



## Analisis Pengaruh *Flap-Peening* pada *Skin* Pesawat terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik Pesawat Airbus 330 Series

**Muhammad Risanul Abdillah Rusman**

Politeknik Penerbangan Indonesia Curug

**Wahyu Cakra Nugraha**

Politeknik Penerbangan Indonesia Curug

**Fawwaz Yusa Gifari**

Politeknik Penerbangan Indonesia Curug

Alamat: Kabupaten Tangerang, Banten 15820

Korespondensi penulis: [mhmmmdrisann66@gmail.com](mailto:mhmmmdrisann66@gmail.com)

**Abstract.** Aircraft structural maintenance is a crucial aspect in ensuring operational safety and reliability. One major challenge is material degradation due to corrosion, especially on skin components made of Aluminum 2024-T3, such as those used in Airbus 330 Series aircraft. Although this material has high mechanical strength, it is highly susceptible to corrosion that can reduce its structural integrity. The blend-out or material removal process used to repair corrosion can further weaken the affected area. This study quantitatively analyzes the effect of flap-peening treatment as a restoration method for mechanical properties after blend-out. The research employed a quantitative experimental method with three Aluminum 2024-T3 specimen conditions: original (untreated), post-blend-out without flap-peening, and post-blend-out with flap-peening. Mechanical properties were evaluated using the Rockwell Hardness Test (HRB) according to ASTM E18-16 and tensile testing to determine Ultimate Tensile Strength (UTS) following ASTM E8/E8M-09 standards. Results showed that blend-out reduced hardness from 76.30 HRB to 69.80 HRB and UTS from 436.29 MPa to 396.37 MPa. However, after applying flap-peening, hardness increased to 74.87 HRB and UTS to 428.73 MPa. These findings demonstrate that flap-peening can restore the mechanical properties of the material close to its original condition by recovering compressive residual stress. This study provides a strong technical justification for the Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) industry to adopt flap-peening as a standard structural repair procedure to enhance aviation safety and operational efficiency.

**Keywords:** Aluminium Alloy 2024-T3, Compressive Residual Stress, Flap-peening, Hardness, Tensile Strength.

**Abstrak.** Pemeliharaan struktur pesawat merupakan aspek penting untuk menjamin keselamatan dan keandalan operasional. Tantangan utamanya adalah degradasi material akibat korosi, terutama pada komponen *skin* dari Aluminium 2024-T3 pada pesawat Airbus 330 Series. Meskipun memiliki kekuatan mekanik tinggi, material ini rentan terhadap korosi yang menurunkan integritas struktural. Proses perbaikan korosi dengan

Received Januari 02, 2026; Accepted Februari 02, 2026; Published Maret 30, 2026

\*Corresponding author, [mhmmmdrisann66@gmail.com](mailto:mhmmmdrisann66@gmail.com)

*blend-out* atau pengikisan material dapat menurunkan kekuatan area perbaikan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perlakuan *flap-peening* sebagai metode restorasi sifat mekanik setelah *blend-out*. Metode penelitian menggunakan eksperimen kuantitatif dengan tiga kondisi spesimen Aluminium 2024-T3: *original*, pasca-*blend-out* tanpa *flap-peening*, dan pasca-*blend-out* dengan *flap-peening*. Evaluasi sifat mekanik dilakukan melalui *Rockwell Hardness Test (HRB)* sesuai ASTM E18-16 dan uji tarik untuk menentukan *Ultimate Tensile Strength (UTS)* sesuai ASTM E8/E8M-09. Hasil menunjukkan *blend-out* menurunkan kekerasan dari 76,30 HRB menjadi 69,80 HRB dan UTS dari 436,29 MPa menjadi 396,37 MPa. Setelah *flap-peening*, kekerasan meningkat menjadi 74,87 HRB dan UTS menjadi 428,73 MPa. Hasil ini membuktikan *flap-peening* mampu memulihkan sifat mekanik material hingga mendekati kondisi *original* dengan mengembalikan *compressive residual stress*. Penelitian ini memberikan dasar teknis bagi industri *Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO)* untuk mengadopsi *flap-peening* sebagai prosedur standar perbaikan struktur guna meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional.

**Kata kunci:** *Aluminium Alloy 2024-T3, Compressive Residual Stress, Flap-peening, Kekerasan, Tensile Strength.*

## LATAR BELAKANG

Industri penerbangan di Indonesia mengalami perkembangan yang pesat dengan meningkatnya kebutuhan transportasi udara yang andal, aman, dan laik untuk beroperasi. Dalam perkembangan tersebut, kelaikudaraan menjadi salah satu aspek penting yang tidak bisa diabaikan, sebab menyangkut keselamatan dan keandalan setiap penerbangan. Kelaikudaraan didefinisikan sebagai terpenuhinya persyaratan desain tipe pesawat udara dalam kondisi aman untuk beroperasi. (DPR, 2009). Dalam rangka memastikan kelaikudaraan dari pesawat, salah satu yang harus diperhatikan adalah dengan melakukan penanganan terhadap kerusakan yang terjadi pada pesawat. Salah satu kerusakan yang harus diperhatikan adalah kerusakan pada bagian struktur pesawat. Kerusakan pada struktur pesawat dapat disebabkan oleh faktor-faktor, diantaranya *bird-strike*, *corrosion*, *fatigue*, *scratch*, *dent*, *defect*, *crack*, *nicks*, *lightning-strikes* dan *stress* (Airbus, 2024).

Berdasarkan data yang penulis peroleh dari Tim *Production Line Hangar 3 PT. XYZ Tbk*, dalam periode tahun 2024 terdapat 26 masalah korosi pada *skin* pesawat yang terletak pada *frame 74* sampai dengan *frame 78 (frame 74-78)*. Area *frame 74-78* cenderung lebih rentan mengalami korosi karena merupakan bagian struktur yang

berpotensi menjadi titik akumulasi kelembapan dan kontaminan (misalnya air, garam, dan residu kotoran) akibat kondisi lingkungan operasional, sehingga mempercepat proses degradasi material pada permukaan skin. Permasalahan korosi pada *skin* pesawat tidak hanya menyebabkan degradasi material, apabila tidak segera ditangani dapat memicu terjadinya retak fatik (*fatigue crack*) (Czaban, 2018). Untuk menangani itu, industri penerbangan modern telah mengembangkan solusi efektif melalui teknik *surface treatment* berupa *peening*. Dua metode yang paling umum diaplikasikan adalah *shot-peening* dan *flap-peening*. PT. XYZ, Tbk. memiliki kapabilitas untuk melakukan perbaikan struktur pesawat, yaitu dengan metode *flap-peening*. *Flap-peening* adalah variasi yang lebih fleksibel dari metode *shot-peening* untuk digunakan pada area yang sulit dijangkau. Mekanisme kerja dari metode *flap-peening* ini adalah dengan menekan bola-bola metal di ujung *flapper* yang berputar sehingga menyatukan molekul material menjadi lebih rapat dan memberikan *compressive residual stress* pada permukaan material dan mereduksi *residual tensile stress* di bawah permukaan material yang dapat meningkatkan sifat mekanik material.

Dalam penelitian oleh Abushgair (2017) menunjukkan bahwa proses *flap-peening* memiliki kemampuan untuk meningkatkan kekerasan rata-rata hingga 31 HRC yang memungkinkan material lebih tahan terhadap fatik. Secara umum, tujuan dari pengaplikasian *flap-peening* ini adalah untuk mendapatkan *compressive residual stress* dari suatu material yang dapat memperbaiki sifat mekanik dan meningkatkan ketahanan terhadap *fatigue fracture* dari suatu material, selain meningkatkan kekerasan dari permukaan dari suatu material (Abushgair, 2017). Dalam penelitian lain oleh Shaban *et al.* (2022) menunjukkan bahwa pengaplikasian *flap-peening* dapat mengurangi risiko propagasi retakan dan meningkatkan kekerasan mikro hingga 140% pada aluminum alloy tertentu (Shaban *et al.*, 2022).

Setelah dilakukan perbaikan pada struktur *skin* pesawat, selanjutnya dapat dilakukan pengujian kekerasan struktur pada *skin* pesawat yang dapat diuji dengan berbagai metode pengujian kekerasan, seperti *Vickers Hardness Test*, *Brinell Hardness Test*, dan *Rockwell Hardness Test*. Ketiga metode tersebut digunakan untuk mengukur tingkat kekerasan berdasarkan realisasi lekukan dan ukuran lekukan seperti kedalaman, diameter, dan panjang diagonal. Pengukuran ini digunakan untuk mengukur sifat mekanik

material berdasarkan konsep kekerasan, yaitu ketahanan yang digunakan oleh suatu material terhadap deformasi (Kuzu et al., 2020). Dalam penelitian ini, penulis menggunakan *Rockwell Hardness Test* untuk menilai kekerasan dari kulit pesawat Airbus 330 Series (Aluminium alloy 2024-T3) setelah pengaplikasian *flap-peening*, sebab metode *Rockwell Hardness Test* memiliki proses yang lebih sistematis yang memungkinkan pengukuran lebih cepat, mudah, reproduktibilitas tinggi.

Selain itu *hardness number* dapat dibaca secara langsung dari dial sehingga memudahkan dalam penggunaannya (Budynas & Nisbett, 2015). Diharapkan hasil uji dapat memberikan data empiris tentang efektivitas material *skin* pesawat setelah dilakukannya *flap-peening*. Selain uji kekerasan menggunakan *Rockwell Hardness Test*, uji tarik merupakan metode penting yang dapat digunakan dalam menilai kekuatan struktur suatu material. Sifat mekanis suatu material seperti nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) didapatkan melalui uji tarik yang menunjukkan kemampuan material untuk menahan beban maksimum sebelum patah. Pengaruh pengaplikasian *flap-peening* dapat dievaluasi dengan dilakukan pengujian kekerasan dan uji tarik, diharapkan dapat menunjukkan peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik yang signifikan dibandingkan dengan spesimen yang tidak menjalani proses ini.

## METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan metode kuantitatif. Metode ini didefinisikan sebagai suatu metode penelitian berbasis positivisme, ini digunakan untuk mempelajari populasi atau sampel tertentu. Untuk menguji hipotesis yang telah ditetapkan, pengumpulan dan analisis data dilakukan secara kuantitatif dan statistik (Winarni, 2018). Penelitian kuantitatif melibatkan pengumpulan data numerik yang dapat dikuantifikasi dan dikomunikasikan dalam bentuk angka untuk eksplorasi empiris (Punch, 2013).

Creswell mengatakan bahwa penelitian kuantitatif adalah suatu cara untuk mempelajari masalah. Masalah yang ada digunakan oleh peneliti untuk mengumpulkan data. Selanjutnya, variabel diidentifikasi dan nilainya dihitung untuk analisis sesuai dengan prosedur statistik yang sesuai. Penelitian ini bertujuan untuk membantu merumuskan kesimpulan atau menggeneralisasikan teori (Smith & Hasan, 2020).

Membangun hipotesis yang terkait dengan fenomena yang akan diteliti oleh pendekatan penelitian ini juga penting. Tujuan utama dari penelitian kuantitatif adalah pengukuran. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa hasil pengukuran dapat membantu mengidentifikasi hubungan penting antara hasil kuantitatif dari pengamatan empiris. Selain itu, penelitian ini juga dapat menggunakan survei, analisis statistik, dan manipulasi variabel untuk mencapai tujuan yang ditetapkan (Idhartono, 2020).

Dalam penelitian ini, pemilihan metode kuantitatif didasarkan pada tujuan penelitian, yaitu untuk memperoleh data terkait perubahan sifat material setelah dilakukan perbaikan berupa pengaplikasian *flap-peening*. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik dari 3 kondisi original Aluminium alloy 2024-T3 (original (tanpa perlakuan), *blend-out only without flap-peening*, dan *blend-out with flap-peening*), sehingga pendekatan menggunakan metode kuantitatif menjadi pilihan yang tepat karena memberikan hasil yang bersifat objektif, numerik, dan dapat dianalisis secara statistik. Setiap kondisi pada penelitian ini diwakili oleh satu spesimen, dengan pengujian kekerasan dilakukan pada tiga titik pengukuran pada masing-masing spesimen sebagai bentuk validitas internal dan untuk meningkatkan konsistensi hasil pengukuran. Selain itu, terdapat relevansi pendekatan dengan penelitian terdahulu yang penulis gunakan sebagai acuan dalam penelitian ini, seperti penelitian Wahyu Subhan (2023), Abushgair (2017), dan Andi Firdaus Sudarma (2022), yang seluruhnya menggunakan metode kuantitatif dalam mengkaji pengaruh perlakuan mekanis atau termal terhadap karakteristik logam. Adapun ketebaruan dalam penelitian ini adalah pada penggunaan spesimen yang spesifik, yaitu material *skin* pesawat Airbus 330 Series pada *frame* 74-78, yang merupakan area krusial dan rentan terhadap korosi dalam struktur pesawat.

Material Aluminium Alloy 2024-T3 yang digunakan pada penelitian ini berasal dari material skin pesawat Airbus 330-300 pada area *frame* 74–78 yang diperoleh dari proses perbaikan (*scrap material*) di lingkungan kerja PT. XYZ Tbk, sehingga karakteristik awal material merepresentasikan kondisi aktual komponen pesawat. Identifikasi material dan kesetaraan grade 2024-T3 dikonfirmasi melalui dokumen pendukung/sertifikat material (*material certificate*) serta referensi spesifikasi material yang berlaku pada struktur pesawat. Proses flap-peening dilakukan menggunakan peralatan flap-peening yang

diaplikasikan pada area blend-out dengan parameter proses yang dikontrol, meliputi tekanan udara kerja (jika menggunakan *pneumatic tool*), kecepatan putaran (rpm), durasi perlakuan pada area uji, serta jenis dan ukuran media flap berupa bola metal (ball size) pada ujung flapper. Parameter ini dicatat untuk memastikan konsistensi perlakuan antar spesimen dan mendukung reproduisibilitas penelitian.

Metode pengujian kekerasan *Rockwell Hardness Test Scale B* dan uji tarik pada penelitian ini didasarkan pada relevansi parameter utama dalam mengevaluasi pengaruh *flap-peening* terhadap kekuatan material struktural pesawat, khususnya pada *skin* pesawat yang mengalami *blend-out* akibat korosi. Uji kekerasan mencerminkan resistensi material terhadap deformasi plastis lokal, sesuai dengan prinsip kerja dari *flap-peening* yang menciptakan *compressive residual stress* (tegangan sisa tekan) pada permukaan material, peningkatan kekerasan permukaan mengindikasikan bahwa material menjadi lebih tahan terhadap penetrasi dan deformasi akibat beban, serta menunjukkan peningkatan kemampuan material untuk menghambat inisiasi retak (Callister & David Rethwisch, 2014). Sementara itu, uji tarik dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan material menahan beban maksimum sebelum mengalami fraktur yang kemudian digunakan untuk menentukan nilai kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*)(*ASM Handbook*, 2000). Dengan mengukur kekuatan tarik setelah aplikasi *flap-peening*, penelitian ini dapat menilai sejauh mana perbaikan ini mampu mengembalikan atau bahkan meningkatkan kapasitas beban material, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan kelaikudaraan dan umur pakai pesawat.

Dalam penelitian ini, metode pengujian lain seperti uji mikrostruktur tidak digunakan, karena bersifat kualitatif (hasil tidak berupa angka) dan tidak menggambarkan kekuatan material secara langsung (tidak menghasilkan nilai kekuatan) (Callister & David Rethwisch, 2014). Sedangkan pengujian *fatigue test* tidak dilakukan, sebab fokus penelitian ini adalah untuk mengevaluasi sifat mekanik statik material, bukan perilaku material terhadap beban siklik (ASTM International, 2021). Meskipun demikian, peningkatan nilai kekerasan dan ultimate tensile strength (UTS) akibat pengaplikasian flap-peening secara tidak langsung juga berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan fatigue, sehingga tetap relevan dalam konteks struktur pesawat yang bekerja pada beban berulang selama operasi penerbangan. Selain itu, pengujian kekerasan *Rockwell*

*Hardness Test Scale B* dan uji tarik memiliki relevansi yang kuat dengan ketahanan *fatigue*, sehingga uji kekerasan dan uji tarik representasi peningkatan mekanik material pasca pengaplikasian flap-peening (Callister & David Rethwisch, 2014).

Dimensi spesimen uji tarik mengacu pada ketentuan bentuk dan ukuran spesimen uji tarik dengan lebar ( $w$ ) sebesar 12,5 mm dan ketebalan ( $t$ ) nominal sebesar 1,7 mm. Setelah proses *blend-out* dan *flap-peening*, ketebalan spesimen diperiksa kembali menggunakan mikrometer digital untuk mencatat dimensi akhir. Mengingat adanya pengurangan ketebalan akibat proses *blend-out*, perhitungan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dilakukan menggunakan luas penampang aktual ( $A_0$ ) dari masing-masing spesimen, bukan berdasarkan dimensi nominal awal. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa variasi nilai kekuatan yang didapat murni merepresentasikan perubahan sifat mekanik material, bukan karena perbedaan geometri penampang.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengujian Spesimen

Pada penelitian ini dilakukan dua jenis pengujian untuk mengetahui pengaruh pengaruh *flap-peening* terhadap nilai kekerasan dan kekuatan tarik *skin* pesawat Airbus 330 Series, yaitu *Rockwell Hardness Test Scale B* dan pengujian tarik (*tensile test*). Kedua pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan ketiga kondisi spesimen Aluminium Alloy 2024-T3 yaitu spesimen original (tanpa perlakuan), *blend-out only without flap-peening*, dan *blend-out with flap-peening*.

#### 1. Pengujian *Rockwell Hardness Test Scale B*

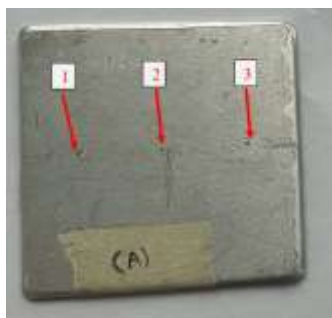
Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban tertentu berupa indentor pada spesimen uji, kemudian mengukur kedalaman indentasi yang tercipta dari penetrasi indentor terhadap permukaan spesimen uji. Pengujian ini dapat dilakukan setelah memastikan alat uji dalam kondisi terkalibrasi, siapkan indentor (*steel ball*) berdiameter 1/16-inch sesuai dengan ketentuan pengujian RHT *Scale B*, siapkan ketiga spesimen uji dalam kondisi bersih dan siap uji. Kemudian, spesimen secara bergantian dapat dipasangkan menghadap ke atas anvil (penyangga) alat uji kekerasan RHT dan pastikan

spesimen terletak pada kondisi stabil selama pengujian berlangsung agar hasil pengujian yang didapatkan maksimal. Setelah itu pasang identor berdiameter 1/16-inch.

Langkah selanjutnya adalah penerapan beban minor sebesar 10 kgf untuk memastikan kontak awal identor dengan permukaan spesimen uji, tahan beban minor beberapa saat hingga jarum pada *dial tester* dalam keadaan stabil sebagai penanda penetrasi awal telah dilakukan. Selanjutnya dapat diterapkan beban mayor sebesar 90 kgf sehingga beban total menjadi 100 kgf, pertahankan beban tersebut selama  $\pm 10-15$  detik untuk memastikan bahwa indentasi berlangsung sempurna. Setelah itu, beban mayor dapat dilepaskan dan pertahankan pembebanan minor. Alat secara otomatis akan mengukur kedalaman indentasi yang tercipta dan menampilkan nilai kekerasan (HRB) pada skala digital, catat nilai HRB yang didapatkan. Ulangi proses pengujian pada dua titik lain pada spesimen uji (total 3 titik indentasi per spesimen uji) untuk mendapatkan nilai rata-rata HRB dengan memperhatikan jarak antar indentasi pada spesimen uji. Lakukan Langkah-langkah pengujian ini pada 2 spesimen lainnya. Untuk lebih jelasnya, masing-masing spesimen akan dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut.

#### a) Spesimen *Original*

Spesimen original ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.** yang menunjukkan kondisi spesimen pasca pengujian kekerasan menggunakan *Rockwell Hardness Test Scale B* pada 3 titik pengujian yang ditunjukkan dengan tanda panah merah.



Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

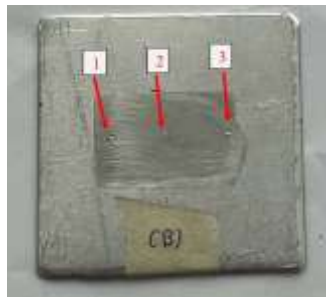
**Gambar 1. Indentasi Hasil Uji Kekerasan RHT Spesimen *Original* (garis merah menunjukkan area titik uji)**

Adapun hasil pengujian pada spesimen original ini memperoleh hasil nilai kekerasan (HRB) berturut-turut 1, 2, dan 3 yaitu 76,2 HRB, 78,4 HRB, dan 74,3 HRB.

Kemudian jika dirata-ratakan akan memperoleh Mean HRB sebesar 76,30 HRB. Tanda panah merah menunjukkan lokasi titik indentasi pengujian kekerasan pada permukaan spesimen.

**b) Spesimen *Blend-Out Only without Flap-Peening***

Spesimen *Blend-Out Only (without Flap-Peening)* merupakan kondisi spesimen pasca pengujian kekerasan menggunakan *Rockwell Hardness Test Scale B* pada 3 titik pengujian yang ditunjukkan dengan tanda panah merah pada Gambar 2.



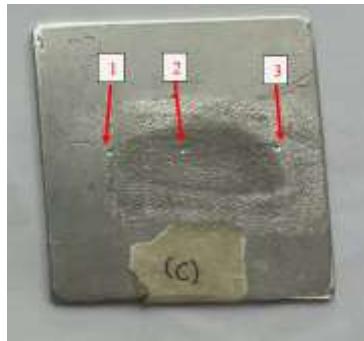
Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

**Gambar 2. Indentasi Hasil Uji Kekerasan RHT Spesimen *Blend-Out Only without Flap-Peening* (garis merah menunjukkan area titik uji)**

Hasil pengujian pada spesimen *Blend-Out Only without Flap-Peening* ini memperoleh hasil nilai kekerasan (HRB) berturut-turut 1, 2, dan 3 yaitu 68,7 HRB, 70,2 HRB, dan 70,5 HRB. Jika dirata-ratakan memperoleh Mean HRB sebesar 69,80 HRB. Tanda panah merah menunjukkan lokasi titik indentasi pengujian kekerasan pada permukaan spesimen.

**c) Spesimen *Blend-Out Only with Flap-Peening***

Spesimen *Blend-Out with Flap-Peening* pada **Error! Reference source not found.** yang menunjukkan kondisi spesimen pasca pengujian kekerasan menggunakan *Rockwell Hardness Test Scale B* pada 3 titik pengujian yang ditunjukkan dengan tanda panah merah.



Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

**Gambar 3. Indentasi Hasil Uji Kekerasan RHT Spesimen *Blend-Out Only with Flap-Peening* (garis merah menunjukkan area titik uji)**

Hasil pengujian pada spesimen *Blend-Out with Flap-Peening* ini memperoleh hasil nilai kekerasan (HRB) berturut-turut 1, 2, dan 3 yaitu 74,1 HRB, 76,3 HRB, dan 74,2 HRB. Jika dirata-ratakan akan memperoleh Mean HRB sebesar 74,87 HRB. Tanda panah merah menunjukkan lokasi titik indentasi pengujian kekerasan pada permukaan spesimen.

Untuk mempermudah pemahaman terhadap data hasil pengujian kekerasan RHT Scale B pada ketiga kondisi spesimen, data tersebut disajikan dalam Tabel 1 yang menunjukkan nilai kekerasan pada masing-masing area uji untuk spesimen dengan kondisi original, *blend-out only (without flap-peening)*, dan *blend-out (with flap-peening)*. Pada kondisi original, terdapat tiga titik indentasi dengan nilai kekerasan 76,2 HRB, 78,4 HRB, dan 74,3 HRB, dengan nilai mean kekerasan sebesar 76,30 HRB. Spesimen *blend-out only (without flap-peening)* menunjukkan penurunan nilai kekerasan, terdapat tiga titik indentasi dengan nilai kekerasan 68,7 HRB, 70,2 HRB, dan 70,5 HRB, dengan nilai mean kekerasan sebesar 69,80 HRB. Sementara spesimen *blend-out (with flap-peening)* memiliki nilai terdapat tiga titik indentasi dengan nilai kekerasan 74,1 HRB, 76,3 HRB, dan 74,2 HRB dengan nilai mean kekerasan sebesar 74,87 HRB yang menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai kekerasan pada spesimen yang setelah mengalami proses *blend-out* diaplikasikan *flap-peening*.

**Tabel 1. Data Hasil Pengujian Kekerasan RHT *Scale B***

| No. | Sampel                      | Area | Nilai Kekerasan (HRB) | HRB Mean | Standard Deviation |
|-----|-----------------------------|------|-----------------------|----------|--------------------|
| (a) | Original                    | 1    | 76,2                  | 76,30    | 2,05               |
|     |                             | 2    | 78,4                  |          |                    |
|     |                             | 3    | 74,3                  |          |                    |
| (b) | Blend-Out Only              | 1    | 68,7                  | 69,80    | 0,96               |
|     |                             | 2    | 70,2                  |          |                    |
|     |                             | 3    | 70,5                  |          |                    |
| (c) | Blend-Out with Flap-Peening | 1    | 74,1                  | 74,87    | 1,27               |
|     |                             | 2    | 76,3                  |          |                    |
|     |                             | 3    | 74,2                  |          |                    |

Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

Berdasarkan Tabel 1, nilai kekerasan pada tiga titik pengujian di setiap spesimen menunjukkan variasi yang masih wajar, yang ditunjukkan melalui nilai standard deviation sebesar 2,05 pada spesimen original, 0,96 pada spesimen blend-out only, dan 1,27 pada spesimen blend-out with flap-peening. Variasi ini dapat disebabkan oleh heterogenitas mikrostruktur material Aluminium Alloy 2024-T3, perbedaan kecil pada kekasaran/kerataan permukaan akibat proses blend-out, serta sensitivitas metode Rockwell terhadap kondisi permukaan pada area indentasi.

## **2. Pengujian Tarik**

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik pada 3 kondisi spesimen. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan gaya tarik pada spesimen uji hingga spesimen patah. Nilai yang diperoleh dari pengujian ini berupa beban terakhir (beban maksimum) yang dapat diterima spesimen sebelum patah menunjukkan kemampuan material dalam menahan beban sebelum mengalami deformasi plastis dan patah. Pengujian tarik ini menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) GT-7001 – L10/EMERL0034 yang berfungsi untuk mengukur kekuatan tarik maksimum yang dapat diterima oleh spesimen yang diujikan hingga akhirnya patah. Proses pengujian diawali dengan menyalakan daya utama dan seluruh indikator pada alat uji.

Kemudian jepit spesimen pada grip, terlebih dahulu pasangkan bagian atas spesimen dengan posisi yang telah disesuaikan menggunakan pengatur ketinggian (*lower crosshead*) untuk memastikan spesimen terenggam dengan presisi. Setelah itu, tekan

*Load Button* untuk mengaktifkan pompa, lalu katup aliran diputar searah jarum jam untuk menaikkan meja pengujian. Saat nilai beban mulai muncul dan stabil pada indikator, katup kembali ditutup. Operator kemudian mengatur satuan beban dan mode pengujian yang sesuai, memasukkan data memuat tanggal pengujian, luas penampang spesimen uji, dan tekan *Area Start Button* untuk memulai pengujian. Alat uji akan menarik spesimen hingga putus, dan hasil pengujian dapat langsung dicetak. Langkah-langkah di atas dapat diulang untuk setiap spesimen uji untuk mendapatkan data yang dibutuhkan dalam membandingkan nilai-nilai yang didapatkan masing-masing spesimen uji.



Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

**Gambar 4. Kondisi Spesimen Pasca Uji Tarik**

**Error! Reference source not found.** merupakan spesimen pasca uji tarik yang menunjukkan daerah patahan yang diperoleh dari uji tarik, dari pengujian tersebut maka didapatkan data hasil pengujian sebagai berikut pada Tabel 2

**Tabel 2. Data Hasil Uji Tarik**

| No. | CONDITION                   | MAX LOAD (KG) | MAX LOAD (N) |
|-----|-----------------------------|---------------|--------------|
| (a) | Original                    | 946,04        | 9271,16      |
| (b) | Blend-Out Only              | 859,47        | 8422,81      |
| (c) | Blend-Out with Flap-Peening | 929,64        | 9110,44      |

Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

Berdasarkan data hasil uji tarik berupa nilai beban terakhir (beban maksimum) yang dapat diterima material sebelum patah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, data tersebut kemudian dapat diolah menggunakan rumus Persamaan **Error! Reference source not found.**) untuk mendapatkan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS). Namun terlebih dahulu menghitung luas penampang spesimen ( $A_0$ ) dengan rumus Persamaan **Error! Reference source not found.**), oleh karena ukuran yang seragam maka untuk n

ilai dari luas penampang ketiga spesimen adalah sama. Untuk menghitung luas penampang dari spesimen. Ketentuan Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Tarik, adapun data yang digunakan yaitu *width* (*w*) dengan nilai 12,5 mm dan *thickness* (*t*) dengan nilai 1,7 mm.

Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) didapatkan dari perhitungan dari masing-masing kondisi spesimen ditunjukkan pada Tabel 3 yang menyajikan data beban maksimum (*max load*) yang dapat diterima setiap spesimen selama dilakukan uji tarik, serta nilai UTS. Pada spesimen original, diperoleh gaya maksimum sebesar 9271,16 N dengan nilai UTS sebesar 436,29 MPa. Sementara untuk spesimen *Blend-Out Only* (*without flap-peening*) menunjukkan penurunan nilai kekuatan tarik dengan beban maksimum yang dapat diterima hanya sebesar 8422,81 N dengan nilai UTS sebesar 396,37 MPa. Sedangkan Spesimen *Blend-Out with Flap-Peening* dengan pengaplikasian *flap-peening* ini menunjukkan adanya peningkatan nilai kekuatan tarik dengan menunjukkan beban maksimum yang dapat diterima sebesar 9110,44 N dengan nilai UTS sebesar 428,73 MPa.

**Tabel 3. Data Nilai *Ultimate Tensile Strength***

| No. | CONDITION                   | MAX LOAD (N) | UTS (MPa) |
|-----|-----------------------------|--------------|-----------|
| (a) | Original                    | 9271,16      | 436,29    |
| (b) | Blend-Out Only              | 8422,81      | 396,37    |
| (c) | Blend-Out with Flap-Peening | 9110,44      | 428,73    |

Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

**Analisis Hasil Pengujian**

Pada bagian ini penulis ingin membahas lebih lanjut hasil pengujian kekerasan *Rockwell Hardness Test Scale B* dan uji tarik dari spesimen Aluminium alloy 2024-T3 pada tiga kondisi spesimen yang berbeda, yaitu kondisi original (tanpa perlakuan), *blend-out only* (*without flap-peening*), dan *blend-out with flap-peening*. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas atau pengaruh dari pengaplikasian *flap-peening* dalam mengembalikan atau bahkan meningkatkan sifat mekanik material setelah mengalami degradasi material.

**1. Hasil dan Interpretasi Pengujian *Rockwell Hardness Test***

Berdasarkan Tabel 1 didapatkan hasil pengujian dari ketiga kondisi spesimen menggunakan metode kekerasan *Rockwell Hardness Test Scale B* (HRB) menunjukkan bahwa spesimen pada kondisi original memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 76,30 HRB. Sedangkan pada spesimen yang mengalami degradasi pasca *blend-out*, nilai kekerasannya menurun dengan rata-rata sebesar 69,80 HRB, hal ini dapat dimaklumi karena spesimen melalui proses *blend-out* (pengikisan) pada permukaan spesimen. Sementara untuk spesimen uji yang dikenakan tindakan berupa *flap-peening* menunjukkan peningkatan nilai kekerasan rata-rata dibandingkan dengan spesimen *blend-out only (without flap-peening)* sebesar 74,87 HRB walaupun tidak sebesar nilai kekerasan rata-rata yang diperoleh spesimen original (tanpa perlakuan). Hal ini menunjukkan bahwa pengaplikasian *flap-peening* berhasil mengembalikan tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*), meskipun belum sepenuhnya menyamai kondisi original. Secara teknis, hal ini disebabkan oleh terbentuknya tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*).

## 2. Hasil dan Interpretasi Pengujian Tarik

Berdasarkan Tabel 2 berupa nilai beban maksimum ( $P_{max}$ ) yang dapat diterima material sebelum mengalami fraktur, selanjutnya dapat diolah untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik (*Ultimate Tensile Strength*) yang ditunjukkan pada Tabel 3 didapatkan hasil pengujian tarik dari ketiga kondisi spesimen yang diujikan, maka diperoleh gambaran kuantitas beban maksimum yang dapat diterima oleh spesimen sebelum mengalami kerusakan (patah) yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai UTS masing-masing spesimen. Pada spesimen original (tanpa perlakuan), kekuatan tarik yang mencapai 436,29 MPa. Sedangkan pada spesimen *blend-out only (without flap-peening)* nilai tarik turun mencapai 396,37 MPa yang menandakan adanya penurunan kemampuan struktural akibat degradasi material. Sementara pada spesimen *blend-out with flap-peening* nilai kekuatan tariknya meningkat dibandingkan dengan spesimen *blend-out only (without flap-peening)* sebesar 428,73 MPa meskipun tidak sebesar nilai kekuatan tarik maksimum yang dapat diterima oleh spesimen original. Hal ini menunjukkan bahwa pengaplikasian *flap-peening* mampu meningkatkan daya tahan material secara signifikan dengan memperkuat permukaan dan menunda terjadinya propagasi retak akibat tegangan.

## 3. Perbandingan Nilai Kekerasan Tiga Kondisi Spesimen

Berdasarkan hasil yang didapatkan melalui pengujian kekerasan *Rockwell Hardness Test Scale B*, maka dapat dirumuskan perbandingan nilai kekerasan dari ketiga kondisi spesimen yang dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 4 berikut ini.

**Tabel 4. Perbandingan Nilai Kekerasan Ketiga Kondisi Spesimen**

| No  | Kondisi Spesimen            | Kekerasan (HRB) | Selisih dari Original | Persentase Penurunan |
|-----|-----------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| (a) | Original                    | 76,30           | -                     | -                    |
| (b) | Blend-Out Only              | 69,80           | -6,50                 | ↓8,52 %              |
| (c) | Blend-Out with Flap-Peening | 74,87           | -1,43                 | ↓1,87 %              |

Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).



Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

**Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan (RHT)**

Berdasarkan Tabel 4 dan seperti yang divisualisasikan pada **Error! Reference source not found. 5**, dapat dianalisis bahwa nilai kekerasan dari spesimen original (tanpa perlakuan) memiliki nilai kekerasan (HRB) paling tinggi sebesar 76,30 karena tidak mengalami degradasi permukaan. Kondisi spesimen *blend-out only (without flap-peening)* mengalami penurunan nilai kekerasan yang cukup signifikan sebesar 69,80 (sekitar 8,52 %) sebab mengalami degradasi lapisan permukaan tanpa adanya tindakan perbaikan. Sedangkan pada spesimen *blend-out with flap-peening* memiliki nilai kekerasan yang lebih unggul dibandingkan dengan kondisi spesimen *blend-out only (without flap-peening)* dan hanya berselisih 1,87 % lebih rendah dibandingkan dengan kondisi spesimen original (tanpa perlakuan) dengan nilai kekerasan sebesar 74,87. Hal

ini menunjukkan bahwa pengaplikasian *flap-peening* mampu mengembalikan tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*) yang hilang akibat degradasi permukaan pada spesimen. Untuk meningkatkan kejelasan visualisasi, grafik perbandingan nilai kekerasan (Gambar 5) dapat ditambahkan error bar yang merepresentasikan standard deviation dari tiga titik pengujian pada masing-masing spesimen, sehingga pembaca dapat melihat tingkat sebaran data dan homogenitas hasil pengujian.

#### 4. Perbandingan Nilai Kekuatan Tiga Kondisi Spesimen

Berdasarkan hasil yang didapatkan melalui pengujian tarik, maka dapat dirumuskan perbandingan nilai kekuatan tarik dari ketiga kondisi spesimen yang dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 5 berikut ini.

**Tabel 5. Perbandingan Nilai UTS Ketiga Kondisi Spesimen**

| No. | Kondisi Spesimen                   | UTS (MPa) | Selisih dari Original | Persentase Penurunan |
|-----|------------------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|
| (a) | Original                           | 436,29    | -                     | -                    |
| (b) | <i>Blend-Out Only</i>              | 396,37    | -39,92                | ↓9,15 %              |
| (c) | <i>Blend-Out with Flap-Peening</i> | 428,73    | -7,56                 | ↓1,73 %              |

Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).



Sumber: Data Penelitian Penulis (2025).

**Gambar 6. Grafik Perbandingan *Ultimate Tensile Strength* (UTS)**

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** 5 dan divisualisasikan pada Gambar 6, dapat dianalisis bahwa nilai kekuatan tarik dari spesimen original (tanpa

perlakuan) memiliki nilai UTS (MPa) paling tinggi sebesar 436,29 MPa karena tidak mengalami degradasi permukaan. Kondisi spesimen *blend-out only (without flap-peening)* mengalami penurunan nilai kekerasan yang cukup signifikan sebesar 396,37 MPa (sekitar 9,15 %) sebab mengalami degradasi lapisan permukaan tanpa adanya tindakan perbaikan. Sedangkan pada spesimen *blend-out with flap-peening* memiliki nilai kekuatan tarik yang lebih unggul dibandingkan dengan kondisi spesimen *blend-out only (without flap-peening)* dan hanya berselisih 1,73 % lebih rendah dibandingkan dengan kondisi spesimen original (tanpa perlakuan) dengan nilai kekuatan tarik sebesar 428,73 MPa.

Hal ini menunjukkan bahwa pengaplikasian *flap-peening* mampu mengembalikan tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*) yang hilang akibat degradasi permukaan pada spesimen. Menariknya, nilai UTS spesimen *blend-out with flap-peening* (428,73 MPa) sangat mendekati spesimen original (436,29 MPa), dengan selisih hanya 1,73%. Selisih kecil ini berada dalam kisaran yang dapat diterima dalam praktik engineering untuk restorasi sifat material, sehingga *flap-peening* dapat dinilai efektif dalam mengembalikan kapasitas kekuatan tarik material pasca proses *blend-out*. Sementara itu, error bar pada grafik UTS (Gambar 6) belum dapat ditampilkan karena pengujian tarik dilakukan satu kali untuk setiap kondisi spesimen, sehingga belum tersedia data replikasi untuk menghitung sebaran statistik secara kuantitatif.

### **Implikasi Hasil Pengujian**

Pengaplikasian *flap-peening* pada material *skin* pesawat Airbus 330 Series *frame* 74-78 (Aluminium Alloy 2024-T3) terbukti memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan sifat mekanik material. Teknik ini mampu memperbaiki kualitas permukaan material dengan menciptakan tegangan sisa (*compressive residual stress*). Hal ini didasari dengan hasil pengujian berupa pengujian kekerasan *Rockwell Hardness Test Scale B* dan uji tarik. Hasil ini sangat relevan dalam konteks perawatan dan perbaikan *skin* pesawat berdasarkan SRM, khususnya untuk memperpanjang umur pakai material dan menjaga integritas strukturalnya. Dengan kata lain, pengaplikasian *flap-peening* tidak hanya sekadar prosedur tambahan, tetapi merupakan langkah strategis yang memberikan dampak nyata terhadap keandalan komponen pesawat pasca perbaikan. Selain itu, dampak dari pengaplikasian *flap-peening* ini juga mampu meningkatkan efisiensi waktu

perbaikan pada saat perawatan. Efisiensi waktu perbaikan dapat terjadi karena flap-peening merupakan metode restorasi permukaan yang dapat dilakukan langsung pada area blend-out tanpa memerlukan penggantian panel skin yang lebih luas, sehingga proses perbaikan menjadi lebih sederhana, mengurangi tahapan rework, serta meminimalkan kebutuhan pembongkaran komponen tambahan pada area struktur terkait.

Dari hasil pengujian menggunakan metode *Rockwell Hardness Test Scale B* nilai kekerasan permukaan spesimen *blend-out with flap-peening* meningkat secara signifikan dibandingkan dengan spesimen *blend-out only (without flap-peening)*. Nilai kekerasan rata-rata spesimen *blend-out with flap-peening* mencapai 74,87 HRB, sedangkan *blend-out only (without flap-peening)* hanya menghasilkan 69,80 HRB. Dengan demikian, pengaplikasian *flap-peening* memberikan peningkatan kekerasan mencapai 7,26 % apabila dibandingkan dengan tanpa pengaplikasian *flap-peening*. Sementara itu, hasil pengujian tarik melalui metode uji tarik menunjukkan bahwa spesimen *blend-out with flap-peening* memiliki nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) sebesar 428,73 MPa, sedangkan *blend-out only (without flap-peening)* hanya menghasilkan 396,37 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pengaplikasian *flap-peening* ini mampu menghasilkan peningkatan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) mencapai 8,16 % apabila dibandingkan dengan tanpa pengaplikasian *flap-peening*.

Hasil penelitian ini selaras dengan temuan Abushgair (2017) yang menunjukkan bahwa *flap-peening* mampu meningkatkan kekerasan permukaan material secara nyata melalui pembentukan *compressive residual stress*, sehingga material menjadi lebih tahan terhadap deformasi dan inisiasi retak. Selain itu, hasil ini juga konsisten dengan Shaban et al. (2022) yang melaporkan peningkatan kekerasan mikro serta penurunan risiko propagasi retakan setelah perlakuan *flap-peening* pada paduan aluminium tertentu. Dengan demikian, peningkatan kekerasan sebesar 7,26% dan peningkatan UTS sebesar 8,16% pada penelitian ini memperkuat bahwa flap-peening efektif sebagai metode restorasi sifat mekanik pada skin pesawat pasca blend-out akibat korosi.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh *flap-peening* terhadap kekerasan dan kekuatan tarik material skin pesawat Airbus 330-300 frame 74–78 (Aluminium Alloy 2024-T3). Hasil uji Rockwell Hardness Test menunjukkan nilai kekerasan rata-rata pada kondisi *original*, *blend-out only (without flap-peening)*, dan *blend-out with flap-peening* berturut-turut sebesar 76,30 HRB, 69,8 HRB, dan 74,87 HRB, sehingga flap-peening mampu meningkatkan kekerasan dengan mengembalikan *compressive residual stress* meskipun belum menyamai kondisi original. Hasil uji tarik juga menunjukkan peningkatan kekuatan tarik, dengan nilai pada kondisi *original*, *blend-out only*, dan *blend-out with flap-peening* masing-masing sebesar 436,29 MPa, 396,37 MPa, dan 428,73 MPa.

Perbandingan tiga kondisi ini menunjukkan *blend-out only* mengalami penurunan sifat mekanik akibat degradasi, sedangkan *blend-out with flap-peening* mampu meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik hingga mendekati kondisi original, dengan selisih 1,87% untuk kekerasan dan 1,73% untuk kekuatan tarik, serta meningkatkan UTS sebesar 8,16% dibandingkan *blend-out only*. Penerapan *flap-peening* pada perawatan industri Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) berpotensi meningkatkan keandalan struktur skin pesawat pasca blend-out dan mengurangi risiko propagasi retak lanjutan. Penelitian ini terbatas pada evaluasi sifat mekanik statik, sehingga diperlukan penelitian lanjutan terkait ketahanan fatigue, ketahanan korosi pasca-perlakuan, serta optimasi parameter *flap-peening* pada berbagai tingkat kedalaman *blend-out*.

## DAFTAR REFERENSI

- Abushgair, K. N. (2017). Experimental studies of the effect of flap peening process on aluminum alloys. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 11(1), 173–180.
- Airbus. (2024a). *Structural Repair Manual*. Toulouse, France: Airbus S.A.S.
- Airbus. (2024b, October 1). *Structural Repair Manual, Description Fuselage, General*. Toulouse, France: Airbus S.A.S.
- ASM International. (2000). *Recovery Hopkinson Techniques* (S. R. Lampman, N. Hrivnak, & C. Terman, Eds., Vol. 8). *ASM Handbook*. Materials Park, OH: ASM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM E466-15: Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D.G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Czaban, M. (2018). Aircraft corrosion – Review of corrosion processes and its effects in selected cases. *Fatigue of Aircraft Structures*, 10(1), 5–20.
- Idhartono. (2020). Upaya guru dalam menangani anak Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Pernik: Jurnal PAUD*, 6(1), 12–19.
- Kuzu, C., Pelit, E., & Meral, İ. (2020). A new design of Rockwell–Brinell–Vickers hardness standard machine at UME. *Acta IMEKO*, 9(5), 53–59.
- Punch, K. F. (2013). *Introduction to social research: Quantitative and qualitative approaches* (3rd ed.). Los Angeles: SAGE Publications.
- Shaban, N. A., Alshabatat, N., & Al-Qawabah, S. (2022). Effect of flap peening speed on the surface quality and micro hardness of aircraft aluminum alloys. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(3), 855–862.
- Smith, J. D., & Hasan, M. (2020). Quantitative approaches for the evaluation of implementation research studies. *Psychiatry Research*, 283, 112–115.
- Sudarma, A. F., Fitri, M., & Feriyanto, D. (2022). Experimental investigation on flap peening process of aluminum alloys sheets at various flapping rotational speed. *Social Science Journal*, 12(4), 1588-1595
- Winarni, E. W. (2018). *Teori dan praktik penelitian kuantitatif, kualitatif, PTK, R & D*. Jakarta: Bumi Aksara.