

TINJAUAN LITERATUR: DAMPAK VARIASI PADUAN ALUMINIUM TERHADAP FORMABILITY PADA PROSES DEEP DRAWING

Muhammad Farichin¹, Sri Hastuti^{1*}, Alvin Wahyu Aji Permadi¹ dan Reza Lestyawan¹

¹Teknik Mesin/Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Kota Magelang, Jawa Tengah, Indonesia

*E-mail: hastutisrimesin@untidar.ac.id

ABSTRAK

Proses *deep drawing* merupakan salah satu metode utama dalam pembentukan logam lembaran yang banyak diterapkan pada industri otomotif, kemasan, dan manufaktur ringan. Aluminium dan paduannya banyak digunakan karena memiliki massa jenis rendah dan ketahanan korosi yang baik, namun sering menghadapi keterbatasan dalam hal *formability*. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi paduan aluminium terhadap kemampuan bentuk (*formability*) pada proses *deep drawing* melalui pendekatan studi literatur yang sistematis. Analisis dilakukan dengan meninjau berbagai penelitian eksperimental dan numerik yang membahas pengaruh komposisi paduan, sifat mekanik, mikrostruktur, serta parameter proses seperti temperatur, friksi, anisotropi, dan mekanisme penguatan material terhadap indikator *formability* seperti *Limiting Drawing Ratio* (LDR), *earring*, *wrinkling*, *thinning*, dan *cracking*. Metode tinjauan literatur meliputi tahapan identifikasi sumber, evaluasi kesesuaian tema, serta analisis keterkaitan hasil antar penelitian terdahulu. Hasil kajian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur umumnya meningkatkan *formability* pada paduan aluminium seperti AA5052, AA5754, AA5086, dan seri 6xxx melalui penurunan *flow stress* dan peningkatan *uniform elongation*. Pada paduan berkekuatan tinggi seperti Al–Li AA2198 dan AA7075-T6, *formability* sangat dipengaruhi oleh kondisi friksi dan fenomena pelunakan presipit pada temperatur tinggi. Selain itu, variasi komposisi pada paduan aluminium murni seperti AA1050 dan AA1100 menghasilkan perbedaan anisotropi yang signifikan terhadap pola *earring*. Secara keseluruhan, kajian ini menegaskan bahwa karakteristik intrinsik paduan aluminium serta pengendalian parameter proses yang tepat merupakan faktor kunci dalam menentukan keberhasilan dan kualitas hasil proses *deep drawing*.

Kata kunci: *Aluminium, Formability, Deep Drawing*

1. Pendahuluan

Aluminium merupakan salah satu material yang memiliki peranan penting dalam industri manufaktur modern karena memiliki massa jenis yang rendah, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta kemudahan dalam proses *joining* dan daur ulang. Karakteristik tersebut menjadikan aluminium dan paduannya banyak digunakan dalam bentuk lembaran pada berbagai sektor industri, seperti otomotif, pengemasan, peralatan rumah tangga, elektronik, hingga dirgantara, khususnya untuk komponen ber dinding tipis yang menuntut presisi dimensi dan integritas struktural yang tinggi. Namun demikian, meskipun aluminium memiliki keunggulan sifat fisik dan kimia, material ini masih menghadapi tantangan dalam proses pembentukan akibat keterbatasan kemampuan bentuk (*formability*).

Salah satu metode utama dalam pembentukan logam lembaran adalah proses *deep drawing*. Proses ini dilakukan dengan cara menarik lembaran logam (*blank*) ke dalam *die* menggunakan *punch* sehingga material mengalami deformasi plastis dan membentuk geometri berongga seperti cangkir, tabung, atau wadah silindris. Proses *deep drawing* banyak diterapkan dalam industri karena mampu menghasilkan komponen dengan bentuk kompleks secara efisien dan berulang. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada *formability* material, yaitu kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis tanpa mengalami kegagalan selama proses pembentukan.

Formability pada proses *deep drawing* dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain sifat mekanik dan mikrostruktur material, anisotropi, ketebalan awal lembaran, distribusi tegangan, serta parameter proses seperti gaya penahan (*blank holder force*), kondisi gesekan antara material dan alat pembentuk, kecepatan pembentukan, kondisi pelumasan, dan temperatur. Pada material aluminium, pengendalian faktor-faktor tersebut menjadi lebih kritis karena sifat aluminium yang relatif sensitif terhadap deformasi plastis dan perubahan kondisi proses, sehingga berpotensi menimbulkan cacat seperti *wrinkling*, *earing*, *thinning*, dan *cracking*.

Selain parameter proses, variasi paduan aluminium juga berperan penting dalam menentukan karakteristik formability. Perbedaan komposisi paduan dan mekanisme penguatan yang terjadi menyebabkan setiap seri aluminium memiliki perilaku pembentukan yang berbeda. Aluminium seri 1xxx umumnya memiliki keuletan tinggi namun kekuatan rendah, sehingga rentan terhadap cacat kerutan. Aluminium seri 3xxx dan 5xxx menunjukkan keseimbangan antara kekuatan dan keuletan, sedangkan paduan berkekuatan tinggi seperti aluminium–litium (Al–Li) atau seri 7xxx memiliki formability yang lebih sensitif terhadap kondisi proses akibat dominasi mekanisme penguatan tertentu. Oleh karena itu, pemilihan paduan aluminium yang tepat menjadi aspek penting dalam keberhasilan proses *deep drawing*.

Penelitian mengenai proses *deep drawing* pada material aluminium telah berkembang secara luas, mencakup kajian eksperimental, simulasi numerik, analisis mekanisme deformasi, serta pengaruh parameter proses seperti gaya penahan, kecepatan *punch*, dan temperatur material. Berbagai studi tersebut memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai perilaku aluminium selama proses pembentukan serta strategi untuk meminimalkan terjadinya cacat melalui pengendalian kondisi proses yang tepat. Namun demikian, hasil-hasil penelitian tersebut masih tersebar dan menunjukkan variasi temuan yang dipengaruhi oleh perbedaan jenis paduan dan parameter pembentukan yang digunakan.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu tinjauan literatur yang sistematis untuk menganalisis dan mensintesis hasil penelitian terdahulu terkait pengaruh variasi paduan aluminium terhadap formability pada proses *deep drawing*. Tinjauan ini bertujuan untuk memahami mekanisme

pembentukan material aluminium, mengidentifikasi faktor-faktor utama yang memengaruhi formability, serta membandingkan karakteristik pembentukan antar jenis paduan aluminium. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat menjadi landasan teoritis yang kuat dalam mendukung pemilihan material dan optimasi parameter proses *deep drawing* pada aplikasi industri dan penelitian selanjutnya.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* untuk mengkaji pengaruh variasi paduan aluminium terhadap *formability* pada proses *deep drawing*. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan penelitian terdahulu serta memungkinkan analisis dan sintesis hasil penelitian secara terstruktur.

Proses tinjauan literatur dilakukan melalui beberapa tahapan utama. Tahap pertama adalah pencarian literatur yang relevan dengan topik penelitian, khususnya yang membahas proses *deep drawing* pada material aluminium. Selanjutnya, dilakukan penilaian terhadap kualitas dan kelayakan sumber untuk memastikan bahwa literatur yang digunakan memiliki kredibilitas dan relevansi yang baik. Pada tahap berikutnya, literatur yang terpilih dikelompokkan berdasarkan tema atau topik pembahasan serta keterkaitannya dengan teori dan konsep *formability*. Setelah itu, disusun kerangka pembahasan berdasarkan hasil pengelompokan tersebut, yang kemudian dilanjutkan dengan penulisan dan penyusunan tinjauan pustaka secara sistematis.

Sumber literatur diperoleh dari basis data ilmiah yang umum digunakan dalam bidang teknik, seperti ScienceDirect, Springer, Elsevier, serta jurnal nasional terakreditasi. Artikel yang dikaji dibatasi pada publikasi dalam rentang tahun 2019 hingga 2025 guna menjaga relevansi dan kebaruan informasi. Pencarian literatur dilakukan menggunakan beberapa kata kunci, antara lain *deep drawing*, *aluminium alloy*, *formability*, *wrinkling*, *earring*, dan *warm forming*.

Kriteria inklusi literatur meliputi artikel yang membahas proses *deep drawing* pada aluminium atau paduannya serta menyajikan indikator *formability* secara jelas, seperti *Limiting Drawing Ratio* (LDR), gaya pembentukan, perilaku deformasi, dan jenis cacat pembentukan. Artikel yang tidak secara langsung berkaitan dengan proses *deep drawing* atau tidak memuat pembahasan *formability* dikeluarkan dari kajian. Literatur yang lolos seleksi kemudian dianalisis lebih lanjut dan dikelompokkan berdasarkan jenis paduan aluminium serta karakteristik hasil pembentukannya, termasuk pengaruh sifat mekanik, kondisi proses, dan temperatur terhadap kemampuan deformasi material.

Secara keseluruhan, metode ini digunakan untuk memberikan gambaran yang terstruktur mengenai bagaimana karakteristik berbagai paduan aluminium memengaruhi *formability* pada proses

deep drawing, sekaligus merangkum kecenderungan hasil penelitian terdahulu sebagai dasar pembahasan lebih lanjut.



Gambar 2 *Deep Drawing Machine*

3. Hasil dan pembahasan

A. Formability Aluminium pada Temperatur Tinggi

Artikel berjudul "Proses Deep Drawing Suhu Tinggi: Tinjauan Kritis" ini memberikan pemahaman komprehensif tentang efek kemampuan pembentukan berbagai paduan aluminium ketika dibentuk pada suhu tinggi. Secara umum, telah ditunjukkan bahwa peningkatan suhu mengurangi kekuatan luluh dan meningkatkan perpanjangan seragam, sehingga meningkatkan Rasio Batas Penarikan (LDR) dan mengurangi risiko robek. Pengamatan ini terlihat pada beberapa paduan, seperti AA5754, AA5086, AA6061, dan AA6016, yang menunjukkan peningkatan daktilitas seiring peningkatan suhu pembentukan.

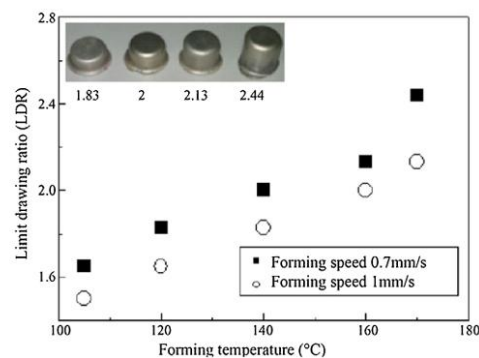


Fig. 14. LDR at different forming temperatures in warm deep drawing of Magnesium alloy sheets [29].

Gambar 3 *Limiting Drawing Ratio (LDR) Magnesium Alloy*

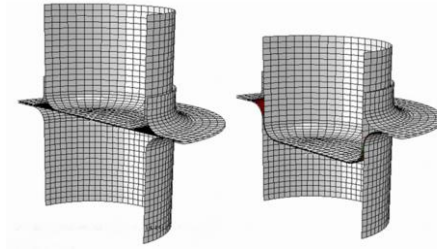
Peningkatan kemampuan pembentukan mungkin disebabkan oleh pelunakan termal struktur kristal aluminium, yang mengurangi resistensi dislokasi, sehingga memungkinkan material mengalir lebih stabil selama proses deep drawing. Lebih lanjut, artikel ini menyoroti bahwa anisotropi merupakan faktor kunci yang memengaruhi kualitas pembentukan, terutama dalam pembentukan kemiringan. Paduan dengan nilai anisotropi normal (ΔR) yang tinggi menunjukkan kemampuan pembentukan yang lebih baik, sedangkan paduan dengan anisotropi planar (ΔR) yang tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak kemiringan besar.

Respons suhu setiap paduan aluminium bervariasi tergantung pada mekanisme pengerasan (pengerasan larutan padat, pengerasan regangan, atau pengerasan presipitasi). Oleh karena itu, ketika memilih suhu yang paling efektif, kondisi temper untuk setiap paduan harus dipertimbangkan untuk menghindari pelunakan yang berlebihan, yang dapat

meningkatkan terjadinya penipisan yang berlebihan. Hasil penelitian ini mendukung teori bahwa variasi pada paduan aluminium memiliki hubungan langsung dengan perilaku kemampuan pembentukannya pada suhu yang berbeda.

B. Pengaruh Gaya Kontak dan Friksi terhadap Formability Al–Li Alloy (AA2198)

Analisis penarikan dalam (deep-drawing) paduan Al–Li (AA2198), paduan berkekuatan tinggi yang penting dalam aplikasi kedirgantaraan, menyoroti kekuatan kontak dan gesekan sebagai parameter penting. Paduan ini menunjukkan modulus elastisitas yang lebih tinggi dan kecenderungan lokalisasi regangan yang lebih besar daripada aluminium konvensional, sehingga menghasilkan sensitivitas yang jauh lebih besar terhadap kondisi gesekan antarmuka.

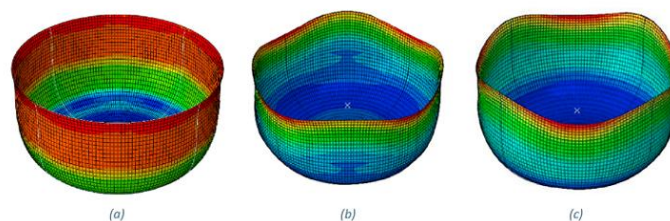


Gambar 4 3D Finite Elemen Analisis

Hasil simulasi FEM secara jelas menunjukkan bahwa koefisien gesekan merupakan faktor kunci yang mengatur dinamika deformasi dan distribusi tegangan. Di satu sisi, gesekan yang berlebihan secara drastis menghambat aliran material, meningkatkan tegangan tarik dan menyebabkan kegagalan sobek akibat penipisan. Di sisi lain, gesekan yang terlalu rendah mencegah penjepitan efektif pemegang benda kerja, sehingga mendorong perkembangan cacat kerutan. Kemampuan pembentukan yang optimal hanya dapat dicapai dalam rentang gesekan menengah, yang secara efektif menyeimbangkan penjepitan material dan kemampuan aliran. Oleh karena itu, penelitian ini memperkuat gagasan bahwa, untuk paduan berkekuatan sedang hingga tinggi, fokus pengendalian proses bergeser dari optimasi geometri (seperti pada seri 1xxx) ke manajemen antarmuka presisi tinggi.

C. Pengaruh Variasi Paduan Aluminium AA1050 dan AA1100 terhadap Fenomena Earing

Artikel berjudul "Investigasi Numerik Pengaruh Radius Sudut Punch dan Radius Bahu Die pada Flange Pending untuk Paduan Aluminium AA1050 dan AA1100" menjelaskan perlakuan kemampuan pembentukan antara dua paduan, AA1050 dan AA1100. Meskipun keduanya adalah aluminium murni, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa bahkan perbedaan komposisi yang kecil dapat menghasilkan perubahan anisotropi yang signifikan, yang berdampak langsung pada pembentukan flange.



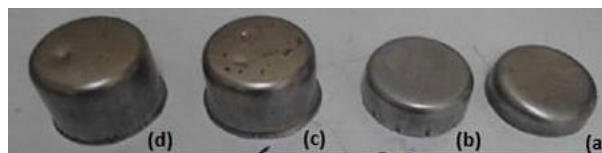
Gambar 5 Numerical simulation of extra deep drawing (a) isotropic behavior, anisotropic behavior: (b) for AA1100 (c) for AA1050

AA1100 mempunyai nilai *planar anisotropy* ΔR positif (≈ 0.295), sehingga menghasilkan empat puncak earing pada arah $\pm 45^\circ$. Dan sebaliknya, AA1050 memiliki ΔR negatif (≈ -0.037) sehingga menghasilkan dua puncak earing utama pada arah 0° dan 90° . Variasi kedua pola ini menunjukkan bahwa orientasi butir hasil proses rolling sangat menentukan arah aliran material selama proses pembentukan logam.

Studi ini juga menunjukkan bahwa perubahan parameter geometris, seperti radius sudut punch dan radius bahu die, dapat memengaruhi tinggi crimp pada kedua paduan. AA1050 cenderung menunjukkan pengurangan tinggi crimp yang lebih signifikan (hingga 5%) dibandingkan dengan AA1100 (sekitar 3%), menunjukkan bahwa AA1050 lebih sensitif terhadap perubahan geometris. Hal ini mungkin menarik, karena dipahami bahwa bahkan paduan yang tampak identik pun dapat menunjukkan perilaku formability yang berbeda karena perbedaan nilai anisotropi dan mikrostruktur.

D. Pengaruh temperatur terhadap formability paduan AA5052-O untuk mengurangi resiko cacat

Pengamatan ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu secara signifikan mengurangi kekuatan pembentukan dalam proses deep drawing panas AA5052-O. Pada suhu ruang, tegangan alir material jauh lebih tinggi, yang dapat menghambat aliran material dan meningkatkan risiko robek. Saat suhu dinaikkan hingga kisaran $160\text{--}240^\circ\text{C}$, grafik kekuatan pembentukan menunjukkan penurunan yang jelas, menunjukkan bahwa material memasuki keadaan pelunakan termal yang meningkatkan kapasitas deformasinya. Pengamatan ini juga didukung oleh hasil simulasi yang menunjukkan pola serupa dalam perubahan kekuatan pembentukan.



Gambar 6 The warm deep-drawn cups at different forming temperatures of (a) 25°C , (b) 80°C , (c) 160°C , and (d) 240°C

Distribusi ketebalan hasil pembentukan menunjukkan bahwa, pada suhu rendah, penipisan terbesar terjadi di area radius punch karena konsentrasi regangan yang tinggi. Namun, pada suhu yang lebih tinggi, material mengalir lebih seragam, sehingga zona penipisan kritis bergeser ke arah dinding cangkir, dan intensitasnya menurun. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu tidak hanya mengurangi gaya pembentukan tetapi juga menghaluskan gradien regangan di sepanjang permukaan cangkir. Fenomena ini konsisten dengan teori pemulihan dinamis aluminium, yang menunjukkan energi kegagalan penumpukan yang tinggi.

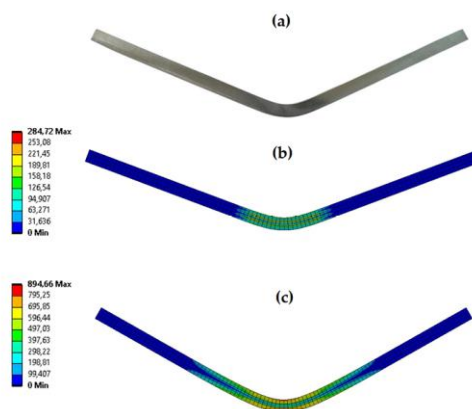
Secara umum, peningkatan suhu telah terbukti meningkatkan kemampuan pembentukan dalam (deep drawability) dari AA5052-O, seperti yang ditunjukkan oleh peningkatan kedalaman cup dan proses deformasi yang stabil. Rasio penarikan batas (limiting draw ratio/LDR) dan tinggi cup meningkat bersamaan dengan penurunan gaya pembentukan, menunjukkan bahwa AA5052-O sangat sensitif terhadap pembentukan pada suhu menengah. Dengan sifat awal yang sudah cukup ulet dan mekanisme penguatan larutan padat, paduan ini telah terbukti ideal untuk proses deep drawing panas, menawarkan kombinasi gaya pembentukan rendah, risiko cacat rendah, dan kualitas geometris yang konsisten.

E. Pengaruh formability paduan aluminium AA7075-T6 yang menyebabkan pelunakan presipit

Penelitian pada paduan AA7075-T6 menunjukkan bahwa paduan ini memiliki ketahanan tinggi terhadap deformasi pada suhu ruang karena pengerasan presipitasi (Zn-Mg-Cu), yang memberikan kekuatan tetapi mengurangi

keuletan. Dalam uji lentur, nilai springback signifikan, menunjukkan bahwa komponen elastis mendominasi selama proses deformasi. Kondisi ini mencerminkan karakteristik umum paduan AA7075-T6 dalam proses pembentukan, termasuk deep drawing, yaitu kecenderungan terhadap patahan dini dan penurunan fluiditas dingin material.

Suhu memainkan peran penting dalam mengurangi nilai springback dan meningkatkan deformabilitas paduan ini. Peningkatan suhu dapat menyebabkan pelunakan endapan penguat, yang mengakibatkan kekuatan luluh yang lebih rendah dan deformasi plastis yang lebih mudah. Analisis ANOVA dalam penelitian ini menunjukkan bahwa suhu berkontribusi hampir 20% terhadap variasi nilai springback, sedangkan faktor geometris seperti radius tekukan dan ketebalan memiliki pengaruh yang lebih besar. Pengaruh gabungan dari parameter-parameter ini menegaskan bahwa AA7075-T6 hanya dapat mencapai deformasi yang stabil jika proses dilakukan pada suhu yang lebih tinggi.



Gambar 7 Simulasi Bending Test Pada Paduan AA7075-T6 (Sumber: Springback Behavior of AA 7075-T6 Alloy in V-Shaped Bending)

Penelitian ini relevan dengan teori pembentukan logam berkekuatan tinggi, yang menyatakan bahwa paduan berbasis presipitasi, seperti seri 7xxx, memerlukan kondisi pemanasan untuk mengurangi deformasi lokal dan risiko robek. Meskipun penelitian ini berfokus pada proses pembengkokan, perilaku material yang diamati sangat mencerminkan karakteristik paduan 7075 dalam proses deep drawing: sulit dibentuk pada suhu ruang, sensitif terhadap geometri alat, dan dengan kemampuan bentuk optimal hanya pada suhu tinggi. Oleh karena itu, AA7075-T6 termasuk dalam kategori paduan yang sulit dibentuk yang memerlukan kontrol proses yang ketat untuk mencapai kualitas pembentukan yang baik.

4. Kesimpulan

1. Formability material aluminium pada proses pembentukan logam dengan metode deep drawing sangat dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing paduan sehingga tidak dapat digeneralisasi antar paduan.
2. Paduan seperti AA5754, AA5086, dan seri 6xxx menunjukkan peningkatan formability pada temperatur tinggi, namun setiap paduan memiliki batas temperatur optimum yang berbeda.
3. Pada paduan Al-Li AA2198, friksi menjadi faktor dominan dikarenakan nilai friksi yang tidak sesuai dapat menyebabkan tearing atau wrinkling, serta menunjukkan sensitivitas friksi yang lebih tinggi dibanding paduan aluminium pada umumnya.
4. Perbedaan komposisi pada paduan AA1050 dan AA1100 menghasilkan variasi anisotropi yang memengaruhi pola tearing, sehingga kualitas geometri hasil deep drawing bergantung pada karakter orientasi butir.

5. Keseluruhan proses keberhasilan pembentukan logam melalui metode deep drawing ditentukan oleh kombinasi karakter paduan aluminium dan pengaturan parameter proses yang tepat.

Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ir. Sri Hastuti, S.T., M.T. yang telah membimbing kelompok kami dalam menyusun artikel literatur.

Daftar Pustaka

- [1] Ashtiani, H. R. R., & Arjenki, M. G. (2020). *Experimental and Numerical Investigation of Warm Deep Drawing Process of AA5052 Aluminum Alloy*. 7(2), 56–69.
- [2] Boucha, K., Ghanameh, M. F., Faqir, M., Mada, M., & Essadiqi, E. (2021). *Heliyon Numerical investigation of the effect of punch corner radius and die shoulder radius on the flange earring for AA1050 and AA1100 aluminum alloys in cylindrical deep drawing process*. 7(March). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06662>
- [3] Bouchaâla, K., Ghanameh, M. F., Faqir, M., & Mada, M. (2020). ScienceDirect Available ScienceDirect ScienceDirect Evaluation of the Effect of Contact and Friction on Deep Drawing Evaluation of Analysis the Effect of Lightweight Contact and Aluminum Friction on Lithium Deep Drawing Formability for Alloy Formability A. *Procedia Manufacturing*, 46(2019), 623–629. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.089>
- [4] Cahyono, E. A., Sutomo, A. H. (2019). © 2019 Jurnal Keperawatan. *Literatur Review ; Panduan Penulisan Dan Penyusunan. Jurnal Keperawatan*, 12(2).
- [5] Chhikara, S., Khatta, R., Verma, S. P., & Shamrao, D. M. (2020). *Review on Sheet Metal Formability*. 8(2), 138–143. <https://doi.org/10.51976/ijari.822024>
- [6] El-aty, A. A., Xu, Y., Guo, X., Zhang, S., Ma, Y., & Chen, D. (2018). Strengthening mechanisms , deformation behavior , and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys : A review. *Journal of Advanced Research*, 10, 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.12.004>
- [7] Gao, Y., Li, H., Zhao, D., Wang, M., & Fan, X. (2024). *Advances in friction of aluminium alloy deep drawing*. 12(3), 396–427.
- [8] Hama, T., Hirayama, K., Yamamoto, J., Maeda, Y., & Maeda, Y. (2025). Results in Materials Predictive accuracy of crystal-plasticity analyses for three-dimensional equal-plastic work contours in a 6000 series aluminum alloy sheet. *Results in Materials*, 28(September), 100799. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100799>
- [9] Ikumapayi, O. M., Afolalu, S. A., Kayode, J. F., Kazeem, R. A., & Akande, S. (2022). Materials Today : Proceedings A concise overview of deep drawing in the metal forming operation. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3233–3238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.221>
- [10] Karakaya, Ç. (2025). *Springback Behavior of AA 7075-T6 Alloy in V-Shaped Bending*.
- [11] Takalkar, A. S., Babu, L., & Chinnapandi, M. (2019). CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Deep drawing process at the elevated temperature : A critical review and future research directions. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.08.002>
- [12] You, X., Xing, Z., Jiang, S., Zhu, Y., Lin, Y., Qiu, H., Nie, R., Yang, J., Hui, D., Chen, W., & Chen, Y. (2024). Developments in the Built Environment A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering. *Developments in the Built Environment*, 17(September 2023), 100319. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100319>