

DOI: doi.org/10.21009/03.1101.FA19

# PENERAPAN PADUAN BAHAN PARAMAGNETIK ALUMINIUM-LITIUM (AL-LI ALLOY) GENERASI KETIGA SEBAGAI BAHAN BAKU STRUKTURAL SAYAP PESAWAT TERBANG: SEBUAH KAJIAN

Shallu Fidhah Ariyanti, Michael Setiyanto Silambi, Febrian Zulmi, Umiatin<sup>a)</sup>

*Program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta 13220, Indonesia*

Email: <sup>a)</sup>umiatin@unj.ac.id

## Abstrak

Bahan paramagnetik adalah bahan yang memiliki magnetisasi sejajar dengan medan magnetnya. Material yang termasuk ke dalam paramagnetik adalah Aluminium dan Litium. Aluminium dapat dipadukan dengan unsur-unsur logam lain, yakni dengan Cuprum, Litium, Magnesium, dan lain-lain. Paduan aluminium mempunyai konduktivitas listrik dan panas yang tinggi serta tahan korosi. Di dalam industri dirgantara, paduan Aluminium-Litium banyak digunakan sebagai penyusun struktur pesawat terbang. Komponen utama pada pesawat terbang yang paling kompleks dan berfungsi untuk menghasilkan gaya aerodinamika dengan memanfaatkan perbedaan tekanan udara dari bagian atas dan bawah strukturnya adalah sayap pesawat. Struktur sayap pesawat membutuhkan bahan yang bersifat elastis, tensile, memiliki ketahanan tinggi, tahan korosi, dan toleransi kerusakan. Tulisan ini merupakan suatu kajian naratif berdasarkan jurnal nasional dan internasional yang bertujuan untuk memberikan informasi mengenai karakteristik dan penerapan paduan Al-Li generasi ketiga sebagai bahan baku struktural sayap pesawat terbang. Hasil kajian menunjukkan bahwa pengembangan paduan Al-Li generasi ketiga berpotensi untuk digunakan pada struktur kerangka sayap pesawat terbang dikarenakan paduan Al-Li memiliki massa jenis yang relatif rendah, modulus spesifik tinggi, tahan korosi, dan tahan retak fatik, dimana sesuai dengan syarat yang dibutuhkan oleh kerangka sayap pesawat terbang.

**Kata-kata kunci:** Bahan paramagnetik, Paduan Aluminium-Litium, Struktur sayap pesawat

## Abstract

Paramagnetic materials are materials that have a magnetization parallel to their magnetic field. Materials that are classified as paramagnetic are Aluminum and Lithium. Aluminum can be combined with other metal elements, e.g. Cuprum, Lithium, Magnesium, etc. Aluminum alloys have high electrical and thermal conductivity, and corrosion-resistant. In the aerospace industry, Aluminum-Lithium alloys are widely used as a constituent of aircraft structures. The main component with the most complex aircraft and generates aerodynamic forces by utilizing the difference in air pressure from the top and bottom of the structures is the wing of the aircraft. The aircraft wing structure requires materials that are elastic, tensile, high resistance, corrosion resistance, and damage tolerance. This paper is a narrative study based on national and international journals that aims to provide information on the characteristics and application of third-generation Al-Li alloys as structural raw materials for aircraft wings. The results of the study show that the development of the third generation Al-Li alloys has the potential to be used in aircraft wing component structures because the Al-Li alloys has a relatively lower density, high specific modulus, corrosion resistance, and fatigue crack growth resistance, which is accordance with the required requirements of airplane wing structures.

**Keywords:** Paramagnetic materials, Aluminium-Lithium Alloy, Aircraft wing structure

## PENDAHULUAN

Industri dirgantara adalah industri penerbangan yang menunjang, membangun, dan manufaktur suku cadang pesawat terbang. Hingga saat ini, industri dirgantara dikategorikan sebagai industri berteknologi tinggi [1]. Pesawat terbang merupakan alat transportasi di udara yang digunakan sebagai sarana transportasi publik, logistik, dan militer. Hal ini dikarenakan pesawat terbang merupakan transportasi yang efisien terhadap waktu [2]. Komponen utama pada pesawat terbang yang paling kompleks dan berfungsi untuk menghasilkan gaya aerodinamika adalah sayap. Desain sayap pada pesawat terbang penting bagi efisiensi pesawat karena memengaruhi nilai koefisien gaya angkat dan gaya hambat yang berkaitan dengan kebutuhan bahan bakar pesawat [3]. Sayap pesawat terbang mendapatkan gaya angkat (*lift*) dari perbedaan tekanan permukaan atas dan bawahnya ketika tekanan bagian atas sayap lebih kecil daripada bagian bawah [4].

Berdasarkan hukum Bernoulli, sumber gaya angkat pesawat juga dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara, dimana ketika kecepatan udara di bagian sayap bawah lebih besar daripada permukaannya, maka akan timbul gaya angkat pesawat [5]. Untuk menjaga pesawat agar tetap berada dalam posisi seimbang, besar gaya angkat pesawat harus sama dengan berat total pesawat [6]. Struktur sayap pesawat terbang tersusun oleh *stringer*, *spar*, *rib*, dan *skin* [7]. Perancangan struktur sayap pesawat wajib memerhatikan proporsi berat dan kekuatan strukturnya. Struktur yang dibuat harus memiliki kekuatan maksimal dengan berat ringan mungkin serta memenuhi faktor keamanan (*safety factor*) [8]. Sifat kekuatan ini juga harus mampu menahan semua beban yang timbul pada berbagai kondisi, seperti ketika *take-off* dan *landing* [9]. Berdasarkan tempat pengoperasiannya, pesawat terbang membutuhkan material yang memiliki efisiensi tinggi bagi bahan bakar dan performanya, bersifat fatik, tahan korosi terhadap perubahan suhu dan cuaca, serta mampu mengurangi berat pesawat agar lebih ringan [10].

Paduan Aluminium seri 2000 dan 7000 merupakan paduan yang banyak digunakan dengan konsumsi sekitar 80% dari bobot pesawat. Jenis paduan 2000 digunakan untuk bagian yang tahan terhadap kerusakan, seperti *skin* sayap bawah yang membutuhkan ketahanan fatik tinggi [11, 12]. Pengembangan paduan Aluminium terus berlanjut dari pertengahan tahun 1970 hingga saat ini dan telah menghasilkan paduan Aluminium-Litium generasi ketiga [13]. Penambahan Litium ke dalam Aluminium menambahkan 1% berat Litium, meningkatkan modulus elastisitas 6%. dan mengurangi densitas sekitar 3% [14]. Constellium mengembangkan paduan Al-Li generasi ketiga berdensitas rendah yang memenuhi persyaratan untuk semua bagian utama pesawat, yakni *skin* sayap atas, *skin* sayap bawah, badan pesawat, *spar*, *rib*, dan *stringer* [15]. Selain densitas yang rendah, paduan Al-Li generasi ketiga memberikan kekakuan spesifik yang 8-15% lebih tinggi daripada paduan aluminium konvensional sehingga dapat mengurangi berat dan jumlah bagian pesawat [16].

Pesawat	Aluminium	Baja	Titanium	PMCs	Lain-lain
Boeing 747	81 wt.%	13 wt.%	4 wt.%	1 wt.%	1 wt.%
Boeing 757	78 wt.%	12 wt.%	6 wt.%	3 wt.%	1 wt.%
Boeing 767	80 wt.%	14 wt.%	2 wt.%	3 wt.%	1 wt.%
Boeing 777	70 wt.%	11 wt.%	7 wt.%	11 wt.%	1 wt.%
Boeing 787	20 wt.%	10 wt.%	15 wt.%	50 wt.%	5 wt.%
DC-10	78 wt.%	14 wt.%	5 wt.%	1 wt.%	2 wt.%
MD-11	76 wt.%	9 wt.%	5 wt.%	8 wt.%	2 wt.%
MD-12	70 wt.%	8 wt.%	4 wt.%	16 wt.%	2 wt.%
Airbus A380	61 wt.%	10 wt.%		22 wt.%	7 wt.%
Airbus A350	20 wt.%	7 wt.%	14 wt.%	52 wt.%	7 wt.%

GAMBAR 1. Bahan yang digunakan pada pesawat terbang [12]

Paduan Al-Li generasi ketiga merupakan paduan yang menjanjikan untuk komponen pesawat terbang, karena mempunyai sifat mekanik yang solutif seperti densitas yang lebih rendah, kekakuan

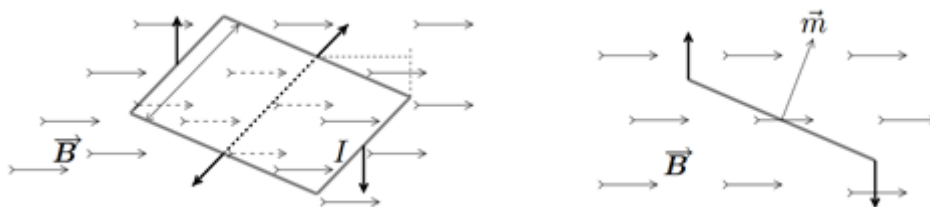
dan kekuatan spesifik yang lebih tinggi, dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan dengan paduan aluminium konvensional (seri 2000 dan 7000) [11, 17]. Oleh karena itu, dalam kajian ini akan dibahas secara komprehensif mengenai efektivitas bahan paduan Aluminium-Lithium (*Al-Li alloy*) generasi ketiga sebagai bahan baku struktural sayap pesawat terbang.

## METODOLOGI

Kajian ini menggunakan metode studi literatur atau tinjauan pustaka dengan mengumpulkan sumber yang relevan dan telah dipublikasikan di berbagai jurnal ilmiah nasional dan internasional. Pengumpulan kajian literatur menggunakan alat pencarian basis data *google scholar*, *IOP Science*, *Springer*, *Scopus*, dan buku elektronik. Berdasarkan basis data jurnal nasional diperoleh 4466 artikel dari tahun 2012 - 2022 dengan menggunakan kata kunci sebagai berikut: bahan paramagnetik, paduan Al-Li, struktur sayap pesawat, dan paduan Al-Li pada struktur sayap pesawat. Sedangkan pada jurnal internasional digunakan kata kunci: *paramagnetic materials*, *Al-Li alloy*, *aircraft wing structure*, dan *Al-Li alloys for wings aircraft structure* diperoleh sebanyak 181.503 artikel. Selain itu, kajian berdasarkan buku elektronik dilakukan dengan menggunakan buku-buku yang berisi pembahasan teori bahan paramagnetik, struktur sayap pesawat terbang, dan paduan Aluminium-Litium. Selanjutnya artikel dan buku-buku elektronik disaring, dengan hasil penyaringan diperoleh 14 artikel nasional, 15 artikel internasional, dan 11 buku elektronik yang mencakup teori, karakteristik, dan penerapan bahan paramagnetik, paduan Al-Li generasi ketiga, struktur sayap pesawat dan syarat kemampuan bahan penyusunnya, dan efektivitas paduan Al-Li pada struktur pesawat terbang.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan paramagnetik adalah bahan yang magnetisasinya sejajar dengan medan magnet  $B$ . Bahan paramagnetik memiliki nilai magnetisme yang kecil namun positif. Magnetisme ini dihasilkan dari keberadaan atom atau ion yang memiliki momen magnet permanen [18]. Dalam bahan paramagnetik, beberapa atom atau ion mempunyai net magnetic momen yang disebabkan oleh sebagian elektron yang tidak berpasangan [19]. Momen-momen ini berinteraksi secara lemah satu sama lain dan berorientasi secara acak di dalam medan magnet eksternal. Ketika sebuah bahan paramagnetik ditempatkan di dalam medan magnet eksternal, momen atomnya akan sejajar dengan medan magnetnya [20].



GAMBAR 2. Arah medan magnet paramagnetik [21]

Material yang termasuk dalam bahan paramagnetik adalah logam transisi dan ion logam tanah jarang (rare-earth ions) [22]. Suseptibilitas magnet dari bahan paramagnetik adalah positif dan berada dalam rentang  $10^{-5}$  sampai  $10^{-3}$ , sedangkan permeabilitasnya adalah  $\mu > \mu_0$  [21].

TABEL 1. Suseptibilitas bahan paramagnetik [18]

Bahan Paramagnetik	Suseptibilitas
Oksigen	$1,9 \times 10^{-6}$
Sodium	$8,5 \times 10^{-6}$
Aluminium	$2,1 \times 10^{-5}$
Tungsten	$7,8 \times 10^{-5}$
Platinum	$2,8 \times 10^{-4}$
Oksigen Cair (-200°)	$3,9 \times 10^{-3}$

Bahan Paramagnetik	Suseptibilitas
Gadolinium	$4,8 \times 10^{-1}$

### Jenis-jenis, Karakteristik, dan Penerapan Bahan Paramagnetik

#### *Aluminium*

Aluminium merupakan jenis logam yang berjumlah sekitar 8% dari permukaan bumi dan paling berlimpah ketiga [23]. Aluminium memiliki karakteristik ductile yang baik, tahan terhadap korosi, memiliki kemampuan cor yang baik, dan harga terjangkau [13]. Aluminium merupakan konduktor yang baik untuk listrik dan panas. Dapat ditempa menjadi lembaran, ditarik menjadi kawat, dan diekstrusi menjadi batangan dengan bermacam-macam penampang [24].

#### *Litium*

Litium merupakan logam alkali lunak berwarna putih keperakan. Di bawah kondisi standar, Litium menjadi logam sekaligus unsur padat yang paling ringan [25]. Densitas Litium sebesar  $0,534\text{g/cm}^3$ , Konstanta kisi  $a = 0,35023\text{ nm}$ , struktur kubik berpusat pada badan, dan plastisitas tinggi [26]. Litium umumnya ditemukan sebagai bahan baku pada baterai litium ion yang digunakan pada beberapa elektronik [27].

#### *Tembaga*

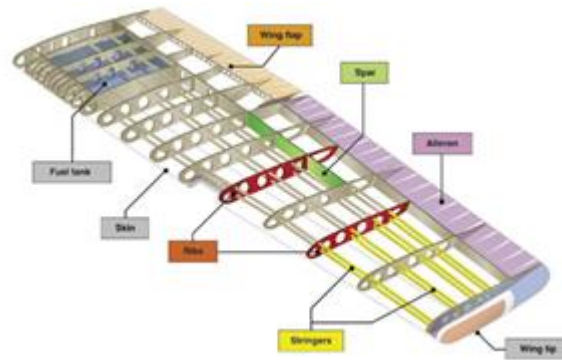
Tembaga merupakan logam non feromagnetik yang banyak digunakan sebagai paduan. Tembaga mempunyai konduktivitas termal dan elektrik yang baik, relatif lunak, mudah ditempa, dan mempunyai laju korosi yang lambat [4]. Tembaga memiliki sifat penghantar listrik dan panas yang tinggi, keuletan yang tinggi dan sifat ketahanan korosi yang baik. Produksi tembaga sebagian besar dipakai sebagai kawat atau bahan sebagai penghantar panas dan listrik yang baik. Tembaga umumnya digunakan dalam bentuk paduan karena dapat dengan mudah membentuk paduan dengan logam-logam lain diantaranya dengan logam Pb dan Sn [28].

#### *Tungsten*

Tungsten atau wolfram merupakan golongan unsur transisi (golongan VIB) dengan simbol W dan nomor atom 74. Wolfram digunakan sebagai lampu pada spektrofotometri tidak terlepas dari sifatnya yang memiliki titik didih yang sangat tinggi yakni  $5930\text{ }^\circ\text{C}$  [29].

### Struktur Sayap Pesawat Terbang

Fungsi dasar dari struktur pesawat adalah untuk memberikan bentuk yang aerodinamis dan melindungi penumpang, muatan, sistem, dll. dari kondisi lingkungan selama penerbangan [7]. Sayap atau airfoil merupakan bagian pengangkat utama yang menopang pesawat untuk terbang [30]. Sayap pesawat berfungsi untuk menghasilkan gaya angkat (*lift*) jika tekanan rata-rata di bawah permukaan lebih besar daripada permukaan atasnya dan kecepatan udara di bagian bawah lebih kecil daripada kecepatan udara di bagian atas [31]. Sayap pesawat tersusun oleh struktur penting di dalamnya, yakni struktur internal (*stringers*, *spar*, dan *ribs*) dan eksternal (*skin*) [32].



GAMBAR 3. Struktur sayap pesawat [33]

#### *Stringer*

Di banyak pesawat, balok struktural, seperti sayap, memiliki *stringer* yang luas penampangnya bervariasi dalam arah bentang [7]. *Stringer* berfungsi meningkatkan tegangan tekuk pada permukaan dengan membagi permukaan menjadi panel yang lebih kecil [34]. Selain itu, *stringer* juga berfungsi untuk tempat melekatnya *skin*. *Stringer* memiliki 52 penegar dengan 26 buah pada masing-masing sisinya (kanan dan kiri). Terdapat 4 jenis *stringer*, yaitu *stringer* tipe I, II, III, dan IV [down 16].

#### *Spar*

*Spar* merupakan balok sepanjang rentang sayap yang dapat menahan lentur. Konfigurasi struktur *spar* terdiri dari bagian depan dan belakang. *Spar* depan dipasangkan bilah tepi depan, dan *spar* belakang dipasangkan permukaan kontrol seperti flap, aileron, dan spoiler [31, 34]. Fungsi flap adalah untuk mengendalikan laju udara yang mengalir melalui sayap pesawat dan untuk menambah gaya angkat saat lepas landas (*take-off*) dan menambah gaya angkat dan hambat saat mendarat (*landing*) [35]. Ketika pesawat terbang bergerak secara berguling (*roll*), maka akan dikendalikan oleh aileron [36]. Di samping itu, spoiler atau *lift damper* merupakan bidang kontrol sekunder yang berfungsi membantu kendali primer atau mengatur pergerakan pesawat dalam bermanuver [37].

#### *Rib*

*Rib* adalah kerangka melintang yang dapat meningkatkan tegangan tekuk permukaan, mendistribusikan tegangan pada struktur, serta menopang bentuk airfoil [34]. Selain itu, *rib* juga berperan untuk menerima beban momen, memberi kekuatan dan rigid, serta tempat pemasangan struktur komponen lainnya [38]. *Rib* disusun ke dalam tiga bagian dari lembaran logam dengan pengepresan dan cetakan karet yang memiliki flensa di sekitar tepinya sehingga dapat menempel pada *skin* dan jaring *spar* [7].

#### *Skin*

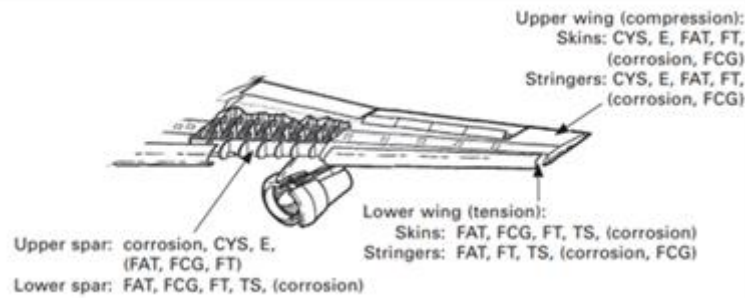
*Skin* digunakan sebagai penutup sayap atau penutup dari semua *rib*, *spar*, dan *stringer* guna membentuk *fuselage* sayap pesawat yang *streamline*. *Skin* juga berfungsi untuk membuat aerodinamika pesawat berada dalam keadaan baik [16].

### Syarat Kemampuan Bahan

Terdapat berbagai desain, ukuran, dan bentuk sayap yang digunakan oleh produsen pesawat terbang. Masing-masing memenuhi kebutuhan tertentu sehubungan dengan kinerja yang diharapkan [33]. Bentuk konfigurasi sayap yang berbeda-beda dapat berupa sayap persegi panjang, sayap runcing, sayap elips, sayap runcing terbalik, sayap runcing majemuk, dan sayap delta [30]. Struktur sayap

pesawat harus dibangun sedemikian rupa untuk mempertahankan bentuk aerodinamisnya di bawah tekanan ekstrim dan pemuatan sayap sehingga membutuhkan bahan yang bersifat elastis, tensile, memiliki ketahanan tinggi, tahan korosi, dan toleransi kerusakan [35].

Bahan paduan yang digunakan dalam industri dirgantara tidak hanya membutuhkan ketahanan dan kekuatan tinggi, tetapi juga plastisitas yang sangat baik, ketangguhan retak, dan fatik [39]. Pada pesawat komersial, ketika penerbangan normal sayap melentur sekitar  $0 - 7^\circ$  dan saat turbulensi berat, sayap melentur sekitar  $10^\circ$ . Maka dari itu, struktur sayap juga harus cukup kaku dan sedikit lentur agar tidak terlepas dari beban [34].



GAMBAR 4. Syarat kemampuan bahan untuk sayap pesawat terbang [12]

Keterangan:

Corrosion = Korosi

CYS = Compressive Yield Strength

E = Modulus

FAT = Fatik atau *Fatigue*

( ) = Penting, Syarat desain

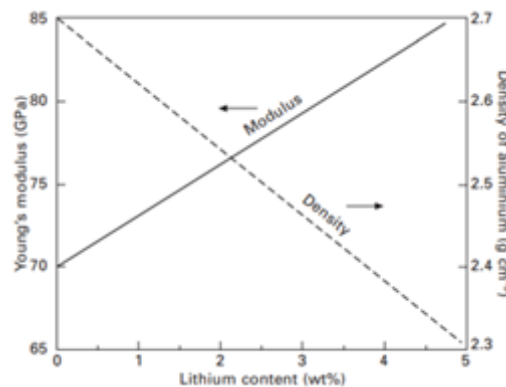
FCG = Pertumbuhan retak fatik atau *Fracture Crack Growth*

FT = Ketahanan patah atau *Fracture Toughness*

Berdasarkan GAMBAR 4, sayap pesawat membutuhkan bahan yang memiliki kekuatan fatik tinggi untuk menahan kerusakan dan kegagalan dari beban yang berfluktuasi karena manuver penerbangan, turbulensi, dan hembusan angin [12]. Kekuatan spesifik  $E/\rho$  penting untuk permukaan sayap bawah pesawat (*spar* dan *rib*). *Rib* membutuhkan sifat kekuatan statis yang tinggi (kekuatan tarik, tekan, dan modulus), tahan korosi, toleransi fatik, dan toleransi kerusakan. Resistansi tekuk spesifik  $E^{(1/3)}/\rho$  penting untuk permukaan atas pesawat [7].

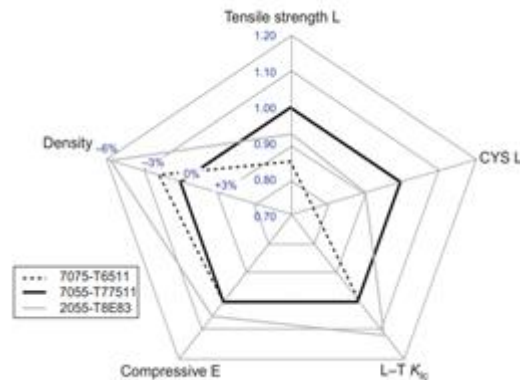
#### Paduan Al-Li Generasi Ketiga pada Struktur Sayap Pesawat Terbang

Unsur litium merupakan unsur yang penting, namun bukan yang utama pada paduan 2000 yang digunakan di berbagai pesawat terbang, seperti 2020 Al, 2090 Al and 2091 Al [12].



GAMBAR 5. Efek penambahan kandungan litium bagi densitas dan modulus Young pada aluminium [12]

Berdasarkan GAMBAR 5, besar kepadatan berkurang 3% sedangkan modulus meningkat 5% untuk setiap 1% penambahan lithium. Ini menunjukkan bahwa litium pada konsentrasi yang rendah dapat memberikan penghematan berat yang signifikan bagi struktur aluminium yang besar. Penggabungan paduan Al-Li, memiliki kepadatan berkisar antara 2,63 hingga 2,72 g/cc (0,095–0,098 lbs/in.<sup>3</sup>). Selain itu, paduan Al-Li secara umum memiliki syarat fatik yang lebih baik daripada aluminium konvensional [13]. Pada sayap pesawat terbang, paduan Al-Li 2050-T84 dipakai untuk bahan yang membutuhkan toleransi kerusakan serta kekuatan sedang hingga tinggi. Paduan ini menggantikan jenis paduan konvensional, seperti AA2024-T351, AA7150-T7751, dan AA7050-T7451 yang masing-masing digunakan pada bagian *spar*, *rib*, dan struktur internal lainnya [40].



**GAMBAR 6.** Perbandingan kemampuan bahan paduan Al-Li dengan paduan konvensional [13]

Bagan laba-laba membandingkan paduan ekstrusi Al Li 2055-T8E83 dengan dua paduan ekstrusi 7XXX kekuatan tinggi konvensional. 2055-T8E83 umumnya lebih unggul dari paduan 7075 T6511 yang lebih konvensional. Jika dibandingkan dengan 7055-T7751, modulus elastisitas tekan lebih tinggi, ketangguhan patah lebih tinggi, dan kepadatan lebih rendah dari paduan 2055 digabungkan dengan kekuatan tarik dan kekuatan luluh tekan yang lebih rendah [41]. Namun, karena kemampuan bahan yang penting untuk stringer sayap atas adalah kekakuannya, maka paduan 2055-T8E83 - dengan kepadatan yang lebih rendah merupakan pilihan yang tepat [13]. Untuk paduan yang memiliki kemampuan dalam toleransi kerusakan dan kekuatan tinggi pada bagian stringer juga dapat menggunakan 2199-T8E79, 2099-T81, 2099-T83, 2076-T8511, 2055-T8E83, dan 2065-T8511 [12]. Selain itu, paduan 2199-T8E79 dan 2199-T8 dipakai di pesawat untuk stringer sayap dan penutup badan pesawat. Paduan ini berkaitan dengan sifat mekanik dan fisik yang unggul dalam kekuatan dan toleransi kerusakan jika dibandingkan dengan paduan lainnya [11]

#### *Keunggulan dan Kelemahan Paduan Al-Li Generasi Ketiga*

Paduan Al-Li generasi pertama dan kedua tidak memenuhi sebagian besar persyaratan manufaktur karena sifat mampu bentuk yang buruk dan ketangguhan patah, ketahanan korosi yang rendah, pembentukan rongga mikro, dan retakan mikro selama pemrosesan [14]. Keunggulan dari paduan Al-Li adalah mudah difabrikasi, ringan (kepadatan 2,7 g/cm<sup>-3</sup>), kekakuan dan kekuatan spesifik yang tinggi, dan kontrol ketemesinan yang baik [13]. Namun, kelemahannya terletak pada biaya manufaktur yang tinggi (jika dibandingkan dengan paduan aluminium konvensional), proses daur ulang dilakukan secara terpisah, dan bergantung pada *multistage* perawatan termomekanik [12].

### SIMPULAN

Dalam perancangannya, pemilihan bahan yang akan digunakan untuk struktur sayap pesawat merupakan hal yang penting. Paduan Al-Li generasi ketiga telah berhasil menyempurnakan paduan aluminium konvensional sebelumnya dan digunakan sebagai bahan utama untuk struktur sayap pesawat. Pada bagian stringer sayap atas dan bawah, digunakan paduan 2199-T8E79, 2099-T8, 2099-



T83, 2076-T8511, 2055-T8E83, dan 2065-T8511 untuk memenuhi syarat kemampuan bahan dalam toleransi kerusakan dan kekuatan tinggi. Selain itu, bagian *spar* dan *rib* menggunakan paduan jenis 2050-T84 yang memiliki kekuatan sedang. *Skin* sayap atas menggunakan paduan yang memiliki kekuatan tinggi seperti paduan 2050-T84, 2055-T8X, 2195-T82. Sedangkan untuk memenuhi syarat kemampuan bahan pada *skin* sayap bawah, digunakan paduan 2199-T86, 2050-T84, dan 2060-T8E86.

#### REFERENSI

- [1] Prastyawan, Ageng Dwi, "Dinamika Industri Pesawat Terbang Indonesia Tahun 1966-1998," *Avatara*, vol. 5, no. 1, pp. 1581-1594, 2017.
- [2] Wahyuni, Sri, "Analisis Terhadap Keselamatan Penumpang Pesawat Terbang yang Mengalami Pecah Ban Menurut Undang-Undang Perlindungan Konsumen," *Jurnal Hukum Sasana*, vol. 5, no. 2, 2019.
- [3] Syahrul Fahmi, Arsy, "Analisis Pengaruh Posisi Horizontal Stabilizer pada Nilai Koefisien Drag dan Lift dari Ekor Pesawat N-2xx Berbasis Computational Fluid Dynamics," *Dissertasi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [4] Hanif Ibrahim *et al.*, "Pengaruh Sudut Tekuk (Cant) Winglet Menggunakan Airfoil Naca 2215 pada Aerodinamika Sayap Pesawat," *ROTOR*, vol. 3, pp. 41-45, 2017.
- [5] M. M. Lubis, "Analisis Aerodinamika Airfoil NACA 2412 Pada Sayap Pesawat Model Tipe Glider dengan Menggunakan Software Berbasis Computational Fluid Dynamics untuk Memperoleh Gaya Angkat Maksimum," *e-Dinamis*, vol. 2, no. 2, pp. 23-33, 2012.
- [6] G. Yuvaraj, K. Veeranjanyulu, "Buoyancy lift augmentation," *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, vol. 5, no. 4, 2016.
- [7] T. H. G. Megson, "Aircraft Structures for Engineering Students," 6th. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [8] J. K. Joseph, "Design, Modal And Stress Analysis of Aircraft Composite Wing," *International Journal of Engineering Research & Technology (Ijert)*, 2015.
- [9] Handoko, Bayu, Abu Bakar, "Analisis Optimasi Tebal Rib Sayap Pesawat Wig in Ground Effect 2 Seat," *Jurnal Industri Elektro dan Penerbangan*, vol. 4, no. 2, pp. 41-50, 2014.
- [10] Marshall, M. Timothy, "Lithium as a Nutrient," *Journal of American Physicians and Surgeons*, vol. 20, no. 4, pp. 104-109, 2015.
- [11] T. Dursun, C. Soutis, "Recent developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 862-871, 2014.
- [12] Mouritz, P. Adrian, "Materials and Material Requirements for Aerospace Structures and Engines (3)," in *Introduction to Aerospace Materials*, First Edition, United Kingdom: Woodhead Publishing, 2012.
- [13] N. E. Prasad *et al.*, "Aerostructural Design and Its Application to Aluminum-Lithium Alloys," in *Aluminum-lithium alloys: Processing, properties and applications*, Amsterdam etc.: Elsevier/Butteworth-Heinemann, 2014.
- [14] R. J. Rioja, J. Liu, "The evolution of Al-Li Base products for aerospace and Space Applications," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43, no. 9, pp. 3325-3337, 2012.
- [15] A. Daniélou *et al.*, "Fatigue resistance of Al-Cu-Li and comparison with 7xxx aerospace alloys," *ICAA13 Pittsburgh*, pp. 511-516, 2012.
- [16] G. G. Setyoaji, H. Ismoyo, W. Achmad, "Analisa Statis Struktur Wing Box Pesawat Udara dengan Equivalent Plate Model," *Jurnal Teknik Mesin S-1*, vol. 4, no. 1, 2016.



- [17] A. A. El-Aty *et al.*, "Experimental investigation of tensile properties and anisotropy of 1420, 8090 and 2060 Al-Li alloys sheet undergoing different strain rates and fibre orientation: A comparative study," *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 13-18, 2017.
- [18] D. J. Griffiths, "Magnetic Fields in Matter," in *Introduction to Electrodynamics*, Harlow: Pearson Education, 2014.
- [19] Veryyon Harahap, "Pembuatan Material Komposit BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> /Zn) pada Bidang Radiologi," *Ahli Media Press*, Malang, 2021.
- [20] R. A. Serway, J. W. Jewett, V. Perroomian, "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics," Cengage learning, Australia, 2014.
- [21] P. F. Kelly, "Electricity and Magnetism," *CRC Press*, Boca Raton, 2015.
- [22] Omar Ali Muhammad, "Elementary solid state physics," *principles and applications*, Reading, MA: Addison-Wesley Publ. Co., 2015.
- [23] A. A. Aziz, Kiryanto, A. W. B. Santosa, "Analisa Kekuatan Tarik, Kekuatan Tekuk, Komposisi dan Cacat Pengecoran Paduan Aluminium Flat Bar dan Limbah Kampas Rem dengan Menggunakan Cetakan Pasir dan Cetakan Hidrolik sebagai Bahan Komponen Jendela Kapal," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [24] Sheller Mimi, "Aluminum Dream: The Making of Light Modernity," Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [25] M. Timothy, Marshall, "Lithium as a Nutrient," *Journal of American Physicians and Surgeons*, vol. 20, no. 4, 2015.
- [26] C. L. Zou, G. H. Geng, W. Y. Chen, "Development and application of aluminium-lithium alloy," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 599, pp. 12-17, 2014.
- [27] Cahyono *et al.*, "Pengujian Karakteristik Baterai Lithium-Ion Dengan Metode Fuzzy Dengan Beban Bervariasi," *Jurnal Arus Elektro Indonesia*, vol. 6, no. 3, pp. 82-86, 2020.
- [28] A. Amiruddin, F. A. Lubis, "Analisa Pengujian Lelah Material Tembaga dengan Menggunakan Rotary Bending Fatigue Machine," *Mekanik: Jurnal ilmiah Teknik Mesin*, vol. 4, no. 2, 2018.
- [29] Puput, Martabet, "Analisa Kandungan Polifenol Pada Pucuk Daun Teh Hasil Perkebunan Kemuning Menggunakan Metode Analisis Spektrofotometri Visible (Analyze The Content of Polyphenols Tea Leaves of Plantation of Kemuning Using Visible Spektrofotometri Analysis Method)," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 4, no. 10, 2017.
- [30] Ambri, Ramandeep Kaur, "Spars and Stringers-Function and Designing," *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, 2014.
- [31] M. A. Soler, "Fundamentals of Aerospace Engineering: An introductory course to aeronautical engineering," Madrid: Create Space, 2017.
- [32] Federal Aviation Administration (FAA), "Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge," Oklahoma: United States Department of Transportation, 2016.
- [33] Sofia Swedberg, Mats Svalstedt, "Commercial Aircraft Wing Structure: Design of a Carbon Fiber Composite Structure," *Skolan för teknikvetenskap (SCI)*, 2020.
- [34] Triawan Ramadhan, "Analisa Performansi Flap Pesawat N-2xx Terhadap Perubahan Gap dan Overlap di Pt. Dirgantara Indonesia," *Doctoral dissertation*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [35] S. F. Arsy, "Analisis Pengaruh Posisi Horizontal Stabilizer pada Nilai Koefisien Drag dan Lift dari Ekor Pesawat N-2xx Berbasis Computational Fluid Dynamics," *Dissertasi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.

- [36] G. Wijiatmoko, "Analisis Aerodinamika Sudut Defleksi Spoiler Pesawat Terbang," *Seminar Nasional dan Gelar Produk*, pp. 256-261, 2017.
- [37] Sunardi, A. T. Pratiwi, Erlan Suprianto, "Pengendalian Kualitas Produk pada Proses Produksi RIB A320 di Sheet Metal Forming Shop," *Jurnal Industri Elektro dan Penerbangan*, vol. 5, no. 2, 2020.
- [38] R. JIAO, X. HE, Y. LI, "Individual Aircraft Life Monitoring: An engineering approach for fatigue damage evaluation," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, no. 4, pp. 727-739, 2018.
- [39] B. Bodily *et al.*, "Advanced Aluminum And Aluminum–Lithium Solutions for Derivative and Next Generation Aerospace Structures," SAE Technical Paper, 2012.
- [40] R. Ivanov *et al.*, "Hardening potential of an Al-cu-Li Friction Stir Weld," *ICAA13 Pittsburgh*, Springer, Cham, pp. 659-664, 2012.