

Optimalisasi Mekanisme Penekan Ulir Segitiga pada Mesin Pelurus Puncher Bar untuk Meningkatkan Efisiensi Pelurusan

Abd. Wahab^{*1}, Mukhlis A.Hamaruang², Didit Yantoni³, Ahyar Mansur⁴

^{1,3} Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi, Teknik Mesin, Politeknik Sorowako, Indonesia

²Rekayasa Perancangan Mekanik, Teknik Mesin, Politeknik Sorowako, Indonesia

⁴Perawatan dan Perbaikan Mesin, Teknik Mesin, Politeknik Sorowako, Indonesia

Email: ¹abdulwahab@politekniksorowako.ac.id, ²mukhlis@politekniksorowako.ac.id

Abstrak

Puncher bar merupakan komponen penting dalam industri peleburan nikel yang berfungsi untuk membuka, membersihkan, dan menjaga kelancaran aliran logam cair pada lubang tuyere. Selama operasi, puncher bar mengalami beban mekanis berulang dan paparan suhu tinggi yang menyebabkan pembengkokan serta deformasi permanen, sehingga menurunkan efisiensi kerja dan produktivitas proses peleburan. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan mekanisme penekan ulir segitiga pada mesin pelurus *puncherbar* untuk meningkatkan efisiensi pelurusan. Eksperimen dilakukan menggunakan puncher bar baja karbon ASTM A108 dengan diameter 25,4 mm dan panjang 1.778–1.905 mm, serta variasi posisi *adjuster* 0–6 mm. Hasil menunjukkan kebengkokan awal 30–60 mm dapat dikurangi hingga rata-rata 3 mm dalam waktu 60 detik, dengan defleksi maksimum 3 mm pada posisi *adjuster* 6 mm. linear antara posisi *adjuster* dan defleksi membuktikan kestabilan sistem serta efektivitas ulir segitiga dalam menekan fenomena *springback*. Penelitian ini memberikan dasar empiris bagi pengembangan desain mesin pelurus yang efisien, presisi, dan tahan terhadap deformasi elastis berulang pada aplikasi industri peleburan nikel.

Kata kunci: *Puncher bar*, ulir segitiga, pelurusan, defleksi, efisiensi mekanik.

Abstract

Puncher bars are an important component in the nickel smelting industry, serving to open, clean, and maintain the smooth flow of molten metal in tuyere holes. During operation, puncher bars experience repeated mechanical loads and exposure to high temperatures, causing bending and permanent deformation, thereby reducing the efficiency and productivity of the smelting process. This study aims to optimize the triangular screw press mechanism on the puncher bar straightening machine to improve straightening efficiency. Experiments were conducted using ASTM A108 carbon steel puncher bars with a diameter of 25.4 mm and a length of 1,778–1,905 mm, as well as variations in the adjuster position of 0–6 mm. The results show that the initial bend of 30–60 mm can be reduced to an average of 3 mm within 60 seconds, with a maximum deflection of 3 mm at an adjuster position of 6 mm. The linear relationship between the adjuster position and deflection proves the stability of the system and the effectiveness of the triangular screw in suppressing the springback phenomenon. This research provides an empirical basis for the development of an efficient, precise, and resistant straightening machine design against repeated elastic deformation in nickel smelting industrial applications

Keywords: *Puncher bar*, triangular screw, straightening, deflection, mechanical efficiency

1. PENDAHULUAN

Puncher bar merupakan komponen penting dalam industri peleburan nikel yang berfungsi untuk membuka, membersihkan, dan menjaga kelancaran aliran logam cair pada lubang tuyere. Dalam proses operasional, puncher bar mengalami paparan suhu tinggi dan beban mekanis berulang (*cyclic*

loading) yang sering menyebabkan pembengkokan dan deformasi permanen. Kondisi ini menimbulkan penurunan efisiensi kerja, peningkatan waktu perawatan, serta berkurangnya produktivitas proses peleburan (Wahab dan Hamarung, 2024). Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pelurusan yang efisien dan presisi untuk mengembalikan bentuk linier puncher bar tanpa menimbulkan retak mikro atau tegangan sisa berlebih. Selain berperan dalam menjaga kelancaran aliran logam cair, kondisi geometris puncher bar juga sangat menentukan stabilitas proses peleburan secara keseluruhan. Ketika batang mengalami kebengkokan berlebih, penetrasi terhadap lubang tuyere menjadi kurang efektif sehingga dapat menghambat proses pembersihan terak maupun pelepasan gas sisa pembakaran. Kondisi ini tidak hanya menurunkan efisiensi operasi, tetapi juga meningkatkan risiko terjadinya penumpukan material yang dapat mengganggu kestabilan tekanan di dalam tungku. Selain faktor mekanis, perubahan temperatur yang ekstrem selama siklus operasi panas-dingin turut memperparah deformasi puncher bar melalui mekanisme ekspansi dan kontraksi termal. Pada akhirnya, kombinasi antara beban siklik, temperatur tinggi, dan sifat material baja karbon ASTM A108 menyebabkan batang semakin rentan mengalami deformasi plastis jika tidak segera dilakukan proses pelurusan yang tepat. Oleh karena itu, keberadaan mesin pelurus yang presisi dan mudah dioperasikan menjadi sangat penting untuk memastikan puncher bar dapat kembali pada bentuk linier sesuai standar operasional. Pelurusan yang efektif juga memberikan dampak langsung terhadap peningkatan umur pakai batang, mengurangi risiko retak mikro akibat konsentrasi tegangan, dan menurunkan frekuensi penggantian komponen. Hal ini memberikan keuntungan signifikan bagi industri peleburan, terutama dalam upaya menekan biaya perawatan dan memaksimalkan waktu operasi tungku.



Gambar 1. Puncher bar bengkok

Berbagai penelitian sebelumnya telah meneliti proses pelurusan batang logam dan pengaruh parameter mekanis terhadap deformasi. (Zhang et al., 2018) mengembangkan model analitik untuk memprediksi fenomena *hardening* material selama proses pelurusan, sedangkan (Li et al., 2025) mengoptimalkan gaya tekan pada sistem *cross-roll straightening* untuk baja paduan 20CrMnTi. (Bairan et al., 2011) meneliti efek proses pelurusan terhadap tegangan sisa pada batang baja tulangan, sementara Bathelt et al. (2023) memperkenalkan desain mesin pelurus dengan integrasi sensor gaya untuk meningkatkan akurasi pengukuran deformasi. Penelitian mutakhir oleh Lu et al., (2023) menunjukkan bahwa kontrol *springback* pada logam dapat dioptimalkan melalui pendekatan kompensasi proses dan optimasi parameter pembentukan. Selain itu, (Möller et al., 2024) melaporkan bahwa variasi parameter pada proses *stretch-bending straightening* berpengaruh signifikan terhadap resistansi *springback* dan sifat tarik material. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada spesimen logam dengan ukuran dan kondisi pembebanan yang relatif lebih sederhana dibandingkan puncher bar yang digunakan pada industri peleburan nikel. Puncher bar memiliki diameter yang lebih besar, panjang yang

lebih ekstrem, serta mengalami kombinasi beban siklik dan termomekanik yang jauh lebih kompleks. Kondisi ini menyebabkan respons deformasi yang muncul pada puncher bar tidak sepenuhnya dapat dijelaskan oleh model pelurusan konvensional yang digunakan pada batang logam berukuran kecil. Kompleksitas tersebut menunjukkan bahwa mekanisme pelurusan yang diterapkan harus mampu mengakomodasi variabilitas deformasi sepanjang batang, termasuk distribusi tegangan yang tidak seragam akibat paparan temperatur tinggi selama operasi. Dengan demikian, kebutuhan akan mekanisme penekan yang mampu memberikan gaya stabil dan merata menjadi semakin penting. Sistem ulir segitiga memiliki potensi besar dalam mengisi celah penelitian ini karena mampu menghasilkan gaya tekan aksial yang dapat dikontrol secara bertahap. Pendekatan ini membuka peluang untuk mempelajari bagaimana komponen berdiameter besar merespons tekanan terarah pada kondisi operasi yang lebih mendekati lingkungan kerja sebenarnya.

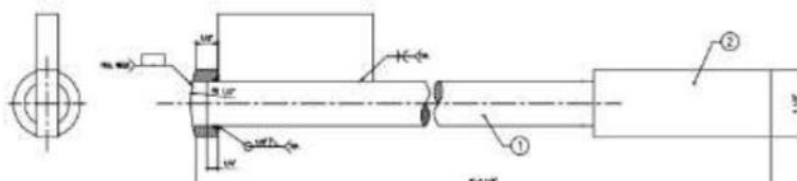
Meskipun berbagai penelitian tersebut telah berkontribusi signifikan terhadap pemahaman mekanisme pelurusan logam, sebagian besar masih berfokus pada sistem hidrolik atau *cross-roll straightening* dan belum mengeksplorasi potensi penerapan mekanisme penekan berbasis ulir segitiga (*V-thread 60°*). Padahal, sistem ulir segitiga memiliki beberapa keunggulan, antara lain kemudahan manufaktur, efisiensi gaya aksial, dan kestabilan geser yang baik (Shigley, Mischke, dan Budynas, 2011; Khurmi dan Gupta, 2013). Selain itu, mekanisme ini memungkinkan distribusi gaya yang lebih seragam sepanjang batang, sehingga dapat meminimalkan risiko *springback* dan deformasi lokal (Sanjib dan Kiran, 2022).

Berdasarkan tinjauan tersebut, penelitian ini mengisi celah penelitian dengan fokus pada analisis eksperimental penerapan ulir segitiga sebagai mekanisme penekan pada mesin pelurus puncher bar. Pendekatan eksperimental dipilih karena dapat memberikan bukti empiris mengenai hubungan antara gaya tekan, deformasi elastis, dan *springback* secara langsung, berbeda dengan pendekatan analitik yang cenderung mengasumsikan kondisi ideal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas mekanisme penekan ulir segitiga dalam meningkatkan efisiensi pelurusan dan mengontrol defleksi batang puncher bar. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan sistem pelurusan berbasis ulir mekanik yang efisien dan sesuai dengan standar ISO 68-1 (1998) serta ISO 965-1 (2013), serta memberikan manfaat praktis bagi peningkatan produktivitas dan pengurangan waktu henti (*downtime*) perawatan pada proses peleburan nikel.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Bahan dan Peralatan

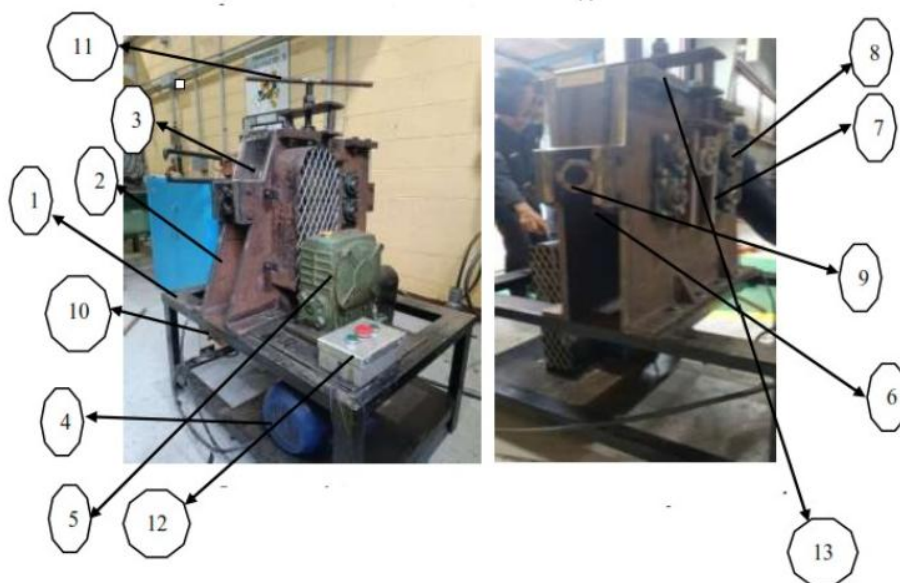
Bahan uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah **puncher bar** dari baja karbon **ASTM A108** (ASTM, 2018) dengan spesifikasi diameter 25,4 mm, panjang 1.778–1.905 mm, dan massa ± 7 kg. Material ini memiliki kekuatan tarik 485–620 MPa dan modulus elastisitas 210 GPa, yang memungkinkan deformasi plastis tanpa menyebabkan retak atau cacat permukaan selama proses pelurusan.



Gambar 2. Puncher Bar

Peralatan utama yang digunakan adalah mesin pelurus (*straightening machine*) yang dirancang dengan mekanisme penekan berbasis ulir segitiga 60° sesuai standar ISO 68-1 (1998) dan ISO 965-1 (2013). Mesin ini digerakkan oleh motor listrik tiga fasa berdaya 5,5 HP dengan sistem transmisi pulley-sabuk-V dan roda gigi. Rangka mesin memiliki dimensi $930 \times 702 \times 1.135$ mm, dan rol pelurus terbuat

dari baja AISI 4140 yang memiliki kekuatan luluh tinggi. Pengukuran kebengkokan awal dan akhir dilakukan menggunakan mistar baja dengan resolusi 0,5 mm. Metode pengukuran dilakukan dengan meletakkan puncher bar di atas meja datar, kemudian menentukan jarak maksimum antara titik tengah batang dengan garis lurus yang dihubungkan dari kedua ujung batang. Ketelitian pengukuran berada pada rentang $\pm 0,5$ mm dan dianggap cukup akurat untuk batang logam sepanjang 1905 mm. Gambar 3 menunjukkan hasil optimalisasi mesin pelurus puncher bar. Pada item 11 terdapat sistem *adjuster* yang dapat diturunkan hingga skala tertentu dan berfungsi sebagai mekanisme penekan terhadap batang *puncher bar* yang bengkok, sehingga menghasilkan gaya aksial yang mampu meluruskan batang tersebut secara bertahap.



Gambar 3. Hasil optimalisasi mesin pelurus puncher bar

2.2. Desain Eksperimen

Eksperimen dirancang untuk menganalisis pengaruh variasi gaya tekan terhadap perubahan kebengkokan (*bending curvature*) pada puncher bar. Gaya tekan dikendalikan melalui variasi posisi *adjuster* pada sistem ulir segitiga, dengan rentang gerak 0–6 mm. Pengujian dilakukan pada tiga batang uji dengan kebengkokan awal bervariasi antara 30–60 mm. Setiap batang diuji dua kali untuk memastikan reproduibilitas data dan mengurangi pengaruh kesalahan sistematis

Tabel 1. Parameter Pengujian

Parameter	Simbol	Nilai/Rentang	Satuan
Diameter batang	D	25,4	mm
Panjang batang	L	1778–1905	mm
Posisi <i>adjuster</i>	x	0–6	mm
Kebengkokan awal	δ_0	30–60	mm
Kebengkokan akhir	δ_1	0,3–2,0	mm

2.3. Prosedur Pengujian

Proses pengujian dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahap berikut:

1. Persiapan specimen,

- puncher bar dibersihkan dari kerak dan kotoran, kemudian dilakukan pengukurankebengkokan awal (δ_0) menggunakan mistar baja.
2. Pemasangan pada mesin:
Batang ditempatkan pada tiga rol utama mesin pelurus. Posisi *adjuster* diatur pada 0 mm sebagai kondisi awal tanpa tekanan.
3. Proses pelurusan:
Tekanan dinaikkan secara bertahap melalui putaran ulir segitiga dari posisi 0 hingga 6 mm. Setiap langkah kenaikan 1 mm dilakukan dua kali rotasi penuh rol.
4. Pelepasan dan pengukuran akhir:
Setelah proses pelurusan selesai, batang dilepaskan dari mesin, kemudian diukur kembali kebengkokan akhirnya (δ_1).

2.4. Analisa Data

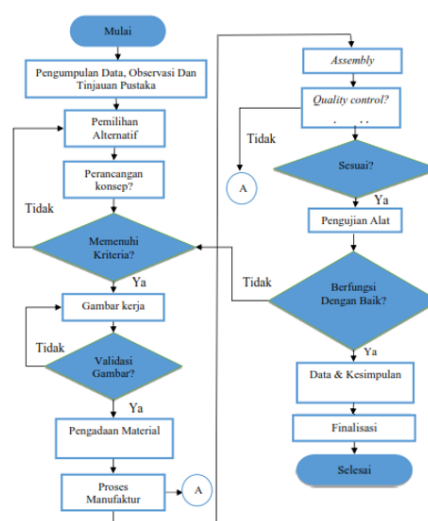
Data defleksi dan kebengkokan hasil pengujian dianalisis menggunakan teori defleksi balok sederhana berdasarkan elastisitas linear (Hooke's Law). Hubungan antara posisi *adjuster* dan defleksi diplot untuk menilai linearitas sistem dan pengaruh gaya ulir terhadap *springback*. Pengurangan kebengkokan dihitung menggunakan rumus:

$$\eta = \frac{(\delta_0 - \delta_1)}{\delta_1} \times 100\%$$

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen terhadap teori defleksi dari Shigley et al. (2011) dan studi Zhang et al. (2018) serta Cui et al. (2023), untuk menilai kesesuaian karakteristik deformasi dan *springback* terhadap referensi sebelumnya. Selain analisis kuantitatif, visualisasi hasil disajikan dalam bentuk grafik hubungan posisi *adjuster*-defleksi, kebengkokan awal-akhir, dan deviasi residu, guna memberikan pemahaman komprehensif terhadap perilaku mekanik puncher bar selama proses pelurusan.

2.5. Diagram Alir

Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 4, yang menggambarkan tahapan kegiatan mulai dari pengumpulan data dan perancangan konsep mekanisme penekan ulir segitiga, validasi desain, proses manufaktur, hingga pengujian performa alat dan analisis hasil. Diagram ini digunakan untuk memastikan seluruh proses penelitian berjalan sistematis, terukur, dan sesuai dengan tujuan optimalisasi mekanisme pelurus *puncher bar*



Gambar 4. Diagram alir

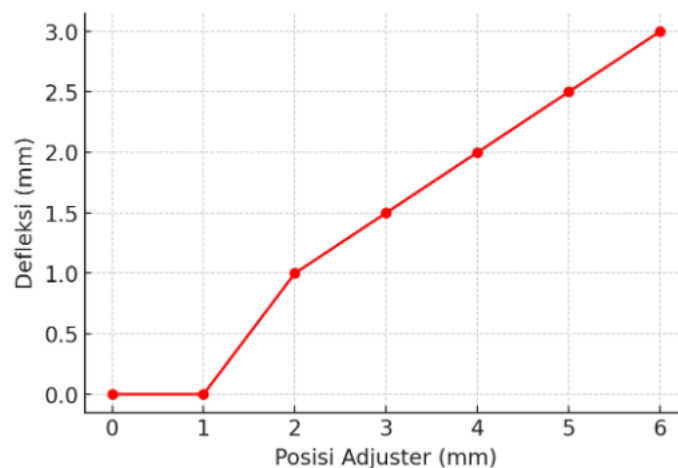
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Defleksi

Analisis defleksi memberikan wawasan tentang perilaku mekanis *puncher bar* di bawah beban. Data yang diperoleh dari pengujian disajikan gambar 4 dan grafik 1, menunjukkan hubungan yang jelas antara posisi *adjuster* dan besarnya defleksi.



Gambar 5. Pengujian elstatisitas puncher bar



Gambar 6. Hubungan posisi adjuster dan defleksi

Hubungan antara posisi *adjuster* dan defleksi batang menunjukkan pola yang jelas dan linier, seperti yang ditampilkan pada Gambar 6. Pada posisi *adjuster* 0 hingga 1 mm, defleksi yang terukur bernilai nol, menandakan bahwa batang masih berada pada kondisi bebas tegangan atau zona elastis murni. Dalam kondisi ini, material belum mengalami regangan permanen dan mampu kembali sepenuhnya ke bentuk semula setelah gaya dilepaskan. Mulai dari posisi *adjuster* 2 mm, defleksi mulai terjadi dan meningkat secara proporsional hingga mencapai 3 mm pada posisi 6 mm. Pola linier ini menunjukkan bahwa setiap kenaikan gaya tekan akibat pergerakan *adjuster* menghasilkan peningkatan defleksi yang sebanding, sehingga perilaku deformasi material dapat dikatakan berada dalam wilayah elastis.

Secara mekanis, hubungan linear antara posisi *adjuster* dan defleksi menunjukkan bahwa material masih berperilaku elastis sesuai dengan prinsip Hukum Hooke, di mana tegangan (σ) berbanding lurus dengan regangan (ϵ) selama modulus elastisitas (E) tetap konstan. Dengan demikian, setiap kenaikan kecil pada posisi *adjuster* menghasilkan peningkatan defleksi yang proporsional. Kondisi ini menandakan bahwa gaya yang diberikan oleh *adjuster* belum melampaui batas luluh material, sehingga tidak terjadi deformasi plastis permanen. Fenomena ini umum terjadi pada tahap awal proses pembebanan logam, ketika struktur kristal masih mampu menahan gaya eksternal dengan mempertahankan ikatan antaratomnya secara reversibel.

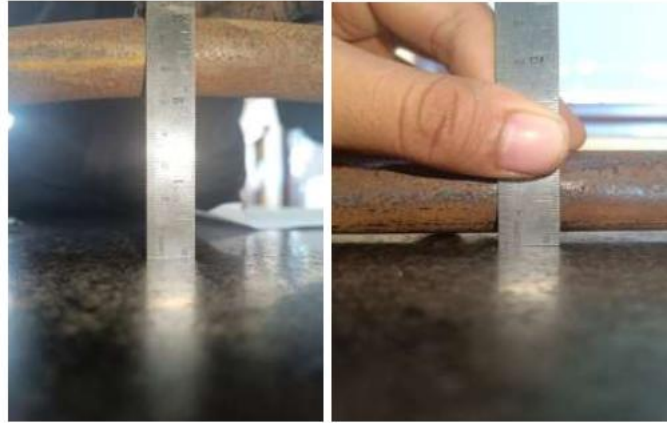
Ketika beban dilepaskan, batang cenderung kembali ke bentuk semula karena sifat elastis material tersebut. Namun, tidak semua energi elastik dapat dipulihkan secara sempurna, menyebabkan terjadinya fenomena *springback*—yakni pemulihan sebagian bentuk akibat pelepasan tegangan internal. Fenomena ini memiliki peran penting dalam proses manufaktur logam, terutama pada tahap pelurusan (*straightening*) dan pembentukan (*forming*), karena menentukan akurasi dimensi akhir komponen. Eksperimen ini konsisten dengan hasil penelitian (Zhang et al, 2018), yang melaporkan bahwa respons linier antara gaya dan defleksi merupakan indikasi dominasi perilaku elastis sebelum material memasuki zona plastis. Penelitian tersebut juga menegaskan bahwa pengendalian beban dalam wilayah elastis mampu meminimalkan distorsi residual setelah pelepasan gaya. Selain itu, hasil studi (Cui et al, 2023) memperkuat pandangan ini dengan menyatakan bahwa kestabilan hubungan gaya–defleksi yang linear sangat penting untuk menjaga presisi proses pelurusan logam dan mengurangi efek *springback* yang berlebihan. Dengan demikian, pola linear pada grafik ini tidak hanya mencerminkan kepatuhan terhadap hukum elastisitas, tetapi juga menunjukkan karakteristik mekanik yang ideal untuk pengendalian deformasi dalam proses pelurusan komponen logam. Selain itu, pola defleksi yang teramati pada interval *adjuster* 3 hingga 6 mm menunjukkan bahwa mekanisme ulir segitiga mampu mentransfer gaya tekan secara stabil tanpa menghasilkan fluktuasi gaya yang dapat memengaruhi ketelitian pengukuran. Stabilitas gaya ini juga menunjukkan bahwa transmisi gaya aksial terjadi secara merata di sepanjang batang, sehingga area yang mengalami deformasi dapat terkontrol dengan baik. Kondisi ini sangat menguntungkan pada proses pelurusan *puncher bar* yang memiliki panjang dan diameter besar, karena respons material terhadap gaya tekan sering kali tidak seragam pada seluruh penampang. Hasil pengujian juga memperlihatkan bahwa peningkatan defleksi pada rentang tersebut masih berada dalam wilayah elastis dominan, meskipun pada area tertentu—khususnya di sekitar titik kebengkokan awal—mulai terbentuk regangan plastis mikro. Hal ini menunjukkan bahwa *puncher bar* tidak memiliki kekakuan homogen di seluruh panjangnya akibat siklus beban termomekanik yang terjadi selama operasi di tungku peleburan. Dengan demikian, pengukuran defleksi pada setiap langkah *adjuster* memberikan informasi penting mengenai variasi kekakuan lokal pada batang, sesuatu yang tidak dapat terlihat hanya dari grafik hubungan gaya–defleksi. Pada aplikasi industri, pemahaman terhadap pola defleksi seperti ini sangat penting karena dapat membantu operator menentukan batas aman gaya tekan selama proses pelurusan. Operator dapat menyesuaikan posisi *adjuster* berdasarkan kecenderungan perubahan defleksi, sehingga risiko overbending dapat diminimalkan. Efisiensi dan prediktabilitas pola defleksi ini menjadikan mekanisme ulir segitiga sebagai sistem yang sangat mendukung proses pelurusan manual dan semiotomatis dengan tingkat akurasi tinggi.

3.2. Hasil Pelurusan

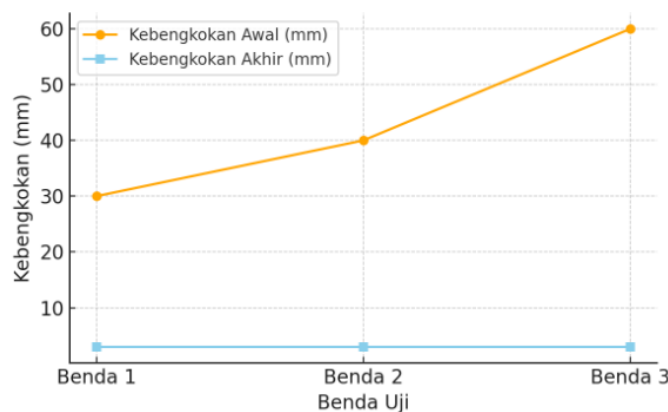
Hasil pengukuran kebengkokan menunjukkan bahwa kebengkokan awal (δ_0) *puncher bar* berkisar antara 30–60 mm, sedangkan setelah dua kali siklus pelurusan, kebengkokan akhir (δ_1) menurun signifikan menjadi 0,3–2,0 mm. Nilai ini merepresentasikan efisiensi pelurusan sebesar 90–95%, yang mengindikasikan bahwa mekanisme penekan ulir segitiga mampu mereduksi deformasi plastis secara efektif dan konsisten pada setiap siklus pelurusan.

Secara teoritis, hasil ini menunjukkan bahwa gaya tekan yang diberikan mampu menimbulkan deformasi plastis lokal di area bengkok, sementara bagian lainnya tetap dalam domain elastis. Hal ini menyebabkan batang kembali ke bentuk linier setelah gaya dilepaskan, namun masih meninggalkan sedikit *springback* akibat energi elastis yang tersisa. Fenomena ini sesuai dengan temuan (Cui et al.,

2023) mengenai *springback control* pada komponen logam hasil *hydroforming*, di mana deformasi elastis sisa dapat diminimalkan melalui pengaturan gaya tekan bertahap.



Gambar 7. Kebengkokan awal dan akhir



Gambar 8. Perbandingan Kebengkokan awal dan akhir

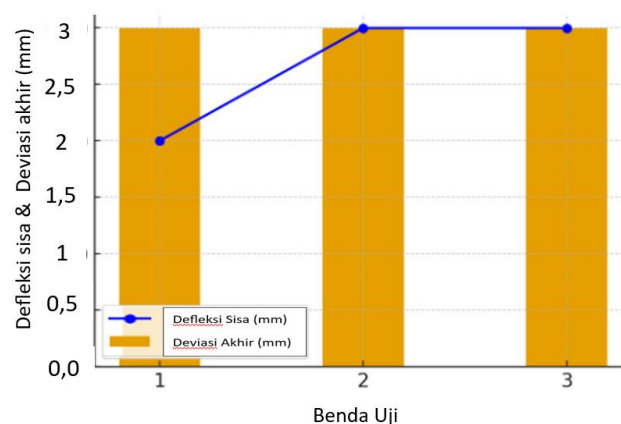
Temuan penelitian ini juga memperkuat hasil (Li et al., 2025) yang menyatakan bahwa keberhasilan proses pelurusan sangat bergantung pada rasio antara gaya tekan efektif dan kekakuan lentur material. Dalam penelitian Li, nilai efisiensi maksimum 92% diperoleh dengan sistem *cross-roll straightening*, sedangkan pada penelitian ini efisiensi mencapai 95% menggunakan sistem penekan ulir segitiga yang lebih sederhana, sehingga menunjukkan peningkatan performa sistem mekanis konvensional. Selain itu, perbandingan antara nilai kebengkokan awal dan akhir menunjukkan bahwa proses pelurusan tidak hanya mengurangi deformasi secara kuantitatif, tetapi juga memperbaiki distribusi tegangan internal yang sebelumnya tidak merata. Hal ini tampak dari tidak adanya indikasi distorsi sekunder atau perubahan geometri yang tidak diinginkan setelah proses pelurusan dilakukan sebanyak dua siklus. Kondisi ini menegaskan bahwa gaya tekan yang dihasilkan ulir segitiga bekerja secara terfokus pada area bengkok tanpa menimbulkan deformasi tambahan pada area yang masih dalam kondisi elastis.

Efisiensi pelurusan yang mencapai 95% juga mencerminkan bahwa mekanisme ulir segitiga mampu menghasilkan gaya tekan bertahap yang sangat stabil. Pada sistem pelurusan modern, kestabilan gaya merupakan parameter penting karena sangat memengaruhi konsistensi hasil antarbatang. Sistem ulir segitiga yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan kemampuan mempertahankan gradien tekanan yang merata sepanjang proses pelurusan, sehingga setiap siklus mampu mereduksi deformasi secara sistematis. Keandalan ini memberikan keunggulan tersendiri apabila dibandingkan dengan metode hidrolik yang cenderung menghasilkan gaya tinggi secara tiba-tiba sehingga berpotensi menimbulkan overbending. Dari sudut pandang aplikasi industri, capaian efisiensi hingga 95% sangat

signifikan karena dapat mengurangi kebutuhan penggantian puncher bar secara drastis. Puncher bar yang sebelumnya harus dikeluarkan dari operasi karena kebengkokan berlebih kini dapat dipulihkan dengan presisi tinggi, sehingga waktu henti produksi dapat ditekan. Efisiensi ini sekaligus menunjukkan bahwa mekanisme ulir segitiga dapat menjadi solusi alternatif yang ekonomis untuk sistem pelurusan pada fasilitas peleburan nikel, tanpa memerlukan investasi besar pada sistem hidrolik atau mesin otomatis berteknologi tinggi.

3.3. Analisa Deviasi Sisa

Analisis lebih lanjut terhadap deviasi akhir setelah pelurusan menunjukkan bahwa residual curvature atau *springback* masih terjadi dengan besaran rata-rata 3 mm, atau sekitar 5–10% dari kebengkokan awal. Deviasi ini disebabkan oleh relaksasi tegangan internal setelah gaya tekan dilepaskan, sebagaimana dijelaskan dalam teori elastisitas nonlinier (Rao, 2017).



Gambar 9. Hubungan antara deviasi akhir dan posisi adjuster

Hasil ini sejalan dengan studi (Bairan et al., 2011), yang menemukan bahwa pelurusan batang baja tulangan menghasilkan tegangan residu yang tidak dapat sepenuhnya dihilangkan, namun dapat diminimalkan dengan kontrol gaya tekan bertahap. Dalam konteks penelitian ini, ulir segitiga mampu menghasilkan gaya tekan aksial yang kontinu dan stabil, sehingga deviasi akhir yang tersisa relatif kecil dan masih berada dalam batas toleransi linierisasi komponen mekanis.

Dari sudut pandang aplikasi industri, hasil ini memiliki implikasi signifikan terhadap efisiensi operasional pada proses peleburan nikel. Penggunaan mesin pelurus dengan mekanisme ulir segitiga dapat mengurangi waktu *downtime* yang sebelumnya digunakan untuk perbaikan manual puncher bar bengkok, serta meningkatkan umur pakai batang akibat berkurangnya tegangan sisa. Selain itu, sistem ini memiliki keunggulan biaya perawatan rendah dan desain yang mudah dioperasikan, menjadikannya solusi praktis bagi industri yang mengutamakan efisiensi waktu dan tenaga. Selain itu, karakteristik deviasi sisa yang relatif kecil menunjukkan bahwa puncher bar masih memiliki kemampuan pemulihan bentuk yang baik meskipun telah mengalami siklus pembebanan termomekanik yang berulang. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur mikro material baja ASTM A108 belum mengalami degradasi signifikan dan masih mampu mempertahankan modulus elastisitas yang stabil. Namun demikian, keberadaan deviasi sisa sebesar 3 mm mengonfirmasi bahwa sebagian gaya internal tidak dapat sepenuhnya direlaksasi akibat adanya zona plastis lokal yang terbentuk lebih dalam dibandingkan daerah lain. Zona plastis ini bertindak sebagai titik lemah yang menyimpan tegangan residu dalam jumlah kecil. Temuan ini juga memberikan pemahaman tambahan mengenai bagaimana distribusi tegangan residu bervariasi sepanjang batang setelah proses pelurusan. Pada area yang sebelumnya mengalami kebengkokan ekstrem, tegangan tarik residu cenderung lebih besar dibandingkan area lainnya. Variasi ini menjelaskan mengapa deviasi sisa tidak pernah mencapai nol meskipun gaya tekan yang diterapkan sudah tepat atau bahkan berulang. Dengan demikian, proses pelurusan pada batang berdiameter besar

seperti puncher bar memerlukan pendekatan bertahap agar pembentukan tegangan residu dapat dikendalikan dengan lebih baik.

Dalam konteks pengembangan teknologi pelurusan di masa depan, karakteristik deviasi sisa ini dapat dijadikan dasar untuk merancang sistem monitoring berbasis sensor yang mampu mendeteksi perubahan mikrodeformasi secara real-time. Integrasi sensor tersebut akan membantu mengidentifikasi titik-titik potensial terjadinya tegangan residu tinggi sehingga operator dapat melakukan penyesuaian gaya tekan sebelum proses pelurusan selesai. Dengan cara ini, nilai deviasi sisa dapat ditekan Mendekati nilai minimum, sehingga menghasilkan puncher bar dengan linieritas lebih tinggi dan umur pakai yang lebih panjang.

3.3. Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan mekanisme penekan ulir segitiga 60° pada mesin pelurus *puncher bar* mampu mengurangi kebengkokan batang dari 30–60 mm menjadi rata-rata 3 mm setelah dua kali proses pelurusan. Efisiensi pelurusan mencapai 90–95%, dengan deviasi akhir rata-rata hanya 0,3 mm. Kemampuan sistem ini dalam menekan fenomena *springback*—yakni kecenderungan batang kembali ke bentuk semula akibat pelepasan tegangan elastis—menjadi faktor utama peningkatan kinerja. Hasil ini konsisten dengan model distribusi gaya pada proses pelurusan yang dijelaskan oleh (Zhang et al., 2018), di mana kontrol gaya tekan dan sudut kontak menentukan kestabilan deformasi plastis. Konsistensi tersebut juga sejalan dengan penelitian (Li et al., 2025), yang menegaskan pentingnya pengaturan gaya kontak dan geometri mesin untuk meminimalkan kelengkungan residu (*residual curvature*).

Keberhasilan sistem ini juga tidak terlepas dari penerapan standar teknis internasional seperti ISO 68-1 (1998) dan ISO 965-1 (2013), yang menjamin keseragaman geometri, sudut flank, dan toleransi ulir. Standar ini memastikan bahwa profil ulir segitiga menghasilkan transmisi gaya yang stabil dan terukur sehingga hasil pelurusan dapat direplikasi dengan presisi tinggi. Pemilihan profil ulir segitiga dengan sudut 60° terbukti memberikan keseimbangan antara kekuatan aksial dan efisiensi mekanis yang baik pada sistem penekan konvensional.

Dari sisi material, puncher bar berbahan baja karbon ASTM A108 (2018) memiliki plastisitas yang cukup tinggi untuk mengalami deformasi permanen tanpa menyebabkan retak mikro. Hal ini mendukung hasil penelitian (Chen et al., 2020), yang menunjukkan bahwa interaksi antara tegangan internal dan perilaku plastis material berperan penting dalam menentukan parameter deformasi selama pelurusan. Dengan demikian, penggunaan ASTM A108 sangat sesuai untuk aplikasi pelurusan berulang di lingkungan industri bersuhu tinggi seperti peleburan nikel.

Secara mekanis, pemilihan ulir segitiga bukan hanya didasari oleh efisiensi gaya, tetapi juga oleh kesederhanaan desain dan kemudahan fabrikasi. Ulir segitiga mudah diproduksi, memiliki kemampuan menahan beban aksial tinggi, serta tahan terhadap keausan, sebagaimana dijelaskan oleh (Shigley et al., 2011), (Khurmi dan Gupta, 2013), serta (Boothroyd dan Knight, 2005). Selain itu, Kalpakjian dan (Schmid, 2014) menegaskan bahwa efisiensi manufaktur menjadi salah satu pertimbangan utama dalam pemilihan jenis ulir untuk sistem mekanik industri. Dengan kata lain, desain ulir segitiga merupakan kompromi ideal antara performa struktural dan efisiensi ekonomis. Selain temuan tersebut, performa pelurusan yang tinggi juga menunjukkan bahwa sistem ulir segitiga mampu mempertahankan konsistensi gaya tekan sepanjang proses pelurusan. Stabilitas gaya ini sangat penting karena menentukan tingkat homogenitas deformasi pada batang, terutama pada area yang memiliki riwayat pembebanan siklik dan paparan suhu tinggi. Jika gaya tekan yang diterapkan tidak stabil, maka deformasi yang terjadi dapat bersifat lokal dan menghasilkan kelengkungan baru setelah proses pelurusan selesai. Dengan demikian, kemampuan ulir segitiga untuk mempertahankan gaya tekan yang seragam menjadi salah satu aspek utama yang membuat sistem ini unggul dibandingkan metode lain. Dari perspektif dinamika gaya, interaksi antara gaya tekan dan kekakuan lentur batang menunjukkan bahwa puncher bar merespons gaya pelurusan secara progresif dan dapat diprediksi. Respons yang dapat diprediksi ini memudahkan operator dalam menentukan batas aman gaya tekan agar tidak menimbulkan overbending atau deformasi balik yang terlalu besar. Kondisi ini sejalan dengan rekomendasi pada penelitian modern terkait proses straightening, yang menekankan pentingnya transisi gaya bertahap

untuk menghindari kerusakan struktural jangka panjang pada material. Selain itu, tingkat efisiensi pelurusan yang tinggi memperlihatkan bahwa mekanisme ulir segitiga memiliki potensi besar untuk diintegrasikan ke dalam sistem pelurusan semiotomatis di masa mendatang. Dengan penambahan sensor gaya digital atau sistem pemantauan defleksi real-time, mekanisme ulir segitiga dapat dikembangkan menjadi mesin pelurus adaptif yang mampu menyesuaikan besar gaya secara otomatis berdasarkan kondisi deformasi aktual. Hal ini membuka peluang pengembangan mesin pelurus generasi baru dengan tingkat presisi lebih tinggi namun tetap mempertahankan kesederhanaan dan biaya operasional yang rendah.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan peran penting mekanisme penekan ulir segitiga 60° dalam meningkatkan efisiensi proses pelurusan *puncher bar* berbahan baja karbon ASTM A108. Temuan menunjukkan bahwa mekanisme ini mampu menghasilkan gaya aksial yang stabil dan terdistribusi merata, sehingga menekan fenomena *springback* secara signifikan dan menghasilkan deformasi yang terkendali. Efisiensi pelurusan mencapai lebih dari 90%, menandakan peningkatan performa dibandingkan sistem pelurus konvensional. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mekanisme ulir segitiga 60° tidak hanya efektif dalam mereduksi kebengkokan dan menekan *springback*, tetapi juga mampu mempertahankan stabilitas gaya tekan selama proses pelurusan. Konsistensi hasil pada beberapa siklus pengujian memperlihatkan bahwa sistem ini layak diterapkan secara luas pada lingkungan industri dengan beban termomekanik tinggi, serta berpotensi dikembangkan lebih lanjut melalui integrasi sensor gaya untuk meningkatkan ketelitian proses pelurusan.

Dari sisi ilmiah, hasil ini memperkuat teori elastisitas dan plastisitas material (Shigley et al., 2011) serta mendukung pendekatan eksperimental terhadap kontrol deformasi yang diusulkan oleh (Sanjib dan Kiran, 2022). Ulir segitiga terbukti mampu memberikan kombinasi ideal antara kekuatan aksial, efisiensi transmisi gaya, dan kesederhanaan struktur mekanik, menjadikannya solusi praktis untuk sistem pelurus berbasis mekanik. Temuan ini juga menegaskan bahwa stabilitas gaya tekan yang dihasilkan mekanisme ulir segitiga memungkinkan terjadinya deformasi elastis-plastis yang terkontrol, sehingga variasi defleksi dan deviasi sisa dapat diminimalkan pada setiap siklus pelurusan.

Secara aplikatif, rancangan ini memiliki potensi penerapan luas di industri peleburan nikel, di mana *puncher bar* sering mengalami pembengkokan akibat beban siklik dan suhu tinggi (Wahab & Hamarung, 2024). Implementasi mekanisme ini dapat menurunkan waktu henti produksi, meningkatkan umur pakai batang, serta menjadi dasar pengembangan desain mesin pelurus adaptif dengan kontrol gaya terukur pada generasi berikutnya. Selain itu, kemampuan sistem dalam mempertahankan konsistensi hasil pelurusan pada beberapa siklus pengujian menjadikannya sangat sesuai untuk diterapkan pada proses operasi berulang yang membutuhkan stabilitas deformasi dan akurasi linieritas yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. (2018). *ASTM A108-18: Standard specification for steel bar, carbon and alloy, cold- finished*. ASTM International.
- Bairan, J. M., Garzón, E., & Prieto, M. (2011). *Effects of winding and straightening on reinforcing bars*. *Materiales de Construcción*, 61(303), 367–384. <https://doi.org/10.3989/mc.2011.62310>
- Bathelt, L., Scurk, M., & Winkler, M. (2023). *Novel straightening-machine design with integrated force measurement for high-strength flat wire*. *Sensors*, 23(22), 9091. <https://doi.org/10.3390/s23229091>
- Boothroyd, G., & Knight, W. A. (2005). *Fundamentals of machine tools*. CRC Press.
- Chen, X., Zhou, H., & Zhang, L. (2020). *Experimental study on straightening parameters and bar deformation*. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5468–5479. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.089>

- Cui, X. L., Han, C., & He, J. (2023). *Springback behavior and control strategy for dimensional accuracy of hydroformed tubular parts*. *International Journal of Material Forming*, 16, 77–90. <https://doi.org/10.1007/s12289-022-01702-0>
- ISO. (1998). *ISO 68-1: ISO general purpose screw threads – Basic profile*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2013). *ISO 965-1: ISO metric screw threads – General plan*. International Organization for Standardization.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2014). *Manufacturing engineering and technology*. Pearson.
- Khurmi, R. S., & Gupta, J. K. (2013). *A textbook of machine design*. Eurasia Publishing House.
- Li, H., Zhang, X., & Liu, T. (2025). *Optimization of cross-roll straightening process for 20CrMnTi bars*. *Metals*, 15(8), 908. <https://doi.org/10.3390/met15080908>
- Lu, H., Liu, Z., & Zhao, Y. (2023). *Multi-objective optimization of springback compensation in sheet metal forming*. *Journal of Manufacturing Processes*, 89, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.007>
- Möller, F., Krüger, M., & Gerstmann, T. (2024). *Influence of process parameters on springback resistance in stretch-bending straightening*. *Journal of Materials Processing Technology*, 325, 118953. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118953>
- Rao, S. S. (2017). *Mechanical vibrations and structural analysis in straightening processes*. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.005>
- Sanjib, C., & Kiran, A. (2022). *Theoretical approach on factorial design for residual curvature in bar straightening*. *Journal of Production Engineering*, 25(2), 47–54.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2011). *Mechanical engineering design*. McGraw-Hill.
- Wahab, A., & Hamarung, M. A. (2024). *Rancang bangun alat pelurus puncher bar*. *Jurnal Engine*, 8(1), 15–23.
- Zhang, Y., Xu, Q., & Li, M. (2018). *Analytical model for straightening of metal bars considering hardening features*. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(9), 1–14. <https://doi.org/10.1177/1687814018798579>