



Pengaruh Proses *Annealing* terhadap Kualitas *Bending Doubler* Aluminium Alloy seri 6061-T3 pada Struktur *Skin Center Wing Box*

"Influence of Annealing on the Bending Performance of 6061-T3 Aluminum Alloy Doubler Used in Center Wing Box Skin Structure"

Muhammad Noval Al Azzam^{1*}, Girjo Rahmanto²

^{1,2} Program Studi Teknik Aeronautika Pertahanan, Akademi Angkatan Udara

E-mail: azzamaau2022@gmail.com

Abstract— *This research was conducted to determine how the annealing process affects the bending quality of the doubler made from aluminum alloy series 6061 T3, which is used in the skin center wing box structure of aircraft. The aluminum alloy 6061 T3 is known for its good strength, but it tends to be relatively hard, making it prone to cracking or defects during the bending process. Therefore, a heat treatment process such as annealing is required to improve the ductility of the material and reduce residual stresses that can lead to failure during fabrication. In this study, the aluminum material was subjected to annealing treatment with variations in heating time before performing the bending test. The purpose of this heat treatment was to soften the metal structure and reduce internal stress so that the bending process could be performed more effectively. After the bending test, the surface of the specimen was examined to identify cracks or defects. The test results showed that the annealing process successfully improved the ductility of the aluminum and reduced the risk of cracking, leading to better bending quality and increased durability of the wing box structure.*

Keywords— *Aluminum, Bending, Annealing, Crack, Wing, Skin.*

Abstrak— *Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana proses annealing mempengaruhi kualitas pembungkakan (bending) pada aluminium alloy seri 6061 T3 yang digunakan pada struktur skin center wing box pesawat. Material aluminium alloy 6061 T3 dikenal memiliki kekuatan yang baik, namun cenderung keras sehingga berisiko mengalami retak atau cacat saat proses pembungkakan. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan panas berupa annealing untuk meningkatkan keuletan material dan mengurangi tegangan sisa yang dapat menyebabkan kegagalan saat proses fabrikasi. Dalam penelitian ini, material aluminium diberi perlakuan annealing dengan variasi waktu pemanasan sebelum dilakukan uji bending. Tujuan dari perlakuan panas ini adalah untuk melunakkan struktur logam dan mengurangi tegangan dalam (internal stress) sehingga proses pembungkakan dapat berlangsung lebih baik. Setelah dilakukan bending test, permukaan hasil uji diperiksa untuk melihat adanya retak atau cacat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses annealing mampu meningkatkan keuletan aluminium dan menurunkan risiko terjadinya retak, sehingga kualitas hasil pembungkakan menjadi lebih baik dan struktur wing box lebih tahan lama.*

Kata Kunci— *Aluminium, Bending, Annealing, Retak, Sayap, Kulit.*

*Muhammad Noval Al Azzam

E-mail: arnethaflor@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Dalam melaksanakan tugasnya, TNI AU didukung oleh teknologi modern dan sistem senjata utama (alutsista). Salah satu alutsista utama yang dimiliki oleh TNI AU adalah pesawat, salah satunya adalah C-130 Hercules yang dibuat oleh *Lockheed Martin*. C-130 merupakan pesawat monoplan berbadan metal, sayap tinggi, jarak jauh, berbasis darat. pesawat ini dirancang untuk menyediakan transportasi cepat bagi personel atau kargo untuk pengiriman dengan parasut atau pendaratan (*Lockheed Martin dan Manual n.d.*)

Wing sayap *cantilever* mengandung empat tangki bahan bakar utama integral dan dua tangki *auxiliary* tipe kantung, 2 tangki eksternal dipasang di bawah sayap, sehingga memberikan kapasitas bahan bakar yang dapat digunakan total sekitar 9680 galon AS setara dengan 36.655 liter (*Chase 1929*). Sebagian besar material pesawat terbang terdiri dari paduan aluminium, mengingat karakteristik yang ringan namun kuat. Akan tetapi rentan terhadap kerusakan struktural, terutama pada bagian *skin* pesawat yang menjadi target perbaikan struktur.

Doubler adalah proses penyambungan material yang sangat penting dalam industri manufaktur, terutama konstruksi pesawat terbang. Kualitas sambungan berpengaruh terhadap keselamatan dan kinerja struktur pesawat. Setiap perbaikan doubler yang diterapkan secara eksternal pada struktur *fuselage* akan mengurangi deteksi eksternal dari kulit, retak pada kulit di pengikat pertama akan tersembunyi secara eksternal oleh *repair doubler* (*Aircraft 1990*). Aluminium alloy khususnya seri 6061-T3 merupakan material yang paling banyak digunakan dalam aplikasi *Aerospace* karena kombinasi kekuatan, ringan, dan ketahanan korosi yang baik.

Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui kualitas kekuatan *bending* dari material *aluminium alloy* 6061-T3. Diharapkan dengan didapatnya data kekuatan *bending* dari material tersebut, maka bisa ditentukan material aluminium mana yang cocok sebagai material perbaikan *skin* pesawat C-130 Hercules yang terletak di struktur *skin center wing box*.

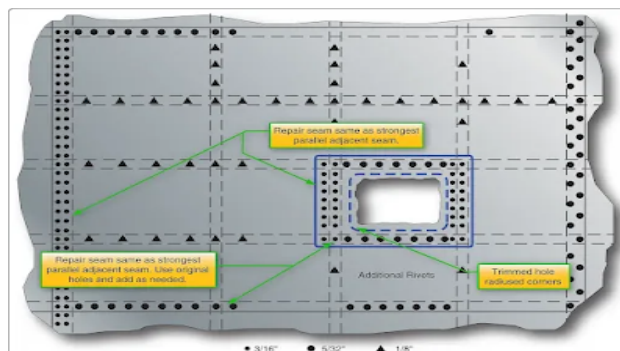
II. LANDASAN TEORI

A. Pesawat C-130 Hercules

Pesawat C-130 Hercules merupakan salah satu jenis pesawat yang digunakan oleh TNI Angkatan Udara Indonesia dalam berbagai operasi logistik dan kemanusiaan serta untuk mencapai level keselamatan tersebut, diperlukan proses pemeliharaan, perbaikan dan pengembangan agar kondisinya selalu layak terbang dan dapat memperpanjang umur pesawat (*Krisna Lelmalaya et al. 2023*). Sejak pertama kali beroperasi pada tahun 1960-an, pesawat ini telah menunjukkan kemampuan yang luar biasa dalam mendukung operasi militer dan bantuan kemanusiaan. Namun, seiring dengan berjalannya waktu dan bertambahnya usia pesawat, muncul berbagai tantangan dalam pemeliharaan dan perbaikan struktur pesawat, Kompetensi publikasi teknis

B. Doubler

Doubler adalah proses penyatuan bagian logam dengan tujuan memperbaiki struktur pesawat yang mengalami kerusakan. Dikutip dari buku DIKTAT *aircraft structure* (Kuliah et al. 2020) menjelaskan bahwa *doubler (back up plate)* merupakan suatu metode *repair* yang dilakukan pada pesawat terbang dimana material *doubler* tersebut biasanya dibuat dari bahan yang sama dengan bagian yang rusak. Ukuran dari *doubler* 1 nomor lebih tebal dari bagian yang rusak dan luasnya tergantung dari luar *Cutout* dan jumlah *rivets* yang akan dipasang. *Doubler* biasanya dipasang di bagian bawah atau dalam dari bagian yang rusak. Material doubler biasanya terbuat dari paduan aluminium. *Skin* pesawat seperti pada Gambar 1. berikut ini.

Gambar 1. *Skin pesawat.*

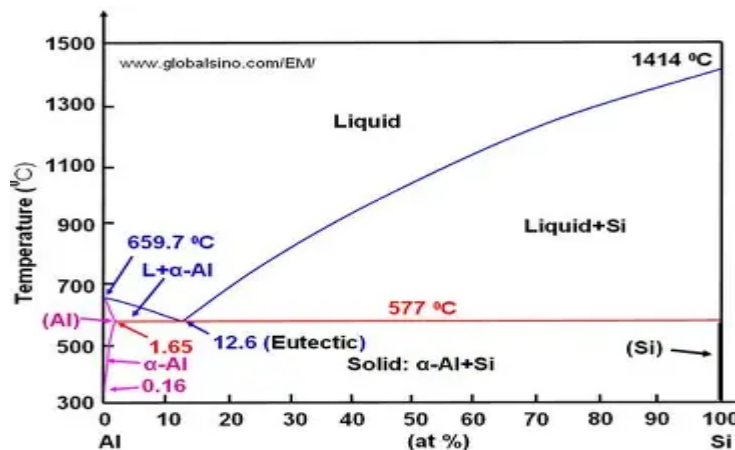
C. Aluminium Alloy 6061-T3

Software OpenRocket adalah perangkat lunak yang digunakan untuk mendesain dan melakukan simulasi terhadap roket yang dikembangkan oleh Sampo Niskanen pada tahun 2009. *Software OpenRocket* dirancang untuk membantu para pengguna untuk merancang dan mensimulasikan kinerja roket sebelum membangun dan mengembangkannya. Rancangan model roket dapat dibuat mulai dari kepadatan material hingga kualitas lapisan luar model roket. Simulasi penerbangan roket juga dapat dilakukan dengan data kinerja seperti pusat tekanan, pusat gravitasi, ketinggian maksimum dan stabilitas roket. Bahan *Aluminium Alloy 6061-T3* seperti Gambar 2. di bawah ini.

Gambar 2. *Bahan Aluminium Alloy 6061-T3.*

D. Perlakuan Panas (Heat Treatment)

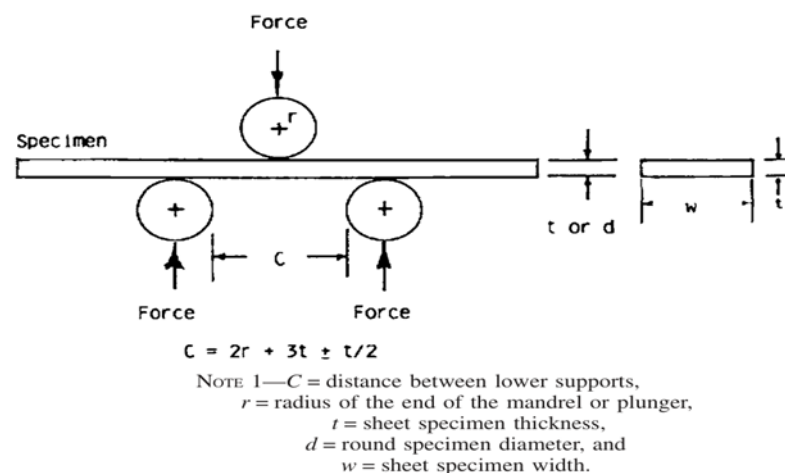
Heat treatment merupakan suatu proses pemanasan dan pendinginan yang terkontrol, dengan tujuan mengubah sifat fisik dan sifat mekanis dari suatu bahan atau logam sesuai dengan yang diinginkan (Heat 1964). Perlakuan panas pada aluminium paduan dilakukan dengan memanaskan sampai terjadi fase tunggal kemudian ditahan beberapa saat dan diteruskan dengan pendinginan cepat hingga tidak sempat berubah ke fase lain (astika. 2019). Dalam proses heat treatment harus memperhatikan acuan dasar yaitu diagram fasa (phase diagram) yang merupakan grafik untuk menunjukkan hubungan antara suhu, komposisi, dan kondisi (fase) suatu logam. Diagram ini membantu kita memahami bagaimana struktur mikro logam berubah saat dipanaskan atau didinginkan. Berikut gambaran diagram fasa tersaji dalam Gambar 3.



Gambar 3. Diagram fasa (Heat Treatment).

E. Pengujian Bending

Dalam konteks teknik dan fisika, *bending* merujuk pada deformasi sebuah benda yang mengakibatkan bagian dari benda tersebut melengkung. Proses ini sering terjadi pada material seperti logam, kayu, dan plastik. Uji *bending* merupakan salah satu jenis pengujian mekanik yang digunakan untuk menentukan kemampuan suatu material dalam menahan beban sebelum mengalami patah atau retak. Uji *bending*, juga dikenal sebagai uji lentur, adalah sebuah metode uji mekanis yang diaplikasikan untuk mengevaluasi keuletan bahan. Landasan teori yang mendasari uji *bending* berkaitan dengan konsep mekanika bahan dan elastisitas. ASTM E-290 adalah standar internasional yang diterbitkan oleh ASTM International (American Society for Testing and Materials). Standar ini digunakan untuk menguji kemampuan suatu material logam dalam mengalami deformasi plastis melalui uji lentur (*bending test*) — dengan tujuan utama menilai keuletan (*ductility*) suatu bahan logam (Methods 1998). Uji ini tidak mengukur kekuatan seperti uji tarik, tetapi menilai sejauh mana logam dapat dibengkokkan tanpa mengalami retak atau patah. Berikut gambar specimen pengujian *bending* dengan ASTM tersaji dalam Gambar 4.



Gambar 4. Spesimen Pengujian Bending Dengan ASTM.

Pada pengujian kali ini menggunakan ASTM E-290 yang bertujuan untuk mengatur kriteria keberhasilan berdasarkan retak atau patah pada specimen. Proses pembebanan menggunakan pendorong yang dimensinya telah ditentukan untuk memaksa bagian tengah bahan uji atau

spesimen tertekuk diantara dua penyangga. Selanjutnya bahan akan mengalami deformasi dengan dua buah gaya yang berlawanan bekerja pada saat yang bersamaan.

III. METODE/MODEL YANG DIUSULKAN

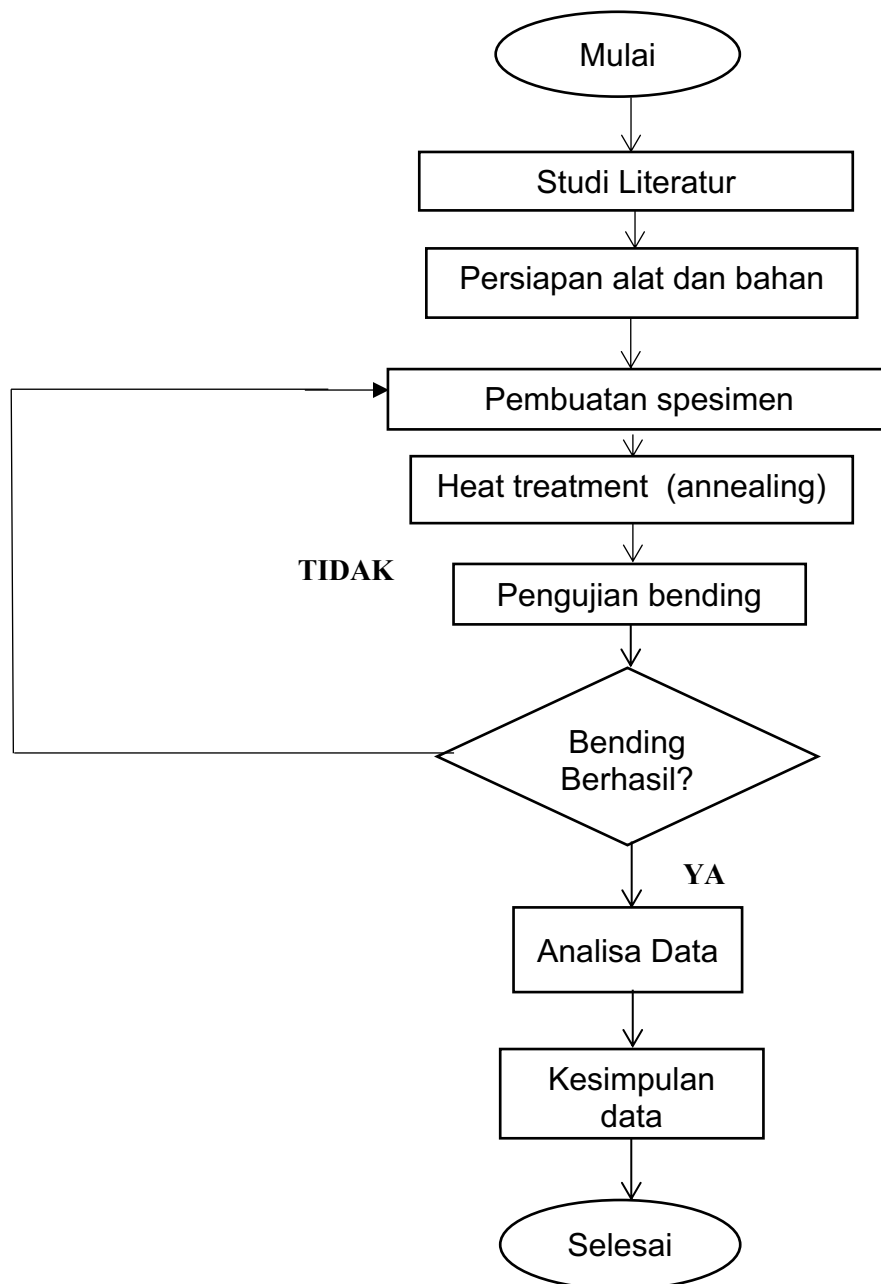
Jenis dan Desain Penelitian. Pada bab ini di bahas tentang metodologi yang akan dilakukan untuk mengetahui hasil dari data penelitian pada tugas akhir ini. Spesimen yang akan diuji untuk penelitian ini adalah *aluminium alloy 6061-T3*. Selanjutnya spesimen akan dilaksanakan proses *annealing*, selanjutnya spesimen akan dilakukan pengujian bending untuk mengetahui keuletan dari spesiemen tersebut.

- a. **Studi literatur.** Pada tahap ini dilakukan proses pembuatan landasan teori dengan melaksanakan kegiatan pencarian sumber literatur maupun referensi mengenai uji bending dan lebih memahami tentang *aluminium alloy 6061-T3* yang digunakan sebagai landasan dalam penelitian ini.
- b. **Metode eksperimen.** Dalam tahap ini akan dilakukan percobaan keuletan menggunakan uji bending dari *aluminium alloy 6061-T3* yang dilakuakan proses *annealing* dan tidak, menggunakan standar dari *American Standard Testing Material*. dimulai dengan pemilihan dan persiapan material yaitu aluminium alloy 6061 sebanyak 6 spesimen dengan ukuran standar, lalu dilanjutkan dengan tahapan *annealing* dan pengujian *bending*.

Variabel Penelitian. Adapun variabel penelitian yang di gunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

- a. Variabel Bebas. Variabel bebas adalah suatu faktor yang diubah dalam penelitian untuk melihat pengaruhnya, yaitu meliputi :
 - 1) Proses *annealing*
- b. Variabel Terikat. Variabel terikat adalah respon dari spesimen terhadap perlakuan yang diberikan, yaitu hasil pengukuran dari uji lentur. Artinya, variabel ini dipengaruhi oleh variabel bebas.
 - 1) Beban maksimum
 - 2) Defleksi

Diagram Alir. Diagram alir merupakan skema yang menggambarkan urutan langkah-langkah proses yang dilakukan dalam penelitian ini, mulai dari tahap persiapan hingga analisis hasil.



Gambar 3.1 Diagram Alir

IV. HASIL/IMPLEMENTASI MODEL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian

Pengujian ini dilakukan untuk dapat mengukur serta membandingkan kekuatan struktur Aluminium 6061-T3 yang telah diberi perlakuan panas (heat treatment) pada suhu 500°C melalui proses uji bending. Hasil pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran performa material 6061-T3 dalam aplikasi struktural, tepatnya sebagai material doubler struktur pesawat terbang, serta menentukan kondisi terbaik dari perlakuan panas untuk penggunaan operasional yang optimal.

B. Pembahasan

Pengambilan Data. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apa yang terjadi pada spesimen sebelum dan sesudah melalui perlakuan panas serta pengujian bending. Data awal diperoleh dari pengukuran data dan pencatatan kondisi fisik serta sifat mekanik spesimen sebelum perlakuan panas. Setelah perlakuan panas pada suhu (500 °C, 1 jam, pendinginan udara), serta dilakukan pengujian bending. Data yang sama diambil kembali untuk membandingkan perubahan yang terjadi, Berikut adalah gambar atau foto yang diambil dari percobaan, baik sebelum maupun sesudah melalui perlakuan panas dan pengujian bending.

TABEL I
Data spesimen 2024 T3.

No	Spesimen	Suhu Perlakuan panas	Panjang	Lebar	Tebal
1	2024 T3 2 buah	400°C/ 1 jam/ pendinginan udara	15 cm	3 cm	2 mm

TABEL II
Data spesimen 6061 T3

No	Spesimen	Suhu Perlakuan Panas	Panjang	Lebar	Tebal
1	6061 T3 3 buah	500°C / 1 jam / pendinginan udara	15 cm	3 cm	3 mm

TABEL III

Data pengujian *Bending* Alumunium 6061 T3 tanpa *annealing*

No	Spesimen	Suhu perlakuan panas	Defleksi awal (mm)	Defleksi akhir (mm)	Defleksi Rata-rata spesimen (mm)	Beban Maksimal (N)
1	6061 T3 R3	500°C	1.5	32	17.5	358.7
2	6061 T3 R2	500°C	1.5	33.5	16.75	383.2
3	6061 T3 R1	500°C	1.5	28.5	15.0	329.1

TABEL IV

Data pengujian *Bending* Alumunium 6061 T3 *annealing*

NO	Spesimen	Suhu perlakuan panas	Defleksi awal (mm)	Defleksi akhir (mm)	Defleksi rata-rata spesimen (mm)	Beban Maksimal (N)
1	6061 T3 (A1)	500°C	1	22	11.5	177.8
2	6061 T3 (A2)	500°C	3	22.5	12.75	225.1
3	6061 T3 (A3)	500°C	6	24	15.0	232.2

TABEL V

Data pengujian *Bending* Alumunium 2024 T3 *annealing* dan non

NO	Spesimen	Suhu perlakuan panas	Defleksi awal (mm)	Defleksi akhir (mm)	Defleksi (mm)	Beban Maksimal (N)
1	2024 T3 A1	400°C	1,25	27,5	14,375	165,462 Newton
2	2024 T3 A2	400°C	1,25	21,5	11,375	148,373 Newton
3	2024 T3 R1	400°C	1,75	18,5	10,125	183,688 Newton
4	2024 T3 R2	400°C	1,25	24,5	12,875	168,998 Newton

Dari data visual spesimen dan data pengujian yang tersaji dalam Tabel I, II, III, IV, dan V dapat diambil pernyataan sebagai berikut :

Spesimen 6061-T3 dipanaskan pada suhu 500°C dan juga didinginkan menggunakan pasir selama 24 jam. Setelah perlakuan panas, kekuatan *bending* menurun tajam dari 350 N menjadi 191 N, sementara *defleksi* meningkat dari 16,4 mm menjadi 38 mm. Hal ini menunjukkan material menjadi lebih ulet dan mudah dibentuk, tetapi tidak sekuat sebelumnya. Karena itu, aluminium 6061-T3 tidak direkomendasikan sebagai material utama doubler, namun masih bisa digunakan sementara dalam kondisi darurat, dengan batas beban maksimal 350 N. Spesimen aluminium 2024-T3 diuji setelah diberi perlakuan panas pada suhu 400°C dan didinginkan menggunakan pasir selama 24 jam. Hasilnya, material mengalami penurunan kekuatan *bending* namun peningkatan kemampuan defleksi. Sebelum *annealing*, beban maksimum yang dapat ditahan sebesar 176 N dengan *defleksi* 11,5 mm, sedangkan setelah *annealing* kekuatannya menurun menjadi 157 N, dengan *defleksi* meningkat menjadi 12,8 mm. Artinya, material menjadi lebih lentur tetapi sedikit berkurang kekuatannya. Meski demikian, aluminium 2024-T3 masih layak digunakan sebagai doubler pesawat C-130 Hercules, selama beban tidak melebihi batas tersebut. Perbandingan dan pola umum dari kedua material terlihat bahwa semakin tinggi suhu perlakuan panas, kekuatan *bending* menurun, tetapi kemampuan menahan *defleksi* meningkat. Proses *annealing* menyebabkan struktur material menjadi lebih lunak, sehingga mudah melentur namun kehilangan sebagian kekuatannya. Secara visual, spesimen yang telah di *annealing* menunjukkan patahan lebih halus dan lentur, berbeda dengan kondisi awal yang lebih getas.

V. KESIMPULAN

Pengaruh perlakuan panas terhadap Struktur dan Sifat Mekanik proses annealing berpengaruh besar terhadap struktur dan sifat mekanik kedua material. Pemanasan diikuti pendinginan dengan pasir selama 24 jam membuat struktur logam menjadi lebih lunak dan butiran kristalnya membesar. Akibatnya, material menjadi lebih mudah dibentuk (lebih ulet), tetapi kekuatan bending-nya menurun. Aluminium 6061-T3 tanpa annealing mampu menahan beban lebih besar (sekitar 322–375 N), sedangkan setelah annealing kemampuan menahan beban turun menjadi sekitar 167–230 N tetapi defleksi yang dicapai meningkat (11,5–15 mm). Peningkatan defleksi ini menunjukkan bahwa material menjadi lebih ulet dan mampu mengurangi kemungkinan terjadinya retak pada spesimen. Proses annealing membuat material lebih lentur namun sedikit menurun kekuatannya terhadap beban bending. Hal ini penting untuk dipahami agar perlakuan panas dapat disesuaikan dengan kebutuhan perbaikan di lapangan. Semakin tinggi suhu perlakuan panas, semakin rendah kekuatan namun semakin tinggi kemampuan defleksi. Sementara itu, titik lebur aluminium tidak berubah, karena proses annealing hanya memengaruhi struktur dalam logam, bukan komposisi kimianya. Hasil pengujian aluminium 2024-T3 proses annealing dilakukan pada suhu 400°C. Sebelum annealing, beban maksimum yang mampu ditahan adalah 176 N, dengan defleksi 11,5 mm. Setelah annealing, kekuatan menurun menjadi 157 N, namun defleksi meningkat menjadi 12,8 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa aluminium 2024-T3 menjadi lebih lentur tanpa kehilangan kekuatan secara drastis.

REFERENSI

- [1] Aircraft, Tolerant. 1990. "90 (o, 4' 1." 90.
- [2] Chase, A. 1929. "This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible ." *Biologia Centrali-Americaa* 2: v–413.
- [3] Corporation, Lockheed Martin. 2023. "C-130B-H TECHNICAL Lockheed Martin C-130B-H."
- [4] Heat, O F. 1964. "Of heat." : 97–100.
- [5] Kammer, Catrin. 2018. "Aluminum and aluminum alloys." *Springer Handbooks*: 157–93. doi:10.1007/978-3-319-69743-7_6.
- [6] Kaufman, J Gilbert, dan Elwin L Rooy. 2004. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications *Aluminum Alloy Properties , Processes , and Applications*.
- [7] Ko, Young Gun, dan Kotiba Hamad. 2017. "Annealing behavior of 6061 Al alloy subjected to differential speed rolling deformation." *Metals* 7(11). doi:10.3390/met7110494.
- [8] Krisna Lelmalaya, Budi, Saiful Anham, Mohammad Aqbiel Surya Saputra, dan Tria Nur Fitrianti. 2023. "1. Tantangan Dan Solusi Dalam Perawatan Armada C-130 Hercules Demi Mendukung Pengembangan Misi Negara." *TNI Angkatan Udara* 2(1): 1–7. doi:10.62828/jpb.v2i1.51.
- [9] Kuliah, Mata Kuliah, aircraft structure. 2020. "Semester 3 1." : 1–156.
- [10] Lockheed Martin, dan Operation Manual. "for Operation Manual."
- [11] Methods, Standard Test. 1998. "Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility 1." *Current* 03(February): 1–7. doi:10.1520/E0290-13.Copyright.
- [12] Sambas, Achmad, Casiman Sukardi, dan Reza Yadi Hidayat. 2024. "Teknik Dasar Peleburan Logam."