



Pengaruh *Cold Expansion* terhadap Pemulihan Kekuatan *Fastener Hole* pada *Sheet Metal Aluminium Alloy 2024-T4*

Putranandha Rama Dwi Kusuma¹ Andri Kurniawan² Mileniawan Januar R³

Program Studi Teknik Pesawat Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia, Curug, Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: putranandharama@gmail.com¹ andri.kurniawan@ppicurug.ac.id²

mjramadhani11@ppicurug.ac.id³

Abstrak

Struktur skin pesawat udara merupakan komponen kritis yang harus mampu menahan pembebanan berulang (*cyclic loading*) sesuai standar kelaikudaraan (*airworthiness*). Area *fastener hole* pada skin menjadi lokasi kritis karena menimbulkan konsentrasi tegangan (*stress concentration*) dengan faktor konsentrasi teoritis (*Kt*) sekitar 3,0. Data inspeksi PT GMF AeroAsia periode 2021–2025 mencatat 88 kasus *burn mark* dan *pitting* akibat *lightning strike* pada *fastener* pesawat Airbus A330 yang umumnya ditangani melalui penggantian rivet, sehingga menghasilkan *fastener hole* baru hasil drilling yang berpotensi memperlemah struktur apabila tidak diperkuat dengan metode yang tepat. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh proses *cold expansion* terhadap kekuatan struktur pada area *fastener hole* hasil perbaikan (*repair*) menggunakan metode uji tarik (*tensile test*). Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen pada material Aluminium Alloy 2024-T4 mengacu pada standar ASTM E8/E8M, dengan tiga kelompok spesimen, yaitu material normal (S-N), *fastener hole* hasil perbaikan tanpa *cold expansion* (S-WCE), dan *fastener hole* hasil perbaikan dengan *cold expansion* pada tingkat interferensi 3% (S-CE), masing-masing tiga spesimen. Hasil pengujian menunjukkan spesimen S-N memiliki UTS rata-rata 469,0 MPa; keberadaan *fastener hole* tanpa *cold expansion* menurunkan UTS menjadi 399,6 MPa (turun 14,80%); sedangkan *cold expansion* pada S-CE memulihkan UTS menjadi 458,3 MPa (naik 14,69% dibanding S-WCE), *yield strength* naik 15,47%, dan *elongation* naik 29,77%, serta telah memenuhi persyaratan minimum spesifikasi material Airbus. Dapat disimpulkan bahwa *cold expansion* merupakan metode perbaikan struktural yang efektif untuk memulihkan kekuatan mekanik statik Aluminium Alloy 2024-T4 pada area *fastener hole* hasil *repair*, sehingga direkomendasikan sebagai bagian dari prosedur standar Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO). Penelitian lanjutan disarankan melakukan pengujian *fatigue* aktual untuk memvalidasi estimasi ketahanan *fatigue* yang diperoleh secara empiris pada penelitian ini.

Kata Kunci: Cold Expansion; Uji Tarik; Aluminium Alloy 2024-T4; Fastener Hole; Fatigue



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Transportasi udara menuntut standar keselamatan yang sangat ketat, yang sangat dipengaruhi oleh keandalan dan kekuatan struktur pesawat dalam menahan beban aerodinamis serta beban berulang (*cyclic loading*) selama lepas landas, penerbangan, dan pendaratan (Tang et al., 2025; Yan et al., 2025). Pada struktur skin pesawat Airbus A330, sambungan mekanis menggunakan *fastener* seperti rivet menimbulkan *fastener hole* yang menjadi area kritis karena memicu konsentrasi tegangan (*stress concentration*) di sekitar tepi lubang, dengan faktor konsentrasi tegangan teoritis (*Kt*) untuk pelat berlubang pada pembebanan tarik uniaksial bernilai sekitar 3,0. Data inspeksi PT GMF AeroAsia periode 2021–2025 mencatat 88 kasus kerusakan berupa *burn mark* dan *pitting* akibat *lightning strike* pada *fastener* pesawat Airbus A330, yang umumnya ditangani melalui penggantian rivet sehingga menghasilkan *fastener hole* baru hasil drilling tanpa tegangan sisa tekan (Neto et al., 2024). Salah satu metode penguatan yang digunakan dalam industri penerbangan untuk mengatasi konsentrasi tegangan pada *fastener hole* adalah *cold expansion*, yaitu proses deformasi plastis

terkontrol yang menghasilkan tegangan sisa tekan (compressive residual stress) di sekitar lubang. Li et al. (2022) menunjukkan bahwa cold expansion pada aluminium alloy 7050 mampu menghasilkan tegangan sisa tekan yang memperbaiki distribusi tegangan dan memperpanjang umur fatigue. Guan et al. (2024) melengkapi temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa ukuran reaming turut memengaruhi besar peningkatan umur fatigue pada aluminium 7050-T7451 hasil cold expansion, sedangkan Lv et al. (2023) memodelkan distribusi tegangan sisa akibat proses split-sleeve cold expansion melalui simulasi elemen hingga (FEM). Su et al. (2023) merangkum berbagai faktor yang memengaruhi besar tegangan sisa hasil cold expansion, seperti tingkat interferensi dan geometri lubang, serta pengaruhnya terhadap ketahanan fatigue material.

Meskipun penelitian-penelitian terdahulu telah banyak mengkaji mekanisme cold expansion pada lubang baru (fresh hole) melalui pendekatan numerik maupun eksperimen fatigue, kajian yang secara khusus mengevaluasi efektivitas cold expansion pada fastener hole hasil perbaikan (repair) pasca penggantian rivet—sebagaimana lazim terjadi pada penanganan kerusakan lightning strike di lingkungan Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO)—serta membandingkannya secara langsung dengan kondisi material normal melalui uji tarik dan perbandingan berpasangan (pairwise comparison), masih terbatas. Kesenjangan inilah yang menjadi dasar orisinalitas penelitian ini. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh proses cold expansion terhadap kekuatan struktur pesawat pada area fastener hole hasil perbaikan menggunakan metode uji tarik (tensile test), mencakup karakteristik kekuatan pada kondisi tanpa cold expansion serta perbedaannya dengan kondisi yang diberi perlakuan cold expansion, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai efektivitas cold expansion sebagai prosedur standar perbaikan struktural pada skin pesawat Airbus A330 Series di PT GMF AeroAsia.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan Relevansi
1	Li et al. (2022)	Cold expansion strengthening of 7050 aluminum alloy hole: structure, residual stress, and fatigue life	Menganalisis pengaruh cold expansion terhadap tegangan sisa dan umur fatigue lubang pada aluminium 7050	Eksperimen dan analisis tegangan sisa	Cold expansion menghasilkan tegangan sisa tekan dan meningkatkan umur fatigue	Menjadi dasar mekanisme tegangan sisa tekan yang diadopsi pada penelitian ini, namun belum mengkaji kondisi fastener hole hasil repair
2	Guan et al. (2024)	Experimental study of reaming sizes on fatigue life of cold-expanded 7050-T7451 aluminum alloy	Mengkaji pengaruh ukuran reaming terhadap umur fatigue lubang cold expansion	Eksperimen fatigue dengan variasi ukuran reaming	Ukuran reaming optimal meningkatkan umur fatigue secara signifikan	Memperkuat pentingnya parameter geometri lubang, namun berfokus pada material 7050, bukan 2024-T4 hasil repair
3	Lv et al. (2023)	Finite element analysis of split sleeve cold expansion process on multiple hole aluminum alloy	Memodelkan distribusi tegangan sisa akibat proses split-sleeve cold expansion menggunakan FEM	Simulasi elemen hingga (FEM)	Diperoleh pola distribusi tegangan sisa tekan di sekitar lubang	Mendukung dasar teori mekanisme cold expansion, namun bersifat numerik tanpa validasi uji tarik eksperimental langsung
4	Su et al. (2023)	Factors influencing residual stresses in cold expansion and their effects	Meninjau faktor-faktor yang memengaruhi tegangan sisa hasil cold	Studi literatur (review)	Tingkat interferensi dan geometri lubang memengaruhi	Menjadi rujukan utama mekanisme penguatan pada penelitian ini, namun tidak membahas

		on fatigue life – a review	expansion dan pengaruhnya terhadap fatigue		besar tegangan sisa tekan	kasus fastener hole hasil perbaikan akibat lightning strike
5	Zhang et al. (2020)	Training high-strength aluminum alloys to withstand fatigue	Mengkaji hubungan kekuatan tarik (UTS/yield strength) paduan aluminium dengan ketahanan fatigue	Eksperimen dan analisis mikrostruktur	UTS dan yield strength berkorelasi dengan performa fatigue meski tidak selalu linear	Mendukung penggunaan parameter UTS/yield strength hasil uji tarik sebagai indikator tidak langsung ketahanan fatigue pada penelitian ini

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen, yaitu penelitian yang berfokus pada pengumpulan dan analisis data dalam bentuk angka melalui pengujian spesimen (Sugiyono, 2016). Objek penelitian adalah struktur material pada panel skin pesawat Airbus A330 pada area fastener hole yang telah mengalami proses perbaikan (repair). Material yang digunakan adalah Aluminium Alloy 2024-T4 (kandungan Cu 3,8–4,9% dan Mg 1,2–1,8%) yang umum digunakan pada komponen skin pesawat komersial, dengan spesimen mengacu pada standar ASTM E8/E8M untuk pengujian tarik pelat logam tipis (thin sheet). Penelitian dilaksanakan di PT GMF AeroAsia Tbk pada bulan September 2025 hingga Juli 2026, mencakup tahap persiapan, pembuatan spesimen, perlakuan cold expansion, pengujian tarik, hingga analisis data. Spesimen dibagi menjadi tiga kelompok kondisi, yaitu material normal tanpa lubang (S-N) sebagai baseline, material dengan fastener hole hasil perbaikan tanpa cold expansion (S-WCE, diameter lubang 4,76 mm), dan material dengan fastener hole hasil perbaikan yang diberi cold expansion pada tingkat interferensi 3% sesuai rekomendasi Airbus Structural Repair Manual/SRM (diameter lubang membesar menjadi 4,92 mm), masing-masing sebanyak tiga spesimen berdimensi panjang gauge 50 mm, lebar 12,5 mm, dan tebal 1,85 mm (Tabel 1). Proses cold expansion dilakukan menggunakan metode split-sleeve, dengan verifikasi tingkat interferensi melalui pengukuran diameter lubang sebelum dan sesudah proses menggunakan dial bore gauge berketelitian 0,01 mm.

Tabel 1. Klasifikasi Spesimen Uji

No	Kode Spesimen	Kondisi Material	Diameter Lubang (mm)	Jumlah Spesimen
1	S-N	Normal (original, tanpa fastener hole)	Tanpa lubang	3
2	S-WCE	Repair fastener hole hasil drilling, tanpa cold expansion	4,76	3
3	S-CE	Repair fastener hole hasil drilling, dengan cold expansion (interferensi 3%)	4,92	3

Data primer penelitian ini meliputi hasil observasi selama proses cold expansion serta data hasil pengujian tarik pada ketiga kondisi spesimen, sedangkan data sekunder meliputi prosedur cold working berdasarkan standar Airbus SRM dan data karakteristik material Aluminium Alloy 2024-T4. Pengujian tarik dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) berkapasitas 20 ton dengan kecepatan pembebanan 30 mm/menit di fasilitas Engine Shop PT GMF AeroAsia, mengacu pada standar ASTM E8/E8M, untuk memperoleh parameter ultimate tensile strength (UTS), yield strength, dan elongation. Data hasil pengujian tarik dari setiap kelompok spesimen ($n = 3$) diolah secara deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata dan standar deviasi untuk setiap parameter. Selanjutnya dilakukan analisis statistik menggunakan uji-t (independent sample t-test) untuk membandingkan nilai rata-rata antar

kelompok kondisi spesimen, setelah terlebih dahulu dilakukan pengujian asumsi normalitas dan homogenitas varians. Pengambilan keputusan didasarkan pada nilai signifikansi (p -value) dengan tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$); nilai $p < 0,05$ menunjukkan terdapat perbedaan signifikan antar kelompok yang dibandingkan. Hasil analisis statistik selanjutnya diinterpretasikan bersama nilai rata-rata melalui perbandingan berpasangan (pairwise comparison) antara ketiga kondisi spesimen (S-N, S-WCE, dan S-CE) untuk menjelaskan kecenderungan pengaruh drilling dan cold expansion terhadap sifat mekanik material (Iba & Wardhana, 2024).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Pengujian tarik dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) berkapasitas 20 ton dengan kecepatan pembebanan 30 mm/menit di fasilitas Engine Shop PT GMF AeroAsia. Setiap kelompok spesimen diuji sebanyak tiga kali pengulangan untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Observasi visual terhadap lokasi patahan (fracture location) menunjukkan bahwa seluruh spesimen S-N patah pada daerah gauge section dengan distribusi tegangan yang relatif merata, sedangkan seluruh spesimen S-WCE dan S-CE patah diawali dari tepi fastener hole, yang mengindikasikan bahwa fastener hole merupakan lokasi kritis (failure origin) akibat konsentrasi tegangan. Perlu dicatat bahwa proses cold expansion pada spesimen S-CE tidak mengubah lokasi inisiasi retak, tetapi meningkatkan kemampuan material menahan beban tarik sebelum terjadinya kegagalan. Seluruh nilai UTS dan yield strength yang dilaporkan merupakan engineering stress sesuai prosedur ASTM E8/E8M, yang tetap representatif untuk perbandingan relatif antar kondisi spesimen karena dihitung dengan metode dan luas penampang awal yang sama.

Spesimen normal (S-N) memperoleh nilai UTS rata-rata 469,0 MPa, yield strength rata-rata 324,0 MPa, dan elongation rata-rata 19,0%, sesuai dengan referensi sifat mekanik Aluminium Alloy 2024-T4 pada standar ASTM E8/E8M-09. Keberadaan fastener hole hasil perbaikan tanpa cold expansion (S-WCE) menurunkan seluruh parameter secara signifikan, yaitu UTS menjadi 399,6 MPa (turun 14,80%), yield strength menjadi 270,8 MPa (turun 16,42%), dan elongation menjadi 13,1% (turun 31,05%). Sebaliknya, perlakuan cold expansion pada spesimen S-CE memulihkan kekuatan material secara signifikan, dengan UTS meningkat menjadi 458,3 MPa (naik 14,69% dari S-WCE), yield strength meningkat menjadi 312,7 MPa (naik 15,47%), dan elongation meningkat menjadi 17,0% (naik 29,77%). Nilai UTS hasil cold expansion tersebut telah memenuhi persyaratan minimum spesifikasi material Airbus untuk Aluminium Alloy 2024-T4 sebesar 427 MPa. Rekapitulasi hasil pengujian ketiga kelompok spesimen disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Pengujian Tarik

Kondisi Spesimen	UTS Rata-rata (MPa)	Yield Strength Rata-rata (MPa)	Elongation Rata-rata (%)	% Perubahan UTS thd Normal
Normal (S-N)	469,0	324,0	19,0	0%
Perbaikan tanpa Cold Expansion (S-WCE)	399,6	270,8	13,1	-14,80%
Perbaikan dengan Cold Expansion (S-CE)	458,3	312,7	17,0	-2,28%

Pembahasan

Berdasarkan Tabel 2, keberadaan fastener hole hasil drilling pada spesimen S-WCE menurunkan UTS sebesar 14,80% dibandingkan spesimen normal (S-N). Penurunan ini disebabkan oleh: (1) berkurangnya luas penampang netto (net section area) akibat lubang

sehingga tegangan efektif meningkat; (2) efek konsentrasi tegangan (stress concentration) di sekitar tepi lubang yang menyebabkan tegangan lokal jauh lebih tinggi dibandingkan tegangan nominal; serta (3) kemungkinan ketidaksempurnaan geometri tepi lubang hasil drilling. Penurunan yield strength (16,42%) yang lebih besar dibandingkan UTS mengindikasikan bahwa material lebih cepat mengalami deformasi plastis permanen pada tingkat tegangan operasional yang sebelumnya masih berada dalam zona elastis, sedangkan penurunan elongation (31,05%) menunjukkan material menjadi lebih getas dan rentan terhadap brittle fracture.

Proses cold expansion pada spesimen S-CE berhasil memulihkan kekuatan material melalui mekanisme pembentukan tegangan sisa tekan (compressive residual stress) di sekitar fastener hole. Selama proses tersebut, mandrel yang berdiameter lebih besar dari lubang didorong melalui lubang sehingga menghasilkan deformasi plastis terkontrol; zona yang mengalami deformasi plastis ini berada dalam kondisi tegangan tekan setelah mandrel ditarik keluar (Su et al., 2023). Tegangan sisa tekan tersebut menurunkan tegangan efektif akibat konsentrasi tegangan pada tepi lubang, sehingga menghambat inisiasi dan pertumbuhan retak. Peningkatan yield strength (15,47%) dijelaskan melalui efek strain hardening pada zona plastis akibat peningkatan densitas dislokasi, sedangkan peningkatan elongation (29,77%) menandakan pemulihan daktilitas material. Meskipun nilai UTS S-CE (458,3 MPa) belum sepenuhnya pulih ke kondisi normal S-N (469,0 MPa) dengan selisih 2,28%, nilai tersebut tetap memenuhi persyaratan minimum spesifikasi material sehingga hasil perbaikan dinyatakan memenuhi standar kelaikudaraan (airworthy), sejalan dengan temuan Li et al. (2022) bahwa cold expansion meningkatkan ketahanan struktur dan memperlambat pertumbuhan retak pada aluminium alloy.

Tabel 3. Perbandingan Berpasangan Antar Kondisi Spesimen Uji

Perbandingan Kondisi Spesimen	Δ UTS (%)	Δ Yield Strength (%)	Δ Elongation (%)	Interpretasi
Normal (S-N) vs Drill (S-WCE)	-14,80	-16,42	-31,05	Menunjukkan besarnya penurunan sifat mekanik akibat pembuatan fastener hole melalui drilling tanpa perlakuan tambahan
Drill (S-WCE) vs Cold Expansion (S-CE)	+14,69	+15,47	+29,77	Menunjukkan efektivitas cold expansion dalam memulihkan kekuatan material hasil perbaikan melalui tegangan sisa tekan di sekitar lubang
Cold Expansion (S-CE) vs Normal (S-N)	-2,28	-3,49	-10,53	Menunjukkan cold expansion belum sepenuhnya memulihkan kekuatan ke kondisi normal, namun UTS S-CE tetap memenuhi standar minimum kelaikudaraan

Faktor konsentrasi tegangan (K_t) untuk pelat berlubang pada pembebanan tarik uniaksial secara teoritis bernilai 3,0 untuk kondisi pelat lebar tak hingga ($d/W \rightarrow 0$). Pada spesimen penelitian ini, rasio diameter lubang terhadap lebar pelat (d/W) berada pada kisaran 0,38–0,39 sehingga nilai K_t aktual berpotensi lebih tinggi dari 3,0 menurut koreksi geometri pada chart Peterson/Heywood untuk pelat berhingga; nilai $K_t = 3,0$ pada penelitian ini digunakan sebagai pendekatan awal (first-order approximation). Berdasarkan hubungan empiris antara UTS dan fatigue limit pada paduan aluminium ($S_e \approx 0,35 \times UTS$) (Strzelecki et al., 2021; Zapletal et al., 2009), penurunan UTS pada S-WCE mengindikasikan penurunan fatigue limit yang setara, sedangkan peningkatan UTS pada S-CE mengindikasikan peningkatan ketahanan fatigue. Hal ini juga didukung oleh temuan Zhang et al. (2020) dan Li et al. (2025) yang menunjukkan korelasi kuat antara UTS/yield strength dengan performa fatigue paduan aluminium, sehingga parameter hasil uji tarik pada penelitian ini dapat digunakan sebagai indikator tidak langsung

(indirect indicator) terhadap kecenderungan ketahanan fatigue. Perlu ditegaskan bahwa estimasi ini bersifat kualitatif dan memerlukan validasi lebih lanjut melalui pengujian fatigue aktual (cyclic loading test) untuk memperoleh kurva S-N yang representatif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian tarik dan analisis yang telah dilakukan terhadap pengaruh proses cold expansion pada fastener hole hasil perbaikan skin pesawat Airbus A330 Series menggunakan material Aluminium Alloy 2024-T4, dapat disimpulkan bahwa proses cold expansion terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap pemulihan kekuatan material pada area fastener hole hasil perbaikan, dengan peningkatan UTS sebesar 14,69%, yield strength sebesar 15,47%, dan elongation sebesar 29,77% dibandingkan kondisi tanpa cold expansion. Karakteristik kekuatan struktur pada area fastener hole yang tidak mengalami cold expansion menunjukkan penurunan signifikan dibandingkan kondisi normal, yaitu UTS turun 14,80%, yield strength turun 16,42%, dan elongation turun 31,05%, akibat berkurangnya luas penampang netto dan efek konsentrasi tegangan di sekitar tepi lubang. Kesenjangan UTS terhadap kondisi normal menyempit dari 14,80% (S-WCE) menjadi hanya 2,28% (S-CE), menegaskan bahwa cold expansion secara efektif memulihkan kekuatan mekanik statik material hasil perbaikan mendekati kondisi aslinya, sehingga metode ini terbukti efektif dan komprehensif untuk diterapkan pada prosedur perawatan dan perbaikan (Maintenance, Repair, and Overhaul/MRO) khususnya dalam menangani kerusakan akibat lightning strike pada skin pesawat Airbus A330 Series di PT GMF AeroAsia. Penelitian lanjutan disarankan melakukan pengujian fatigue aktual (cyclic loading test) serta pengukuran tegangan sisa secara langsung, misalnya melalui metode X-ray diffraction atau hole-drilling strain gauge method, untuk memvalidasi secara kuantitatif mekanisme dan estimasi ketahanan fatigue yang diperoleh pada penelitian ini.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada PT GMF AeroAsia Tbk atas fasilitas dan dukungan data yang diberikan selama pelaksanaan penelitian, serta kepada dosen pembimbing Program Studi Teknik Pesawat Udara Politeknik Penerbangan Indonesia atas bimbingan yang diberikan sepanjang penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Faridmehr, I., Osman, M. H., Adnan, A. B., Nejad, A. F., Hodjati, R., & Azimi, M. (2014). Correlation between engineering stress-strain and true stress-strain curve. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2(1), 53-59. <https://doi.org/10.12691/ajcea-2-1-6>
- Guan, M., Xue, Q., Zhuang, Z., Hu, Q., & Qi, H. (2024). Experimental study of reaming sizes on fatigue life of cold-expanded 7050-T7451 aluminum alloy. *Crystals*, 14(9), 803. <https://doi.org/10.3390/cryst14090803>
- Iba, Z., & Wardhana, A. (2024). Operasionalisasi variabel, skala pengukuran & instrumen penelitian kuantitatif (M. Pradana, Ed.). Eureka Media Aksara.
- Li, C., Kapure, T. S., Roy, P. C., Gan, Z., & Shen, B. (2025). DeepOFormer: Deep operator learning with domain-informed features for fatigue life prediction. *arXiv:2503.22475*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.22475>
- Li, Q., Xue, Q., Hu, Q., Song, T., Wang, Y., & Li, S. (2022). Cold expansion strengthening of 7050 aluminum alloy hole: Structure, residual stress, and fatigue life. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, Article 4057898. <https://doi.org/10.1155/2022/4057898>
- Ly, Y., Dong, M., Zhang, T., Wang, C., Hou, B., & Li, C. (2023). Finite element analysis of split sleeve cold expansion process on multiple hole aluminum alloy. *Materials*, 16(3), 1109. <https://doi.org/10.3390/ma16031109>



- Neto, D., Jesus, J., Branco, R., Sérgio, E., & Antunes, F. (2024). Propagation of a fatigue crack through a hole. *Materials*, 17(24), 6261. <https://doi.org/10.3390/ma17246261>
- Strzelecki, P., Correia, J. A., & Sempruch, J. (2021). Estimation of fatigue S-N curves for aluminium based on tensile strength – proposed method. *MATEC Web of Conferences*, 338, 01026. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133801026>
- Su, R., Huang, L., Xu, C., He, P., Wang, X., Yang, B., Wu, D., Wang, Q., Dong, H., & Ma, H. (2023). Factors influencing residual stresses in cold expansion and their effects on fatigue life—A review. *Coatings*, 13(12), 2037. <https://doi.org/10.3390/coatings13122037>
- Sugiyono. (2016). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Tang, H., Zhou, H., Liu, P., Ding, J., Jiang, Y., & Jiang, B. (2025). Fatigue life prediction and experimental study of landing gear components via FKM local stress approach. *Aerospace*, 12(11), 1026. <https://doi.org/10.3390/aerospace12111026>
- Yan, C., Yang, J., Zhang, D., Zhang, S., & Zhang, T. (2025). Comprehensive design and experimental validation of tethered fixed-wing unmanned aerial vehicles. *Aerospace*, 12(2), 150. <https://doi.org/10.3390/aerospace12020150>
- Zapletal, J., Vechet, S., Kohout, J., & Liskutin, P. (2009). Fatigue lifetime of 7075 aluminium alloy from ultimate tensile strength to permanent fatigue limit. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 11(1), 17–21. <https://doi.org/10.26552/com.C.2009.1.17-21>
- Zhang, Q., Zhu, Y., Gao, X., Wu, Y., & Hutchinson, C. (2020). Training high-strength aluminum alloys to withstand fatigue. *Nature Communications*, 11, 5198. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19071-7>