

Pengaruh Kecepatan Putar *Spindle* terhadap Perilaku Deformasi, Uniformitas Ketebalan, dan Kualitas Permukaan pada Proses *Metal Spinning*

Slamet Khoeron^{*1}, Akhmad Zidni Hudaya², Adam Wahyu Prakarsa³, Qomaruddin⁴, Taufiq Hidayat⁵, Muhammad Luqman Saiful Fikri⁶

^{1,2,3,4,5,6}Teknik Mesin Universitas Muria Kudus, Indonesia

Email: ¹slamet.khoeron@umk.ac.id, ²akhmad.zidni@umk.ac.id, ³202154051@std.umk.ac.id, ⁴qomaruddin@umk.ac.id, ⁵taufiq.hidayat@umk.ac.id, ⁶luqman.fikri@umk.ac.id

Abstrak

Proses *metal spinning* merupakan metode pembentukan logam yang banyak digunakan untuk menghasilkan komponen berbentuk simetris dengan efisiensi material tinggi. Namun, kualitas produk yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh parameter proses, khususnya kecepatan putar spindle, yang berpengaruh terhadap distribusi ketebalan, deformasi plastis, dan kekasaran permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan putar spindle terhadap perilaku deformasi, uniformitas ketebalan, distribusi *thinning*, dan kualitas permukaan pada proses *metal spinning* Aluminium 1100 serta menentukan kondisi proses optimum. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dengan variasi kecepatan 320 rpm, 500 rpm, 900 rpm, dan 1120 rpm. Pengukuran ketebalan dilakukan pada lima titik pengamatan (T1–T5), sedangkan kualitas permukaan dievaluasi menggunakan parameter kekasaran permukaan (*Ra*). Analisis data dilakukan menggunakan parameter statistik berupa rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi, serta didukung analisis regangan sejati, model Hollomon, dan *Forming Limit Diagram* berbasis model Marciniak–Kuczynski. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan 900 rpm menghasilkan distribusi deformasi paling homogen dengan ketebalan rata-rata sebesar 0,88 mm dan nilai koefisien variasi terendah sebesar 4,59%. Sementara itu, kecepatan 1120 rpm menghasilkan kualitas permukaan terbaik dengan nilai *Ra* sebesar 1,32 μm , namun meningkatkan *thinning* hingga 28% pada titik kritis T3. Berdasarkan keseluruhan hasil, kecepatan 900 rpm direkomendasikan sebagai kondisi optimum karena memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas deformasi, uniformitas ketebalan, dan kualitas permukaan.

Kata kunci: Aluminium 1100, Deformasi Plastis, Kekasaran Permukaan, Metal Spinning, Spindle Speed, Thinning.

Effect of Spindle Speed on Deformation Behavior, Thickness Uniformity, and Surface Quality in Metal Spinning Process

Abstract

*Metal spinning is a metal forming process widely used to produce axisymmetric components with high material efficiency. However, product quality is strongly influenced by process parameters, particularly spindle speed, which affects thickness distribution, plastic deformation, and surface roughness. This study aims to analyze the effect of spindle speed variation on deformation behavior, thickness uniformity, thinning distribution, and surface quality in the metal spinning process of Aluminum 1100 and to determine the optimum process condition. The research employed a quantitative experimental approach using spindle speed variations of 320 rpm, 500 rpm, 900 rpm, and 1120 rpm. Thickness measurements were conducted at five observation points (T1–T5), while surface quality was evaluated using surface roughness (*Ra*) parameters. Data analysis was performed using statistical parameters including mean, standard deviation, and coefficient of variation, supported by true strain analysis, the Hollomon model, and the Marciniak–Kuczynski-based Forming Limit Diagram. The results showed that a spindle speed of 900 rpm produced the most homogeneous deformation distribution with the highest average thickness of 0.88 mm and the lowest coefficient of variation of 4.59%. Meanwhile, a spindle speed of 1120 rpm generated the best surface quality with a surface roughness value of 1.32 μm , but increased thinning up to 28% at the critical point T3. Overall, the spindle speed of 900 rpm is recommended as the optimum condition because it provides the best balance between deformation stability, thickness uniformity, and surface quality.*

Keywords: *Aluminum 1100, Metal Spinning, Plastic Deformation, Spindle Speed, Surface Roughness, Thinning.*

1. PENDAHULUAN

Proses pembentukan logam (*metal forming*) merupakan salah satu metode manufaktur yang banyak digunakan untuk menghasilkan komponen dengan geometri kompleks melalui mekanisme deformasi plastis. Salah satu proses yang berkembang luas dalam kategori ini adalah *metal spinning*, yaitu proses pembentukan logam lembaran berbasis rotasi di mana benda kerja dijepit pada mandrel dan diputar pada kecepatan tertentu, kemudian mengalami deformasi akibat gaya tekan lokal dari roller yang bergerak secara aksial maupun radial [1]. Proses ini banyak diaplikasikan pada industri otomotif, peralatan rumah tangga, aerospace, hingga komponen dekoratif karena mampu menghasilkan produk simetris dengan efisiensi material yang tinggi, biaya tooling relatif rendah, serta kualitas permukaan yang baik.

Secara mekanis, *metal spinning* diklasifikasikan sebagai *axisymmetric incremental forming*, di mana deformasi terjadi secara bertahap melalui kontak kontinu antara tool dan benda kerja. Selama proses berlangsung, material mengalami distribusi tegangan tiga dimensi yang kompleks yang terdiri atas tegangan radial (σ_r), tegangan tangensial atau melingkar (σ_θ), dan tegangan aksial (σ_z). Kombinasi tegangan tekan dan geser tersebut menyebabkan terjadinya aliran plastis yang mengikuti kontur mandrel [2]. Pada material lembaran tipis, pendekatan *plane stress* umumnya digunakan untuk menganalisis deformasi karena tegangan pada arah ketebalan relatif lebih kecil dibandingkan dua arah lainnya [3].

Fenomena penting dalam proses *metal spinning* adalah terjadinya penipisan ketebalan (*thickness reduction*) akibat konservasi volume selama deformasi plastis. Hubungan antara regangan sejati (*true strain*) dan perubahan ketebalan dapat dijelaskan melalui pendekatan logaritmik, di mana penurunan ketebalan berbanding lurus dengan peningkatan regangan plastis [4]. Distribusi penipisan tersebut umumnya tidak seragam karena dipengaruhi oleh gradien deformasi, geometri mandrel, serta kondisi kontak antara roller dan material [5], [6]. Ketidakteraturan distribusi *thinning* dapat menyebabkan terjadinya konsentrasi regangan lokal yang berpotensi memicu kegagalan deformasi seperti *necking* maupun retak.

Selain distribusi deformasi, kualitas permukaan produk juga menjadi parameter penting dalam evaluasi hasil proses pembentukan. Kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada proses *metal spinning* dipengaruhi oleh interaksi tribologis antara roller dan material, yang melibatkan gaya gesek, pelumasan, adhesi, dan abrasi mikro pada area kontak [7]. Pada kondisi tertentu, deformasi plastis berulang dapat menghasilkan efek *surface smoothing* akibat perataan asperitas permukaan. Namun, apabila proses berlangsung tidak stabil, dapat muncul cacat permukaan berupa gelombang (*surface waviness*) maupun peningkatan kekasaran permukaan [1], [8], [9].

Karakteristik deformasi dan kualitas permukaan tersebut sangat dipengaruhi oleh parameter proses, terutama kecepatan putar spindle (*spindle speed*). Kecepatan putar berpengaruh langsung terhadap *strain rate*, temperatur kontak, dan kestabilan interaksi antara roller dengan benda kerja. Peningkatan kecepatan putar umumnya meningkatkan tegangan alir (*flow stress*) material akibat peningkatan *strain rate* [8]. Namun, pada kondisi tertentu, panas akibat gesekan dapat memicu *thermal softening* yang menurunkan resistansi deformasi material [6], [7]. Secara kinematik, peningkatan kecepatan putar juga meningkatkan frekuensi kontak antara roller dan permukaan benda kerja sehingga mempengaruhi distribusi regangan plastis dan homogenitas deformasi [3], [6], [9].

Pada kecepatan rendah, deformasi cenderung berlangsung tidak kontinu sehingga distribusi regangan menjadi kurang homogen. Sebaliknya, pada kecepatan tinggi, deformasi dapat berlangsung lebih merata, tetapi berpotensi menimbulkan ketidakstabilan dinamis berupa getaran dan *chatter*. Fenomena ini dapat menyebabkan munculnya pola gelombang pada permukaan serta meningkatkan variasi distribusi ketebalan [9]. Oleh karena itu, pemilihan parameter kecepatan putar menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas akhir produk hasil *metal spinning*.

Berbagai penelitian telah membahas pengaruh parameter proses pada metal spinning, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada evaluasi geometrik atau kualitas permukaan secara terpisah [10]. Kajian yang secara simultan menghubungkan distribusi *thinning*, stabilitas deformasi plastis, *strain hardening* behavior, dan evaluasi batas formabilitas berbasis Marciniak–Kuczynski untuk Aluminium 1100 pada rentang spindle speed yang berbeda masih sangat terbatas. Selain itu, hubungan *trade-off* antara homogenitas deformasi dan kualitas permukaan pada proses spinning konvensional belum banyak dibahas secara kuantitatif menggunakan parameter statistik berbasis *coefficient of variation*.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan putar spindle terhadap perilaku deformasi, uniformitas ketebalan, distribusi *thinning*, dan kualitas permukaan pada proses *metal spinning* Aluminium 1100. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menentukan kondisi proses optimum berdasarkan evaluasi statistik distribusi ketebalan, analisis regangan, model Hollomon, serta *Forming*

Limit Diagram berbasis model Marciniak–Kuczynski. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan parameter proses *metal spinning* untuk meningkatkan kualitas produk dan meminimalkan risiko kegagalan deformasi.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian kuantitatif ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan putar (320, 500, 900, dan 1120 rpm) terhadap perilaku deformasi dan kualitas produk pada proses *metal spinning* aluminium 1100. Parameter yang diamati mencakup ketebalan dinding, persentase penipisan (*thinning*), dan kekasaran permukaan (*Ra*). guna mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antara variabel bebas dan karakteristik produk [11]–[14]. Kecepatan putar dipilih sebagai variabel utama karena signifikansinya terhadap distribusi deformasi plastis, sementara variabel lain seperti geometri *tool* dan kondisi pelumasan dikendalikan secara ketat [15]. Dengan desain *post-test only* dan pengulangan eksperimen untuk meningkatkan reliabilitas data, penelitian ini bertujuan menentukan kondisi optimum yang menyeimbangkan integritas material dan kualitas permukaan [16].

2.1. Peralatan, Bahan, dan Setup Eksperimen

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan kebutuhan pengukuran parameter deformasi dan kualitas permukaan secara akurat selama proses *metal spinning*. Spesifikasi utama dan fungsi masing-masing peralatan eksperimen ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi dan Fungsi Peralatan Eksperimen

No	Alat	Fungsi Utama	Ketelitian/Spesifikasi
1	Mesin <i>metal spinning</i>	Sarana utama proses pembentukan logam	Tipe Konvensional/CNC
2	Mikrometer sekrup	Mengukur ketebalan dinding produk	0,01 mm
3	<i>Surface roughness tester</i>	Mengukur parameter kekasaran permukaan (<i>Ra</i>)	μm
4	Jangka sorong	Mengukur dimensi awal <i>blank</i> dan diameter	0,05 mm
5	Takometer digital	Verifikasi kecepatan putar <i>spindle</i> secara <i>real-time</i>	rpm

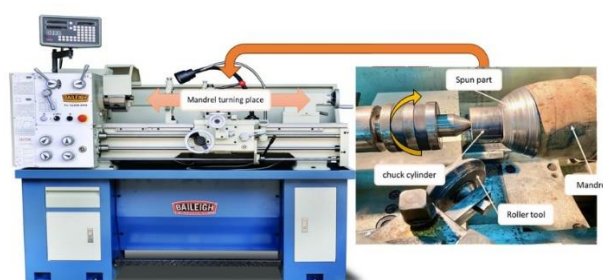
Plat Aluminium 1100 berbentuk *blank* lingkaran yang dideformasi menjadi geometri mangkuk (*cup shape*). Pemilihan material ini didasarkan pada karakteristik *formability* (mampu bentuk) yang sangat baik, yang memungkinkan material mengalami deformasi plastis ekstrim tanpa mengalami kegagalan struktural seperti retak (*cracking*) atau sobek (*tearing*) [17], [18]. Selain itu, sifat lunak dari Aluminium 1100 menjadikannya ideal untuk mengkaji aliran material dan distribusi ketebalan di bawah pengaruh parameter kecepatan putar yang bervariasi [19].

Tabel 2. Parameter Proses Metal Spinning

Parameter	Nilai / Spesifikasi
Material benda kerja	Aluminium 1100
Bentuk blank	Circular blank
Diameter blank	200 mm
Ketebalan awal blank (t_0)	1 mm
Diameter mandrel	100 mm
Geometri produk	Cup shape
Jenis proses	Conventional metal spinning
Variasi spindle speed	320, 500, 900, dan 1120 rpm
Feed rate roller	0,20 mm/rev
Jumlah pass	1 pass
Arah gerak roller	Aksial
Material roller	Hardened tool steel
Roller nose radius	5 mm
Sistem penjepitan	Tailstock clamping
Pelumasan	Oli pelumas SAE 40
Temperatur proses	Suhu ruang ($\pm 27^\circ C$)
Metode pengukuran ketebalan	Mikrometer sekrup
Ketelitian mikrometer	0,01 mm
Metode pengukuran kekasaran	Surface roughness tester

Parameter	Nilai / Spesifikasi
Parameter kekasaran	Ra
Standar pengukuran kekasaran	ISO 4287
Jumlah titik pengukuran ketebalan	5 titik (T1–T5)
Jumlah titik pengukuran kekasaran	3 titik (Ra1–Ra3)
Jumlah pengulangan eksperimen	3 kali setiap variasi RPM

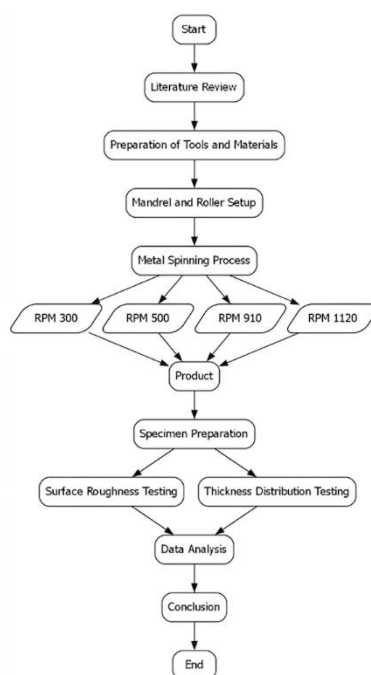
Gambar 1 memperlihatkan proses persiapan eksperimen (*setup*) dilakukan dengan memasang *blank* pada mandrel yang telah terpasang pada *spindle* mesin, kemudian dikunci menggunakan *tailstock* untuk menjaga stabilitas rotasi. Pengaturan posisi *tool* (*roller*) disesuaikan untuk memastikan kontak awal yang presisi. Sebelum proses dimulai, kecepatan putar diverifikasi menggunakan takometer digital untuk menjamin bahwa variasi kecepatan (320, 500, 900, dan 1120 rpm) sesuai dengan rencana eksperimen dan meminimalkan galat sistematis akibat fluktuasi putaran mesin.



Gambar 1. Pengaturan Mesin *Metal Spinning*

2.2. Prosedur Eksperimen dan Pengambilan Data

Gambar 2 menunjukkan alir penelitian dimana Langkah awal meliputi persiapan material, di mana *blank* dipotong sesuai dimensi spesifik dan dibersihkan dari kontaminan permukaan guna meminimalkan gesekan yang tidak teratur. Mesin kemudian diatur sesuai dengan variasi kecepatan putar yang telah ditentukan (320, 500, 900, dan 1120 rpm). Proses *metal spinning* dilakukan dengan mengumpangkan *roller* secara bertahap hingga terbentuk produk berbentuk mangkuk dengan geometri yang seragam dan presisi.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Setelah proses pembentukan selesai, dilakukan pengukuran ketebalan pada lima titik (T1–T5) untuk mengetahui distribusi ketebalan. Gambar 3 adalah titik pengukuran disebar dari pusat hingga tepi untuk menangkap variasi deformasi material.



Gambar 3. Titik Pengukuran Ketebalan

Setelah proses pembentukan selesai, tahap selanjutnya adalah pengambilan data teknis yang dilakukan secara sistematis untuk mengevaluasi kualitas produk. Pertama, distribusi ketebalan dinding diukur pada lima titik pengamatan strategis (T1–T5) (lihat pada Gambar 3) menggunakan mikrometer sekrup dengan tingkat ketelitian 0,01 mm. Penentuan titik-titik ini dilakukan secara radial, mulai dari pusat hingga ke area tepi benda kerja, dengan tujuan untuk menangkap variasi deformasi plastis serta memetakan fenomena penipisan material (*thinning*) secara akurat berdasarkan parameter pengukuran (Tabel 3) pada setiap zona pembentukan.

Kedua, evaluasi kualitas mikroskopis dilakukan melalui pengukuran kekasaran permukaan pada tiga titik berbeda ($Ra1$ – $Ra3$). Data yang diperoleh dari ketiga titik tersebut kemudian dirata-ratakan untuk menghasilkan nilai Ra representatif yang menggambarkan kondisi permukaan produk secara objektif [20]. Prosedur pengukuran ini menggunakan perangkat *surface roughness tester* dengan prosedur teknis yang mengacu pada standar internasional ISO 4287 untuk memastikan validitas parameter profil permukaan yang dihasilkan [21].

Tabel 3. Parameter Pengukuran

Parameter	Metode	Jumlah Titik
Ketebalan	Mikrometer	5 titik
Kekasaran (Ra)	Roughness tester	3 titik
RPM	Tachometer	1 titik

2.3. Formulasi Matematis

Untuk mengevaluasi karakteristik deformasi material, digunakan beberapa parameter kuantitatif yang diformulasikan secara matematis sebagai berikut:

Ketebalan Rata-rata

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

Standar Deviasi (SD)

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

Standar Error (SE)

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Koefisien Variasi (CV)

$$CV = \frac{SD}{\bar{t}} \times 100\% \quad (4)$$

Persentase *Thinning*

$$\text{Thinning}(\%) = \frac{t_0 - t_i}{t_0} \times 100\% \quad (5)$$

Mekanisme deformasi plastis, dilakukan analisis regangan menggunakan pendekatan *true strain*:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{t_0}{t} \right) \quad (6)$$

Untuk mengevaluasi batas formabilitas material, dilakukan *analytical FLD assessment* menggunakan pendekatan model Marciniak–Kuczynski (M–K). Nilai *major strain* (ε_1) dan *minor strain* (ε_2) dihitung berdasarkan perubahan dimensi lokal pada area deformasi menggunakan pendekatan *true strain* pada arah utama deformasi. Pendekatan ini digunakan untuk memetakan distribusi regangan terhadap kurva *Forming Limit Curve* (FLC) sehingga kecenderungan lokalisasi regangan dan potensi kegagalan deformasi dapat dianalisis secara kuantitatif. Dalam penelitian ini, evaluasi FLD dilakukan secara analitis dan tidak menggunakan metode pengukuran optik seperti *Digital Image Correlation* (DIC) maupun *experimental grid analysis*.

Untuk mengevaluasi perilaku *strain hardening* material selama proses deformasi plastis, digunakan pendekatan model konstitutif Hollomon yang dinyatakan sebagai:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (7)$$

di mana σ merupakan tegangan alir (*flow stress*), K adalah koefisien kekuatan material (*strength coefficient*), ε menyatakan regangan sejati (*true strain*), dan n merupakan eksponen pengerasan regangan (*strain hardening exponent*). Untuk memperoleh parameter material K dan n , persamaan Hollomon ditransformasikan ke dalam bentuk logaritmik sehingga hubungan tegangan dan regangan dapat dianalisis menggunakan pendekatan regresi linier berbasis metode *least squares*. Untuk memperoleh parameter material, persamaan Hollomon ditransformasikan ke bentuk logaritmik:

$$\ln \sigma = \ln K + n \ln \varepsilon \quad (8)$$

Nilai parameter K dan n diperoleh menggunakan regresi linier berbasis metode *least squares* terhadap data eksperimen pada zona deformasi kritis untuk merepresentasikan karakteristik pengerasan regangan material selama proses deformasi.

Sementara itu, nilai kekasaran permukaan diukur menggunakan alat *surface roughness tester* dan dinyatakan sebagai rata-rata deviasi profil permukaan terhadap garis tengah, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (9)$$

Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi keseragaman deformasi, kestabilan proses, serta kualitas permukaan produk.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Distribusi Ketebalan dan Stabilitas Proses

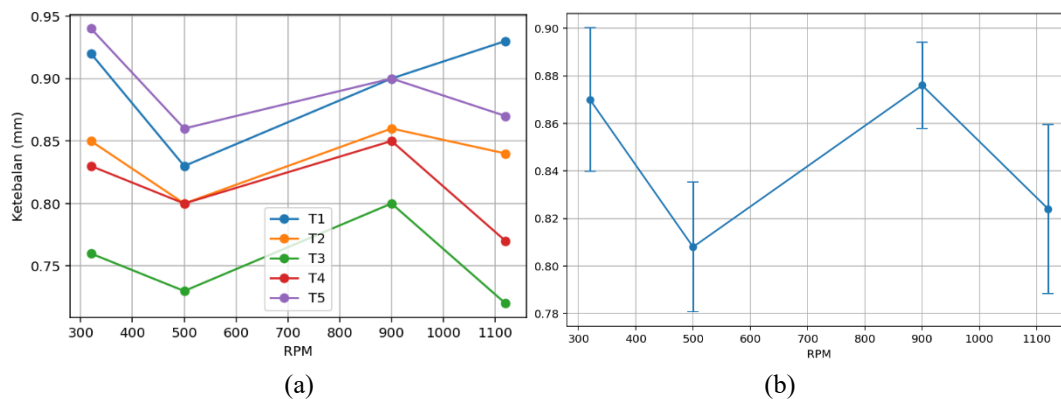
Hasil pengukuran ketebalan material pada proses *metal spinning* untuk berbagai variasi kecepatan putar (RPM) menunjukkan adanya pengaruh signifikan terhadap distribusi deformasi. Data utama dirangkum dalam Tabel 3, yang mencakup nilai ketebalan pada lima titik pengamatan (T1–T5) serta parameter statistik berupa rata-rata, standar deviasi (SD), dan koefisien variasi (CV).

Tabel 3. Rekapitulasi Ketebalan dan Parameter Statistik

RPM	T1	T2	T3	T4	T5	Rata-rata	SD	CV (%)
320	0.92	0.85	0.76	0.83	0.94	0.87	0.0675	7.76
500	0.83	0.80	0.73	0.80	0.86	0.81	0.0610	7.53
900	0.90	0.86	0.80	0.85	0.90	0.88	0.0404	4.59
1120	0.93	0.84	0.72	0.77	0.87	0.82	0.0796	9.70

Berdasarkan data pada Tabel 3 dan visualisasi pada Gambar 4a, terlihat bahwa distribusi ketebalan tidak memiliki korelasi linear terhadap peningkatan kecepatan putar. Ketebalan rata-rata tertinggi dicapai pada kecepatan 900 rpm sebesar 0,88 mm, yang mengindikasikan kondisi deformasi paling homogen. Sebaliknya,

pada kecepatan 500 rpm dan 1120 rpm, terjadi penurunan ketebalan yang lebih signifikan, terutama pada titik T3 yang menjadi zona kritis penipisan akibat konsentrasi regangan lokal [22].



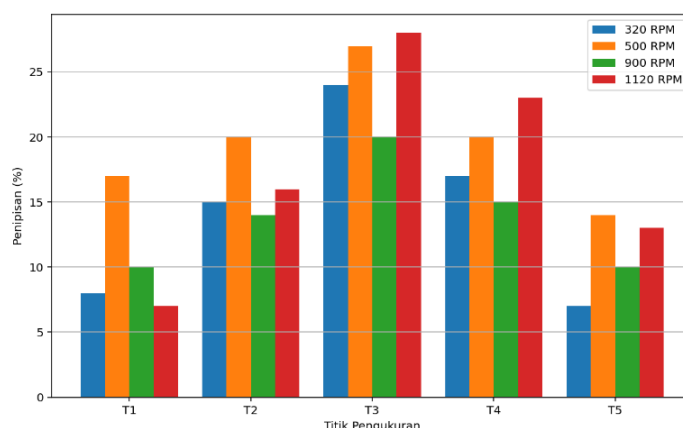
Gambar 4. Pengaruh RPM a) Ketebalan pada setiap titik, b) ketebalan dengan error bar

Analisis terhadap nilai SD dan CV mengonfirmasi bahwa kestabilan proses optimal ditemukan pada kecepatan 900 rpm dengan nilai CV terendah sebesar 4,59%. Sebaliknya, ketidakstabilan proses paling tinggi teramati pada 1120 rpm dengan nilai CV mencapai 9,70%. Penggunaan parameter statistik seperti CV sangat krusial dalam mengevaluasi homogenitas aliran material pada proses pembentukan bertahap (*incremental forming*) untuk menjamin kualitas produk akhir [23].

Temuan ini diperkuat oleh Gambar 4b (error bar) yang menunjukkan penyebaran data paling kecil pada kondisi 900 rpm, menandakan kestabilan deformasi yang lebih baik dibandingkan variasi kecepatan lainnya. Sebaliknya, peningkatan fluktuasi ketebalan pada kondisi 1120 rpm kemungkinan dipengaruhi oleh instabilitas dinamis selama proses spinning yang menyebabkan kontak roller-blank menjadi kurang stabil. Fenomena tersebut berpotensi memicu variasi aliran material lokal sehingga distribusi ketebalan menjadi lebih tidak homogen. Dengan demikian, penggunaan kecepatan menengah (900 rpm) dapat menghasilkan distribusi deformasi yang lebih seragam dan stabil dibandingkan penggunaan kecepatan putar yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi.

3.2. Analisis Regangan dan Distribusi *Thinning*

Evaluasi terhadap mekanisme deformasi plastis dilakukan dengan menganalisis parameter regangan sejati (*true strain*) dan persentase penipisan (*thinning*). Berdasarkan data eksperimen pada Gambar 5, distribusi penipisan ketebalan menunjukkan pola yang konsisten di seluruh variasi kecepatan, di mana titik T3 teridentifikasi sebagai zona kritis dengan tingkat penipisan tertinggi.



Gambar 5. Distribusi penipisan ketebalan pada setiap titik

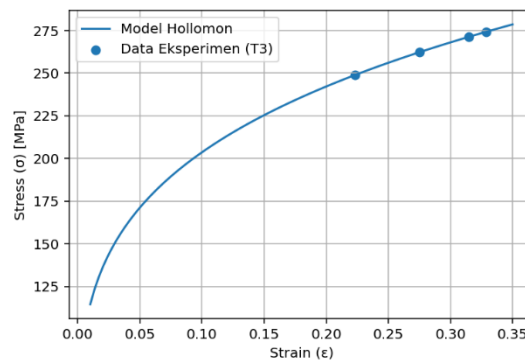
Pada kecepatan 1120 rpm, penipisan di titik T3 mencapai nilai maksimum sebesar 28%, yang berkorelasi dengan regangan $\epsilon \approx 0,33$. Fenomena ini mengindikasikan terjadinya lokalisasi regangan (*strain localization*) yang agresif pada kecepatan tinggi. Sebaliknya, kecepatan 900 rpm menunjukkan profil penipisan yang lebih terkendali dan merata di setiap titik pengukuran dibandingkan variasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada

kecepatan menengah, aliran material terjadi lebih stabil sehingga risiko kegagalan struktural akibat penipisan berlebih dapat diminimalisirkan [24]. Karakteristik distribusi *thinning* yang tidak seragam ini merupakan konsekuensi dari interaksi kompleks antara geometri mandrel dan dinamika penekanan *roller* pada area transisi [25].

3.3. Analisis Perilaku Material (Model Hollomon)

Perilaku pengerasan regangan (*strain hardening*) dari Aluminium 1100 dianalisis menggunakan pendekatan model konstitutif Hollomon. Berdasarkan plot kurva *stress-strain* pada Gambar 6, data eksperimen yang diambil dari zona kritis T3 menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi (*goodness of fit*) dengan prediksi model Hollomon.

Model ini dinyatakan melalui persamaan $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$, di mana berdasarkan hasil regresi data eksperimen, diperoleh nilai koefisien kekuatan (K) dan eksponen pengerasan regangan (n) yang merepresentasikan kemampuan material untuk menahan deformasi lebih lanjut. Peningkatan tegangan alir seiring dengan bertambahnya regangan menunjukkan bahwa material mengalami penguatan mekanis selama proses *spinning* berlangsung [26].

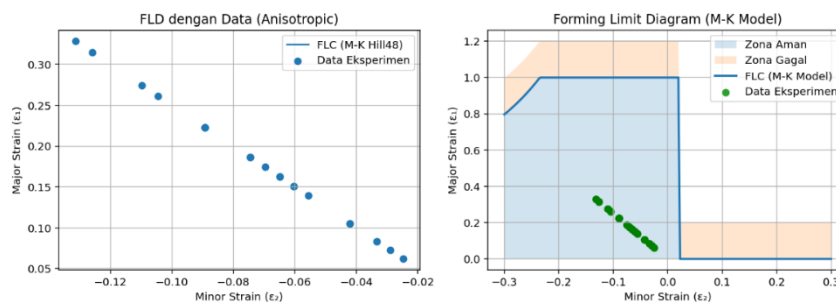


Gambar 6. Kurva Tegangan-Regangan Hasil Eksperimen dan Pendekatan Model Hollomon pada Titik *Critical* T3

Namun, pada tingkat regangan tinggi ($\varepsilon > 0,3$) yang dihasilkan oleh kecepatan 1120 rpm, material mulai mendekati batas instabilitas plastisnya. Analisis ini mengonfirmasi bahwa meskipun Aluminium 1100 memiliki daktilitas yang baik, parameter proses yang ekstrem dapat mendorong material melampaui kapasitas pengerasan regangannya, yang pada akhirnya memicu reduksi ketebalan yang tidak stabil sebagaimana teramati pada data *thinning* sebelumnya [27].

3.4. Evaluasi *Formability* dan *Trade-Off* Parameter Proses

Evaluasi batas deformasi dilakukan melalui analytical FLD assessment berbasis model Marciniak–Kuczynski (M-K). Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan lokalisasi regangan berdasarkan distribusi major strain dan minor strain hasil perhitungan analitis. Analisis ini mengintegrasikan kriteria luluh anisotropik Hill'48 untuk mempertimbangkan pengaruh arah pengerolan (*rolling direction*) dan ketidaksempurnaan awal material, sebagaimana disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Analytical Forming Limit Diagram* (FLD) berdasarkan model Marciniak–Kuczynski (M-K) dan kriteria anisotropik Hill'48.

Gambar 7 menunjukkan hasil pemetaan regangan utama (*major strain*, ε_1) terhadap regangan minor (*minor strain*, ε_2). Berdasarkan visualisasi tersebut, diperoleh temuan sebagai berikut:

- Distribusi Regangan mendapatkan hasil bahwa seluruh data eksperimen menunjukkan tren linier pada zona regangan negatif (sisi kiri diagram), yang merupakan karakteristik khas dari proses *spinning* di mana material mengalami ekspansi radial sekaligus penipisan aksial.
- Analisis Batas Deformasi mendapatkan hasil model M-K yang membagi diagram menjadi "Zona Aman" (biru) dan "Zona Gagal" (oranye), Berdasarkan *analytical FLD assessment*, seluruh titik regangan masih berada di bawah kurva batas deformasi (FLC) yang diprediksi model M-K, sehingga belum menunjukkan indikasi kegagalan plastis lokal. Hal ini menunjukkan bahwa pada variasi kecepatan yang diuji, material Aluminium 1100 belum melewati batas kegagalan mekanis.
- Pada kondisi kritis titik dengan regangan tertinggi ($\varepsilon_1 \approx 0,33$) pada kecepatan 1120 rpm (titik T3) merupakan posisi yang paling mendekati kurva FLC. Meskipun masih berada di zona aman, posisi ini mengonfirmasi bahwa peningkatan kecepatan putar lebih lanjut akan meningkatkan risiko lokalisasi regangan (*strain localization*) menuju ambang batas kegagalan [28].

Selain aspek integrasi material, kualitas mikroskopis permukaan dievaluasi melalui parameter kekasaran permukaan (R_a). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, nilai R_a cenderung menurun signifikan seiring dengan peningkatan RPM akibat efek *burnishing* yang meratakan asperitas permukaan secara mekanis [29].

Namun demikian, hasil ini menciptakan fenomena *trade-off* yang krusial. Meskipun kecepatan tinggi menghasilkan permukaan yang lebih halus, hal tersebut dibayar dengan pergerakan titik regangan yang semakin mendekati kurva batas kegagalan pada FLD. Sebaliknya, pada kecepatan rendah, titik regangan berada jauh di bawah kurva (sangat aman), namun aliran plastis yang belum optimal menghasilkan distribusi ketebalan yang tidak merata. Secara keseluruhan, kecepatan 900 rpm direkomendasikan sebagai kondisi optimum karena memberikan jarak aman (*safety margin*) yang cukup pada FLD, sekaligus menghasilkan kualitas permukaan dan homogenitas ketebalan yang seimbang [30].

3.5. Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putar (*spindle speed*) memiliki pengaruh dominan terhadap mekanisme deformasi plastis, distribusi ketebalan, serta batas formabilitas material pada proses metal *spinning*. Secara umum, peningkatan RPM meningkatkan energi deformasi dan intensitas kontak antara *roller* dan benda kerja, namun efeknya terhadap kualitas akhir tidak bersifat linear.

Pada kecepatan rendah (320–500 rpm), mekanisme deformasi cenderung belum optimal. Hal ini ditunjukkan oleh distribusi ketebalan yang kurang merata serta nilai koefisien variasi (CV) yang relatif tinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa energi kinetik yang diberikan belum cukup untuk menghasilkan aliran material yang stabil mengikuti kontur *mandrel*, sehingga memicu variasi ketebalan lokal. Selain itu, pada rentang kecepatan ini, frekuensi kontak antara *roller* dan material belum cukup intens untuk menghasilkan efek *surface smoothing* yang signifikan pada permukaan produk.

Sebaliknya, pada kecepatan tinggi (1120 rpm), meskipun terjadi peningkatan kualitas permukaan akibat efek *burnishing*, kondisi ini diikuti oleh meningkatnya ketidakstabilan deformasi. Hal tersebut dibuktikan oleh peningkatan *thinning* hingga 28% pada titik kritis T3 serta nilai CV tertinggi sebesar 9,70%. Fenomena ini kemungkinan dipengaruhi oleh peningkatan gaya inersia dan panas gesek yang menyebabkan aliran material menjadi lebih agresif dan kurang stabil. Kondisi tersebut berpotensi memicu *strain localization* yang merupakan tahap awal terjadinya *necking* maupun kegagalan deformasi lokal [31].

Kondisi optimum diperoleh pada kecepatan menengah, yaitu 900 rpm. Pada parameter ini, distribusi ketebalan menunjukkan homogenitas terbaik dengan nilai CV terendah sebesar 4,59%, disertai kualitas permukaan yang tetap baik. Energi deformasi pada kondisi ini cukup untuk menghasilkan aliran material yang stabil tanpa memicu instabilitas plastis. Hasil *analytical FLD assessment* juga menunjukkan bahwa seluruh titik regangan masih berada di bawah kurva *Forming Limit Curve* (FLC), sehingga kondisi deformasi masih berada pada batas aman terhadap kegagalan plastis lokal.

Temuan penelitian ini sejalan dengan penelitian Zhang et al. [16] yang melaporkan bahwa peningkatan *spindle speed* dapat meningkatkan homogenitas deformasi hingga batas tertentu sebelum memicu instabilitas lokal pada material tipis. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Keneshlou et al. [22], di mana zona transisi geometri menjadi area kritis terjadinya *thinning* akibat konsentrasi regangan selama proses *spinning*. Selain itu, kecenderungan penurunan nilai kekasaran permukaan pada RPM tinggi konsisten dengan penelitian Akiyama et al. [13], yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar dapat meningkatkan efek *burnishing* sehingga asperitas permukaan menjadi lebih rata.

Dari perspektif mekanika material, hasil penelitian ini konsisten dengan model *strain hardening Hollomon*. Nilai eksponen pengerasan regangan ($n = 0,25$) menunjukkan bahwa Aluminium 1100 memiliki kemampuan deformasi plastis yang baik. Namun demikian, material tetap memiliki batas terhadap konsentrasi regangan lokal. Ketika regangan mendekati kondisi kritis, seperti yang teramati pada 1120 rpm ($\epsilon \approx 0,33$), kemampuan pengerasan regangan mulai menurun sehingga material menjadi lebih rentan terhadap penipisan yang tidak stabil.

Analytical FLD assessment berbasis model Marciniak–Kuczynski (M-K) juga memperlihatkan bahwa peningkatan RPM menyebabkan posisi titik regangan semakin mendekati kurva batas deformasi. Hal ini mengindikasikan bahwa ketidaksempurnaan awal (*initial imperfection*) pada material menjadi semakin sensitif terhadap peningkatan *strain rate* dan kondisi deformasi ekstrem. Penggunaan kriteria anisotropik Hill'48 menunjukkan bahwa arah deformasi material turut mempengaruhi distribusi tegangan dan mempercepat lokalisasi regangan pada kondisi kecepatan tinggi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan adanya *trade-off* antara kualitas permukaan dan integritas material. Peningkatan kecepatan putar mampu memperbaiki kualitas permukaan melalui efek *burnishing*, namun pada saat yang sama meningkatkan risiko *thinning* dan lokalisasi regangan. Oleh karena itu, penggunaan *spindle speed* menengah (900 rpm) direkomendasikan sebagai kondisi optimum karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara homogenitas deformasi, stabilitas proses, dan kualitas permukaan.

Dari perspektif manufaktur, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan *spindle speed* yang tepat dapat meningkatkan stabilitas deformasi sekaligus mempertahankan kualitas permukaan tanpa meningkatkan risiko *thinning* berlebih. Temuan ini dapat digunakan sebagai dasar optimasi parameter proses pada industri pembentukan logam berbasis *spinning*, khususnya untuk material aluminium tipis yang membutuhkan kombinasi antara kualitas geometrik dan integritas struktural.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama belum digunakannya sistem pengukuran regangan optik seperti *Digital Image Correlation* (DIC) untuk memetakan distribusi strain secara real-time. Selain itu, pengaruh temperatur lokal, gaya pembentukan, dan vibrasi dinamis belum diukur secara langsung sehingga interpretasi mekanisme deformasi masih bersifat analitis. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan mengintegrasikan pengukuran in-situ dan simulasi numerik berbasis finite element analysis (FEA) untuk meningkatkan akurasi prediksi perilaku deformasi material selama proses metal spinning.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa kecepatan 900 rpm adalah parameter paling optimum karena menghasilkan distribusi ketebalan paling homogen dengan koefisien variasi terendah sebesar 4,59%. Sebaliknya, meskipun kecepatan 1120 rpm memberikan kualitas permukaan terbaik, kondisi ini meningkatkan risiko kegagalan akibat fenomena *thinning* (penipisan) hingga 28%, yang membawa material mendekati batas kritis *Forming Limit Curve*. Dengan karakteristik material Aluminium 1100 yang memiliki parameter $n = 0.25$ dan $K = 362$ MPa, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan yang tidak terkontrol dapat memicu lokalisasi regangan berbahaya meskipun material secara umum masih berada dalam zona aman deformasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Adeleke *et al.*, “Recent Development in Casting Technology: A Pragmatic Review,” Apr. 01, 2022, *International Information and Engineering Technology Association*. doi: 10.18280/rcma.320206.
- [2] F. Dahms and W. Homberg, “Manufacture of Defined Residual Stress Distributions in the Friction-Spinning Process: Investigations and Run-to-Run Predictive Control,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/met12010158.
- [3] S. Puchlerska, K. Żaba, J. Pyzik, T. Pieja, and T. Trzepieciński, “Statistical analysis and optimisation of data for the design and evaluation of the shear spinning process,” *Materials*, vol. 14, no. 20, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14206099.
- [4] J. V. Abellán-Nebot, C. Vila Pastor, and H. R. Siller, “A Review of the Factors Influencing Surface Roughness in Machining and Their Impact on Sustainability,” Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su16051917.
- [5] J. S. Weeks and A. P. Stebner, “Efficient Multiscale Simulations of Incremental Sheet Forming Using Machine Learning Surrogate Models for Crystal Plasticity,” *Integr. Mater. Manuf. Innov.*, vol. 14, no. 4, pp. 573–592, Dec. 2025, doi: 10.1007/s40192-025-00427-0.
- [6] Y. Xu *et al.*, “Revealing the dynamic behavior and micromechanisms of enhancing the formability of AA1060 sheets under high strain rate deformation,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol.

- 28, pp. 2402–2409, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.12.163.
- [7] M. Kang *et al.*, “Surface topography prediction of slider races using formed grinding wheel shape and material removal mechanism,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 24, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.1007/s43452-024-00939-0.
- [8] M. Wu, F. Chen, A. Li, Z. Chen, and N. Sun, “A novel vibration isolator for vibrating screen based on magnetorheological damper,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, no. 10, pp. 4343–4352, Oct. 2021, doi: 10.1007/s12206-021-0906-4.
- [9] Grage F F A and Sutisna N A, “Analysis of the Influence of Spindle Speed and Feed Rate on the Surface Quality of SS400 Steel in the CNC Lathe Machining Process Using the Taguchi Method,” *Rotasi Jurnal*, vol. 27, no. 3, pp. 14–21, 2025, doi: <https://doi.org/10.14710/rotasi.27.3.14-21>.
- [10] R. Bhatt, M. Bhatt, and N. Asnafi, “Manufacturing Letters Mathematical Modeling and Experimental Investigations on Forming Force during Tube Spinning of AA6061,” 2025. [Online]. Available: www.sciencedirect.com
- [11] F. A. Lora, D. Fritzen, R. Alves de Sousa, and L. Schaffer, “Studying Formability Limits by Combining Conventional and Incremental Sheet Forming Process,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 34, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s10033-021-00562-7.
- [12] Y. Akiyama, M. Iwaki, Y. Komagamine, S. Minakuchi, and M. Kanazawa, “Effect of Spindle Speed and Feed Rate on Surface Roughness and Milling Duration in the Fabrication of Milled Complete Dentures: An In Vitro Study,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 24, Dec. 2023, doi: 10.3390/app132413338.
- [13] Y. Liu, D. Tian, and B. Zheng, “Non-communicating Decentralized Multi-robot Collision Avoidance in Grid Graph Workspace based on Dueling Double Deep Q-Network,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2456/1/012015.
- [14] V. Kombarov, V. Sorokin, Y. Tsegelnyk, S. Plankovskyy, Y. Aksonov, and O. Fojtů, “Numerical Control of Machining Parts from Aluminum Alloys with Sticking Minimization,” 2021.
- [15] H. Zhang, M. Zhan, Z. Zheng, R. Li, W. Lyu, and Y. Lei, “A Systematic Study on the Effects of Process Parameters on Spinning of Thin-Walled Curved Surface Parts With 2195 Al-Li Alloy Tailor Welded Blanks Produced by FSW,” *Front. Mater.*, vol. 8, Dec. 2021, doi: 10.3389/fmats.2021.809018.
- [16] G. C. Yang, D. W. Zhang, C. Tian, Y. H. Hu, and S. D. Zhao, “A method for determining efficiency parameters based on efficiency-quality graph in incremental sheet forming,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 33, pp. 5170–5192, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.10.141.
- [17] T. Trzepieciński, S. M. Najm, V. Oleksik, D. Vasilca, I. Paniti, and M. Szpunar, “Recent Developments and Future Challenges in Incremental Sheet Forming of Aluminium and Aluminium Alloy Sheets,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/met12010124.
- [18] J. Rekayasa Material, M. dan Energi, S. Agung Bintoro, A. Rudi Nasution, R. Fauzi Siregar, and J. Harahap, “Effect of Spindle Speed on the Bending Test of Al-1100 in Fraction Stir Welding Joints,” vol. 8, no. 2, 2025, doi: 10.30596/rmme.v8i2.25522.
- [19] M. J. Roy and D. M. Maijer, “Experimental procedure for warm spinning of cast aluminum components,” *Journal of Visualized Experiments*, vol. 2017, no. 120, Feb. 2017, doi: 10.3791/55061.
- [20] B. Liu, S. Gao, Z. Jia, Y. Wen, Z. Han, and X. Gong, “Non-axisymmetric die-less spinning using ball-crown-shape roller,” *J. Manuf. Process.*, vol. 79, pp. 70–80, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.057>.
- [21] M. Keneshlou, F. R. Biglari, and M. Shafaie, “A numerical and experimental analysis of noncircular blank spinning,” *J. Manuf. Process.*, vol. 94, pp. 159–182, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.03.045>.
- [22] Yujie Shi, Shihong LU, Luteng Liu, Zhijuan Zhang, and Haojia Zhang, “Research on incremental forming simulation based on an improved constitutive model,” *Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 238, no. 15, pp. 7640–7651, Aug. 2024, doi: 10.1177/09544062241231006.
- [23] H. Ma *et al.*, “Study on the Flow Behavior of 5052 Aluminum Alloy over a Wide Strain-Rate Range with a Constitutive Model Based on the Arrhenius Model Extension,” *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.3390/met13121948.
- [24] L. Chen, S. Fang, K. Zhao, R. Xiao, and H. Zhai, “Forming limit prediction using an integrated model for 7075 aluminum alloy sheets at an elevated temperature,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 202, pp. 475–485,

- Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijssolstr.2020.06.030.
- [25] T. P. Gundarneeeya, V. D. Golakiya, S. D. Ambaliya, and S. H. Patel, "Experimental investigation of process parameters on surface roughness and dimensional accuracy in hard turning of EN24 steel," *Mater. Today, Proc.*, vol. 57, pp. 674–680, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.104>.
- [26] J. F. Wu, D. He, and Y. C. Lin, "Investigations on the warm spinning characteristics and processing parameters optimization of AA 7075 aluminum alloy conical parts with inner ribs," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 38, pp. 2960–2977, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.08.044.
- [27] N. A. Kharche, V. N. Sulakhe, P. R. Baviskar, and K. Kaware, "An extensive review of the effects of laser cutting parameters on metal surface and kerf quality," *Research on Engineering Structures and Materials*, 2025, doi: 10.17515/resm2025-953ma0608rv.
- [28] A. M. Roula, K. Mocellin, H. Traphöner, A. E. Tekkaya, and P.-O. Bouchard, "Influence of mechanical characterization on the prediction of necking issues during sheet flow forming process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 306, p. 117620, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117620>.
- [29] P. Kandarkar, Sathish Rao U., and A. Kamoji, "Investigation on the influence of Lead Zirconate Titanate piezo material on different diaphragm materials in the mechanical deformation process," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 3251–3255, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.449>.
- [30] B. Engelmann, A. M. Schmitt, L. Theilacker, and J. Schmitt, "Implications from Legacy Device Environments on the Conceptional Design of Machine Learning Models in Manufacturing," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 1, Feb. 2024, doi: 10.3390/jmmp8010015.
- [31] S. Cao, H. N. Li, W. Huang, Q. Zhou, T. Lei, and C. Wu, "A delamination prediction model in ultrasonic vibration assisted drilling of CFRP composites," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 302, p. 117480, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117480>.