratio, structural weight and wing loading. The review highlights that CFRP contributes to significant improvements in the aerodynamic and structural performance of both aircraft.*

**Keywords:** Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) · aircraft wings · lift-to-drag ratio · aerodynamic efficiency · structural performance.

## Abstrak

Kajian naratif ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) terhadap performa aerodinamis dan struktural sayap pesawat, dengan menggunakan studi perbandingan antara Boeing 787 Dreamliner dan Airbus A350. CFRP, sebagai material komposit yang terdiri dari serat karbon sebagai penguat dalam matriks polimer, memiliki sifat unggul seperti rasio kekuatan-terhadap-berat dan modulus-terhadap-berat yang tinggi, koefisien ekspansi termal yang rendah, serta ketahanan lelah dan konduktivitas termal yang sangat baik. Penerapan CFRP pada struktur sayap, yang merupakan komponen penting dalam menghasilkan gaya angkat aerodinamis, berpotensi meningkatkan efisiensi dan performa pesawat. Melalui tinjauan literatur nasional dan internasional, studi ini menganalisis pengaruh CFRP terhadap parameter utama seperti rasio gaya angkat terhadap gaya hambat, bobot struktural, dan beban sayap. Tinjauan ini menyoroti bahwa CFRP memberikan kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan performa aerodinamis dan struktural kedua pesawat tersebut.

**Kata kunci:** CFRP · sayap pesawat · rasio gaya angkat terhadap gaya hambat · efisiensi aerodinamis · performa struktural.

## PENDAHULUAN

Meningkatkan kekuatan struktural sayap pesawat dan memperbaiki kinerja aerodinamika adalah faktor yang sangat penting untuk mendukung pengembangan pesawat komersial yang

---

✉ Aisah  
Aisah\_1306621004@mhs.unj.ac.id

Universitas Negeri Jakarta. Jakarta, Indonesia

---

**How to Cite:** Aisah, A., Suseno, M.R. & Dewi, N.N.E. (2024). Pengaruh Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) pada Performa Aerodinamis dan Struktural Sayap Pesawat: Kajian pada Boeing 787 Dreamliner dan Airbus A350. *Prosiding Seminar Nasional Fisika & International Physics Conference*, 3(1), 41-50. <https://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi/>

lebih canggih. Berat struktural menjadi komponen utama dari massa lepas landas pesawat. Sayap menyumbang hampir sepertiga dari berat berat struktural tersebut. Mengurangi massa sayap, yang menanggung beban paling signifikan, merupakan tantangan utama bagi perancangan pesawat (Dababneh & Kipouros, 2018). Salah satu pendekatan yang efektif untuk mengatasi hal ini adalah dengan mengoptimalkan efisiensi aerodinamis sayap, mengingat sayap merupakan komponen utama yang menghasilkan daya angkat (*lift*) (Garmann & Visbal, 2014). Pemilihan parameter sayap yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan karakteristik aerodinamis pesawat, sehingga mampu mengurangi berat total saat lepas landas dan meningkatkan efisiensi ekonomi secara keseluruhan (Kretov & Tiniakov, 2022).

Dalam aspek keberlanjutan dan efisiensi berat, terdapat potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi lingkungan dalam proses manufaktur dirgantara, khususnya terkait aspek ekologi dan ekonomi. Manfaat dari peningkatan efisiensi lingkungan ini sangat penting untuk mendorong penerapan lebih luas dari *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) pada pesawat komersial modern. Dengan demikian, penelitian lanjutan dan inovasi dalam proses manufaktur CFRP diperlukan untuk memastikan bahwa keuntungan ekologis dan ekonomisnya dapat dimaksimalkan tanpa mengorbankan kualitas dan performa struktural pesawat (Al-Lami *et al* , 2018).

Material komposit CFRP kini menjadi alternatif utama bagi produsen pesawat terbesar dalam menggantikan logam konvensional. Penggunaan CFRP bertujuan untuk mencapai karakteristik mekanik yang lebih unggul, terutama dalam hal kekuatan dan daya tahan terhadap beban, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1 (Long *et al*, 2024).

**Tabel 1.** Keterangan Bahan Baja dan CFRP (Long *et al*, 2024)

Bahan	Modulus elastisitas (GPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Kerapatan ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Faktor redaman
Baja	201	1860	7850	0.008
CFRP	160	2400	1600	0.005

Sebagai contoh, meskipun CFRP memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah (160 GPa) dibandingkan dengan baja (201 GPa), kekuatan ultimitas CFRP mencapai 2400 MPa, lebih tinggi dari baja yang hanya sebesar 1860 MPa. Selain itu, densitas CFRP yang jauh lebih rendah (1600  $\text{kg/m}^3$  dibandingkan 7850  $\text{kg/m}^3$  pada baja) menunjukkan bahwa CFRP mampu memberikan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih optimal. Selain kekuatannya, CFRP juga memiliki keunggulan dalam hal koefisien Poisson yang lebih rendah dan faktor redaman yang lebih baik, yang membantu dalam mengurangi getaran dan meningkatkan kenyamanan saat penerbangan (Long *et al*, 2024).

CFRP juga memiliki keunggulan signifikan dibandingkan aluminium, terutama dalam rasio kekuatan-terhadap-berat dan modulus-terhadap-berat yang tinggi, memungkinkan pengurangan berat tanpa mengorbankan kekuatan. Menurut Kretov dan Shataev (2020), struktur CFRP yang dirancang dengan baik, 30% lebih ringan dibandingkan dengan struktur paduan aluminium (Ozkan & Karokglanli, 2020). Oleh karena itu, dalam kajian ini akan dibahas secara komprehensif mengenai efektivitas penggunaan CFRP dalam performa aerodinamis dan struktural sayap pesawat Boeing 787 Dreamliner dan Airbus A350.

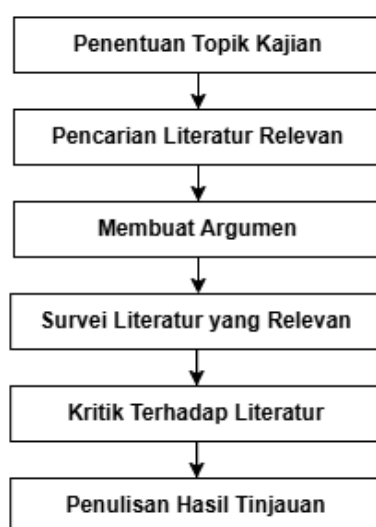
## METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kualitatif dengan jenis naratif. Kajian naratif disusun menggunakan metode studi literatur dengan melakukan tinjauan pustaka. Menurut Taylor & Procter (2010), tinjauan pustaka atau kajian pustaka (*literature review*) adalah kegiatan untuk mengulas atau menelaah berbagai literatur yang telah dipublikasikan oleh akademisi atau peneliti sebelumnya yang relevan dengan topik yang diteliti. Tinjauan pustaka juga berfungsi untuk menyaring masalah-masalah yang akan diangkat sebagai topik penelitian serta untuk memperjelas posisi masalah dalam konteks yang lebih luas. Rangka teori dalam kajian pustaka ini akan menjadi dasar bagi pelaksanaan penelitian (Mahanum, 2021). Studi literatur bertujuan untuk mengkaji pengaruh penggunaan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) pada performa aerodinamis dan struktural sayap pesawat. Kajian dilakukan dengan membandingkan implementasi CFRP pada dua kasus, yaitu pesawat Boeing 787 Dreamliner dan Airbus.

Pencarian literatur dilakukan melalui *database* ilmiah seperti *Google Scholar*, *IEEE*, *ScienceDirect*, *Springer* dan buku elektronik. Berdasarkan pencarian tersebut, diperoleh sejumlah 252.378 artikel yang dipublikasikan antara tahun 2014 - 2024, dengan menggunakan kata kunci "*carbon fiber reinforced polymer*", "*aircraft wing structural*", "*aerodynamics performance*", "*Boeing 787 Dreamliner aircraft*", dan "*Airbus A350 aircraft*" untuk jurnal internasional. Sedangkan pada jurnal nasional digunakan kata kunci: "polimer diperkuat serat karbon", "struktural sayap pesawat", "performa aerodinamika", "pesawat Boeing 787 Dreamliner", "pesawat Airbus A350".

Selanjutnya artikel diseleksi berdasarkan relevansi dengan topik penelitian, yaitu pengaruh CFRP pada performa aerodinamis dan struktural sayap pesawat Boeing 787 Dreamliner dan Airbus A350. Proses seleksi tersebut menghasilkan sejumlah 27 artikel ataupun buku elektronik yang mencakup teori material CFRP, aerodinamika, struktur pesawat, dan studi kasus Boeing 787 Dreamliner dan Airbus A350.

Adapun langkah-langkah penelitian disajikan pada diagram alir berikut.

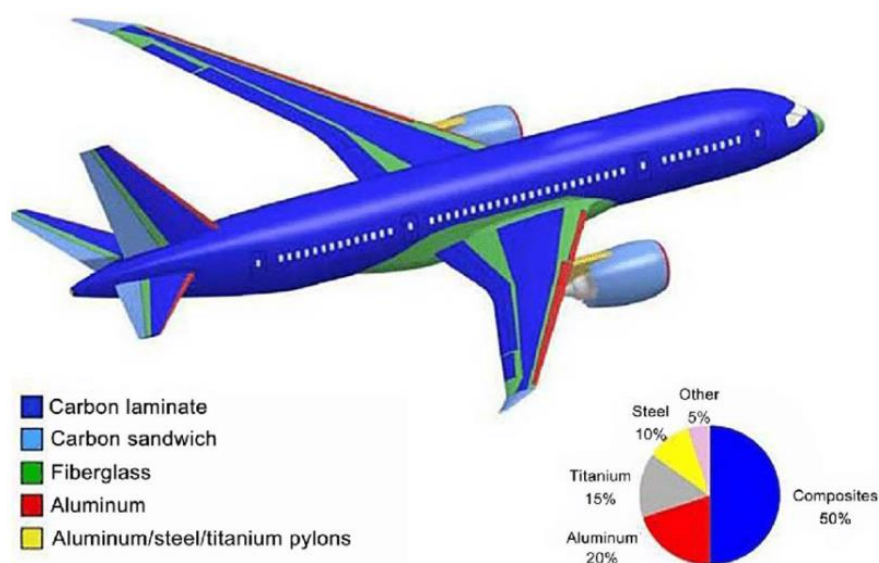


**Gambar 1.** Diagram Alir Langkah-langkah Penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Boeing 787 Dreamliner

Boeing mengeluarkan versi B787 (Dreamliner) pada tahun 2004. B787 Dreamliner merupakan pesawat komersial yang menggunakan persentase bahan komposit sangat tinggi dibandingkan bahan tradisional, seperti aluminium yang biasa digunakan dalam pembuatan pesawat (Song et al, 2014). Pesawat B787 Dreamliner menggunakan CFRP dalam skala yang sangat besar, yang menyusun 80% dari volumenya (Hanna *et al*, 2023). Berdasarkan beratnya, material pesawat terdiri dari 50% komposit (Aly, 2017), 20% aluminium, 15% titanium, 10% baja, dan 5% material lainnya, seperti plastik atau fiberglass (Duarte, 2024; Al-Mamun *et al*, 2024).

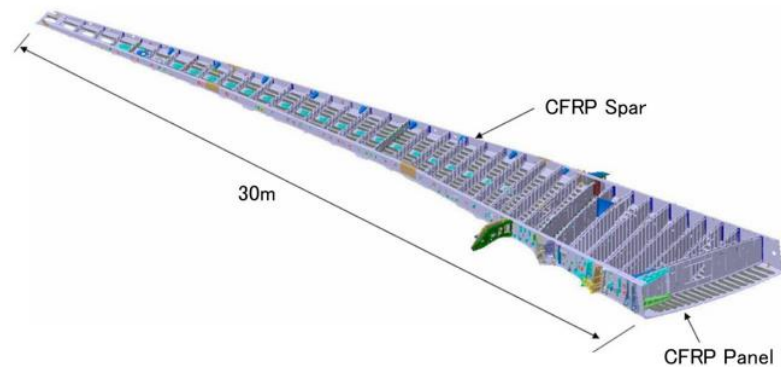


**Gambar 2.** Distribusi Penggunaan Material pada Boeing 787 Dreamliner (Ghobadi, 2017)

Gambar 2 menunjukkan bagian-bagian pesawat B787 Dreamliner yang terdiri dari komposit, yang diwakili oleh warna biru. CFRP yang digunakan dalam B787 Dreamliner terbuat dari matriks resin epoksi yang diperkuat serat karbon berdaya tinggi. Serat karbon ini memberikan kekuatan tarik yang sangat tinggi (sebesar 3.500 Mpa) dan modulus elastisitas sekitar 230 Gpa (Al-Mamun *et al*, 2024). Sekitar 32.000 kg CFRP yang dibuat dengan 23 ton serat karbon digunakan pada setiap pesawat B787 Dreamliner. CFRP digunakan pada seluruh badan pesawat, ekor, sayap, pintu, dan interior pesawat (lantai dan pelapis kabin) (Duarte, 2017; Kesarwani, 2017; Pio *et al*, 2022). Komponen lain pada pesawat juga banyak menggunakan komposit, seperti stabilizer horizontal dan vertikal, komponen kontrol penerbangan, dan *fairing* (Pio *et al*, 2022).

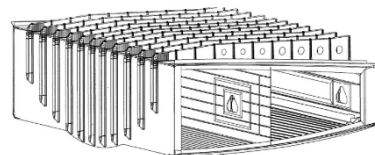
#### Struktural Sayap Pesawat B787 Dreamliner

Desain sayap B787 Dreamliner menggunakan bahan komposit pada hampir seluruh bagian sayap (Duarte, 2017). Gambar 3 memperlihatkan skema struktur kotak sayap pesawat (*wing box*) dengan CFRP. Struktur sayap yang dikonstruksi *Mitsubishi Heavy Industry* pada Gambar 3, dibangun dengan dimensi rentang 30m dan panjang 6m. Ruang kosong pada *wing box* tersebut digunakan sebagai tangki bahan bakar (MHI, 2014).



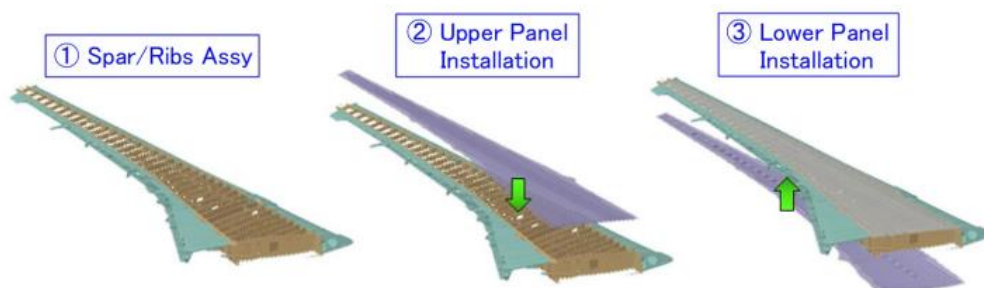
**Gambar 3.** CFRP pada Struktur Sayap Boeing 787 Dreamliner (MHI, 2014)

Pada *wing box* tersebut, dua *spar* berbentuk "T" didesain dari pangkal sayap hingga ujung sayap. Bagian *spar* dan *ribs* pesawat terbuat dari CFRP. Diantara dua *spar* utama, terdapat 37 *ribs* yang berfungsi untuk mendistribusikan beban dan menahan gaya aerodinamis yang terjadi selama penerbangan (Duarte, 2017). Struktur *wing box* bagian tengah dikonstruksi mirip dengan sayap luar. Rangka sayap dilapisi oleh panel di bagian atas dan bawah yang berbahan CFRP. Bagian tengah rangka sayap terdapat *stringer* yang terhubung dengan *stringer* sisi sayap di sambungan sayap. Rangka sayap bagian tengah memiliki ketebalan yang bervariasi untuk memenuhi kebutuhan beban pesawat (Gopal *et al*, 2016).



**Gambar 4.** Skema *Wing Box* Bagian Tengah (Gopal, 2016)

Proses perakitan rangka sayap pada B787 Dreamliner tercantum pada Gambar 5. Tahapan pertama dipasangkan bagian *spar* dan *ribs* untuk membentuk kerangka. Setelah kerangka selesai, panel CFRP untuk melapisi dipasang di bagian atas dan bawah (MHI, 2014; Duarte, 2017).

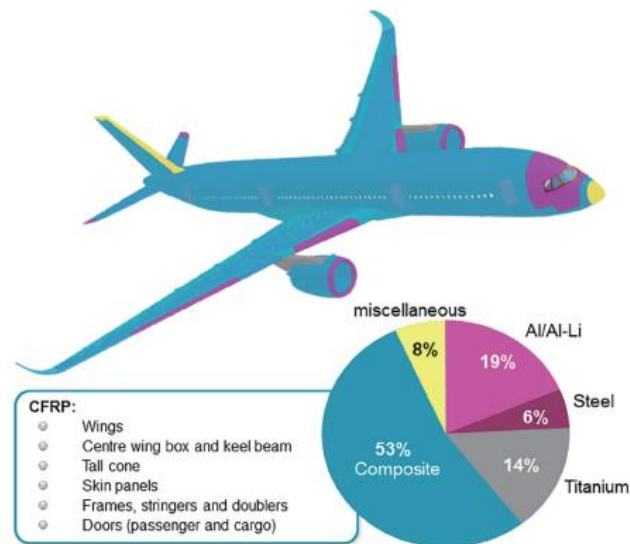


**Gambar 5.** Perakitan *Wing Box* B787 Dreamliner (MHI, 2014)

### Airbus A350

Pesawat Airbus A350 menggunakan sekitar 53% CFRP untuk strukturnya, termasuk badan pesawat, sayap, dan ekor (Hana *et al*, 2023). Pada rangka pesawat A350, lebih dari 70% terdiri dari material *advance*, yaitu komposit, titanium, dan paduan aluminium (Gambar 6). *Fuselase* pesawat yang terbuat dari CFRP juga menghasilkan pembakaran bahan bakar yang lebih rendah

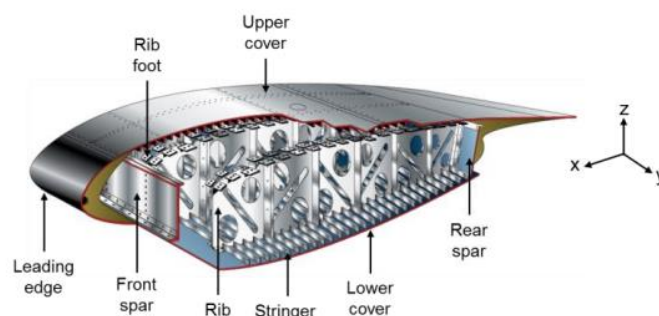
serta perawatan yang lebih mudah (Lubrina *et al*, 2014). CFRP yang diterapkan pada Airbus A350 diperkuat dengan serat yang tersusun dalam berbagai arah untuk memaksimalkan kekuatan serta kekakuannya. Serat karbon yang dipakai memiliki kekuatan tarik tinggi (4.000 MPa) dan modulus elastisitas sebesar 300 Gpa (Al-Mamun *et al*, 2024).



**Gambar 6.** Bahan Penyusun Struktur Airbus A350 (Bachmann *et al*, 2017)

#### Struktural Sayap Pesawat Airbus A350

Pada penutup sayap Airbus A350, dipasang penguat longitudinal (*stringer*). Di dekat *stringer*, sudut pengikat *ribs* dipasang pada penutup sayap. Terdapat penutup sayap atas dan bawah yang terhubung dengan *ribs* dan *spar*. Pada A350, komponen utama seperti *spar* dan *shell* terbuat dari CFRP, sementara *ribs* menggunakan material logam. Selain itu, *flap* eksternal, *aileron*, *spoilers*, *flap track beams*, dan *fairing* juga dibuat dari CFRP (Engels, 2014).



**Gambar 7.** Bagian dalam Struktur Wing Box (Engels, 2014)

#### Pengaruh CFRP terhadap Performa Aerodinamis

Peningkatan performa aerodinamis pesawat dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar pesawat. Indikator utama dari untuk meningkatkan performa aerodinamis adalah meningkatkan rasio *lift-to-drag* (L/D) (Kretov & Tiniakov, 2022). *Drag* didefinisikan sebagai komponen yang diciptakan oleh perbedaan tekanan antara bagian atas dan pengangkatan (pesawat). Apabila terdapat kondisi saat kecepatan, ketinggian, dan kontrol lift udara saat penerbangan, maka perlu

dilakukan konfigurasi ulang sudut serang pesawat atau mengubah bentuk perangkat *lift*. Persamaan lift dari pesawat terbang dalam keadaan bebas, adalah sebagai berikut (Afifah *et al*, 2023).

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (1)$$

Di mana:

- $C_L$  : koefisien lift
- $\rho$  : kerapatan udara
- $V$  : kecepatan udara aktual
- $S$  : daya angkat pada permukaan pesawat

Koefisien aerodinamis  $C_L$  dan  $C_D$  dapat dirumuskan sebagai berikut (Afifah *et al*, 2023).

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2 \quad (2)$$

Kemudian koefisien  $k$  ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$k = \frac{1}{A \pi e} \quad (3)$$

Di mana:

- $k$  : koefisien drag yang diinduksi lift
- $C_{D0}$  : koefisien drag nol
- $A$  : rasio aspek sayap (luas dibagi rata-rata akord)
- $e$  : faktor Oswald, berkisar antara 0.70-0.90

$C_L$  memiliki koefisien yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$C_L = \frac{mg}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (4)$$

Sehingga, Drag yang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (5)$$

Optimasi desain sayap dapat melalui peningkatan nilai rasio aspek ( $A$ ). Nilai  $A$  sangat mempengaruhi nilai  $e$ , sehingga dapat memastikan pengurangan nilai  $C_D$  dengan pengurangan hambatan induksi (*induced drag*). Hal ini dapat meningkatkan performa aerodinamis. Penggunaan CFRP pada struktur pesawat dapat meningkatkan rasio aspek ( $A$ ). Rasio aspek Boeing 787 adalah  $A = 11$  dan untuk Airbus A350 adalah  $A = 9$  (Kretov & Tiniakov, 2022). Koefisien drag zero-lift secara langsung memengaruhi besarnya rasio  $L/D$  (*lift-to-drag*) yang dapat dicapai oleh pesawat. Sehingga perkiraan nilai dari  $(L/D)_{\max}$  bergantung pada perkiraan  $C_{D0}$  (Sforza, 2018). Peningkatan rasio aspek ini dapat mengurangi hambatan aerodinamis pada sayap. Selain itu, pemanfaatan CFRP dapat mencegah penambahan massa struktur akibat peningkatan rasio aspek karena strukturnya yang lebih ringan (Kretov & Tiniakov, 2022).

### Pengaruh CFRP terhadap Struktural Sayap Pesawat

Sayap pesawat umumnya dirancang agar mencapai performa aerodinamis optimal pada satu kondisi tertentu dalam envelope penerbangan (Nguyen *et al*, 2017). Struktur sayap dengan CFRP terbukti mampu memberikan pengurangan berat yang signifikan. Pada Boeing 787 Dreamliners, struktur dengan CFRP membuat sayap lebih fleksibel, yang menyebabkan deformasi ujung sayap selama penerbangan bertambah hingga sekitar 10% dari panjang *semispan*. Fleksibilitas sayap yang tinggi ini berpotensi meningkatkan kenyamanan penumpang, misalnya saat terjadi hembusan angin atau turbulensi, serta mengurangi tekanan pada rangka pesawat melalui pengurangan beban secara pasif. Fleksibilitas sayap dapat dicapai dengan peningkatan rasio aspek sebagai upaya meningkatkan kinerja aerodinamis (Zimmer *et al*, 2022).

Penggunaan CFRP pada Boeing 787 Dreamliners berhasil mencapai keseimbangan antara kekuatan, ketahanan, dan pengurangan berat pesawat. Penggunaan material komposit pada struktur sayap memungkinkan rasio aspek yang lebih tinggi, yang menghasilkan efisiensi aerodinamis yang lebih baik dan peningkatan performa (Duarte, 2017). CFRP memiliki ketahanan yang tinggi terhadap korosi dan *fatigue*, sehingga secara signifikan menurunkan kebutuhan untuk perawatan. Komponen CFRP pada B787 Dreamliner lebih tahan terhadap kerusakan akibat faktor lingkungan, yang pada akhirnya membantu mengurangi biaya operasional selama masa pakai pesawat (Al-Mamun *et al*, 2024).

Penggunaan CFRP pada Airbus A350 juga menampilkan hasil yang signifikan yaitu penghematan berat pesawat hingga lebih dari 2,5 ton (Engels, 2014). Sayap Airbus A350 dengan CFRP memiliki rentang sayap sepanjang 32meter (105 *feet*). Sayap pesawat dikonstruksi sehingga desain aerodinamis optimal. Penggunaan CFRP pada sayap pesawat membuat rasio aspek yang lebih optimal serta meningkatkan efisiensi aerodinamis. Sehingga dapat mengurangi hambatan udara dan meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar (Al-Mamun *et al*, 2017).

### Keterbatasan Penggunaan CFRP pada Pesawat

CFRP memiliki keterbatasan jika diaplikasikan pada pesawat. Keterbatasannya yaitu penurunan kekuatan CFRP yang disebabkan oleh adanya cacat pada material tersebut. Cacat-cacat ini dapat terjadi akibat proses manufaktur seperti delaminasi, porositas, dan inklusi (Wijaya *et al*, 2024). Delaminasi dalam CFRP merupakan pemisahan antar lapisan (Setiawan *et al*, 2020). Porositas merujuk pada ruang-ruang kecil dalam matriks yang bisa terbentuk akibat pengaturan curing yang tidak tepat atau suboptimal, seperti durasi, tekanan, atau penggunaan vakum dalam pengisian resin (Wijaya *et al*, 2024). Lalu, inklusi merujuk pada keberadaan material asing yang terperangkap dalam CFRP selama proses produksi, yang dapat menjadi titik awal terjadinya kerusakan atau retakan (Zarei *et al*, 2022). Oleh karena itu, untuk memastikan keandalan CFRP, diperlukan optimalisasi proses manufaktur melalui penerapan teknologi canggih seperti resin transfer molding (RTM) dan in-situ monitoring, yang mampu meminimalkan cacat serta meningkatkan kualitas material secara keseluruhan.

Meskipun CFRP memiliki keunggulan dalam hal kekuatan dan bobot, cacat-cacat yang teridentifikasi dapat mengurangi potensi maksimal material ini dalam aplikasi pesawat terbang. Sebagai contoh, cacat delaminasi pada pesawat yang beroperasi di lingkungan dengan fluktuasi



beban dinamis yang tinggi, seperti saat penerbangan atau saat pendaratan dapat menyebabkan dampak yang serius. Kekuatan interlaminar yang rendah pada material komposit ini dapat menyebabkan kegagalan struktural yang tidak terduga jika tidak terdeteksi sejak dini. Selain itu, dalam kondisi porositas, uji ketahanan material terhadap siklus suhu ekstrem dan kelembaban perlu dilakukan untuk memastikan bahwa komposit tidak mengalami penurunan performa seiring waktu. Kondisi lain seperti inklusi, yang merupakan cacat yang lebih sulit terdeteksi juga dapat berpotensi berbahaya karena sering kali tidak terdeteksi pada tahap inspeksi awal. Oleh karena itu, penggunaan teknologi seperti *resin transfer molding* (RTM) yang lebih terkontrol dan efisien dalam proses pengisian resin dapat membantu mengurangi kemungkinan terbentuknya inklusi dalam struktur CFRP. Teknologi RTM dapat mengontrol konsistensi material dan distribusi serat karbon, sehingga mengurangi potensi cacat internal yang tidak terlihat. Penerapan *in-situ* monitoring dan penggunaan sensor berbasis nanoteknologi juga dapat dilakukan untuk mengetahui gambaran yang lebih akurat tentang kondisi material dalam jangka panjang.

Dengan demikian, meskipun kendala dalam penggunaan CFRP pada pesawat terbang cukup besar, kemajuan dalam teknologi manufaktur dan deteksi cacat dapat mengurangi risiko-risiko tersebut dan memperpanjang umur pakai material ini di industri penerbangan. Penerapan CFRP pada pesawat tetap memiliki prospek yang sangat positif dalam meningkatkan efisiensi dan performa struktural.

## SIMPULAN

Dengan koefisien muai termal yang rendah, CFRP menjaga stabilitas dimensi meskipun terkena suhu ekstrem, yang sangat penting dalam penerbangan. Selain itu, kekuatan fatik CFRP yang tinggi memungkinkannya menahan beban berulang, ideal untuk komponen pesawat yang mengalami siklus beban terus-menerus. Konduktivitas termalnya juga unggul, membantu menjaga suhu struktur lebih stabil.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, A., Arifin, M., dan Agustian, E. S. (2023). Analisis pengaruh variasi kecepatan terbang pada biaya operasional berdasarkan konsumsi bahan bakar dan jam terbang pada pesawat boeing 737-800 dengan Rute CGK-UPG. *Jurnal Mahasiswa Dirgantara*, 2(1), 1-14.
- Al-Lami, A., Hilmer, P., dan Sinapius, M. (2018). Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry. *Aerospace Science and Technology*, 79, 669-678.
- Al-Mamun A.M., Hossain M.R., Iqbal M.A., Haque, M. Z., dan Sharmin, M.M. (2024). Recent developments in the synthesis of composite materials for aerospace: case study. *Material Sci & Eng. 2024*, 8(3), 109-116.
- Aly, N. M. (2017). A review on utilization of textile composites in transportation towards sustainability. Dalam *IOP conference series: materials science and engineering* (hlm. 042002). DOI 10.1088/1757-899X/254/4/042002.
- Bachmann, J., Hidalgo, C., dan Bricout, S. (2017). Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review. *Science China Technological Sciences*, 60:1301-1317.
- Dababneh, O., dan Kipouros, T. (2018). A review of aircraft wing mass estimation methods. *Aerospace Science and Technology*, 72:256-266.



- Duarte, E.J. (2024). Study of the Boeing 787-8 structure and reproduction of a 1: 80 scale model [Skripsi]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Engels, A. (2014). Development of a smart production line for large CFRP box structures. [Disertasi]. RMIT University.
- Garmann, D. J., & Visbal, M. R. (2014). Dynamics of revolving wings for various aspect ratios. *Journal of Fluid Mechanics*, 748:932-956.
- Ghobadi, A. (2017). Common type of damages in composites and their inspections. *World Journal of Mechanics*, 7(2):24-33.
- Gopal, K. V. N. (2016). Product design for advanced composite materials in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, 413-428.
- Hanna, C., Iryna, I., & Mykhailo, T. (2023). Use Of Composite Materials In Civil Aviation. *New Integrations Of Modern Education In Universities*, 310.
- Kesarwani, S. (2017). Polymer composites in aviation sector. *Int. J. Eng. Res*, 6(10).
- Kretov, A., & Tiniakov, D. (2022). Evaluation of the mass and aerodynamic efficiency of a high aspect ratio wing for prospective passenger aircraft. *Aerospace*, 9(9), 497.
- Long, G., Sun, Y., Shang, Z., Wang, X., Xu, X., & Wang, T. (2024). Aerodynamic performance and wind-induced response of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) cables. *Scientific Reports*, 14(1), 8154.
- Mitsubishi Heavy Industries (MHI). (2014). Production technology of large-scale composite wings for commercial aircraft. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 51(4).
- Nguyen, N. T., Ting, E., Chaparro, D., Drew, M. C., & Swei, S. S. M. (2017). Multi-objective flight control for drag minimization and load alleviation of high-aspect ratio flexible wing aircraft. Dalam *58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference* (p. 1589).
- Ozkan, D., Gok, M. S., & Karaoglanli, A. C. (2020). Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes*, 235-253.
- Pio, I. H. P., da Vera, N. O., & da Luz, F. (2022). Composites: A Recurrent and Simultaneously Current Innovation in the Aeronautics and Automobiles Sectors. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 86(1), 27-38.
- Setiawan, D. B., Hidayat, M. I. P., & Widyastuti, W. (2020). Simulasi Delaminasi pada Komposit Glass Fiber-reinforced Polymer (GFRP) dan Carbon Fiber-reinforced Polymer Menggunakan Metode Cohesive Zone Model (CZM) dan Virtual Crack Closure Technique (VCCT). *Jurnal Teknik ITS*, 9(1), B1-B6.
- Sforza, P. M. (2018). Estimating Zero-Lift Drag Coefficients and Maximum L/D in Subsonic Flight. *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*. doi:10.2514/6.2018-0273
- Song, T., Li, Y., Song, J., & Zhang, Z. (2014). Airworthiness considerations of supply chain management from Boeing 787 Dreamliner battery issue. *Procedia Engineering*, 80, 628-637.
- Taylor, D., & Procter, M. (2010). The literature review: A few tips on conducting it. *University of Toronto Writing Center*. <https://advice.writing.utoronto.ca/types-of-writing/literature-review/>
- Wijaya, Y. G., Suprijanto, S., Nugroho, A., Hijazi, R., & Adhika, D. R. (2024). Deteksi cacat pada karbon fiber reinforced polymer berdasarkan koefisien korelasi pearson dari sinyal echo ultrasonik. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 9(2), 153-166.
- Zarei, A., Farahani, S., & Pilla, S. (2022). An experimental study on the manufacturing of engineered defects in composite plates. *Composites Part C: Open Access*, 9, 100327.
- Zimmer, M., Feldwisch, J. M., & Ritter, M. R. (2022). Coupled CFD-CSM Analyses of a Highly Flexible Transport Aircraft by Means of Geometrically Nonlinear Methods. In *19th International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics* (hlm. 1-20), IFASD 2022.