



TINJAUAN LITERATUR: PENYEMPURNAAN PROSES PENEMPAAN LOGAM DENGAN ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR

Ibnu Rosyid Ridwana¹, Fakhrurriza², Boy Arya Sadewa ³
Ratna Aulia Puspita Sari⁴, Zalfa Arridwan⁵, Sri Hastuti^{6*}

Program Studi S1 Teknik Mesin, Universitas Tidar

Alamat: Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsan, Magelang Utara, Jawa Tengah 56116

*e-mail corresponding: ibnu.rosyid.ridwana@students.untidar.ac.id / hastutisrimesin@untidar.ac.id

Abstract. Variations in billet temperature often lead to uneven stress and heat distribution on the dies during closed-die hot forging. This review aims to identify the die regions that are most vulnerable to excessive loading and to examine how thermal conditions influence the quality of the forged product. The literature analyzed includes studies that combine finite element simulations with actual forging trials carried out at different heating temperatures. The findings consistently show that the die edges experience the highest stress concentrations, particularly when forging is performed at lower billet temperatures, which increases the likelihood of local plastic deformation. In contrast, temperatures within the optimal range promote smoother metal flow, more complete die filling, and a longer die service life. Overall, this review highlights the crucial role of proper billet temperature control in maintaining dimensional accuracy and ensuring stable forging performance.

Keywords: hot forging, billet temperature, die stress, thermomechanical distribution, finite element simulation

Abstrak. Perubahan suhu billet sering memicu ketidakseimbangan tegangan dan panas pada cetakan dalam proses *closed-die hot forging*. Kajian ini disusun untuk mengidentifikasi area die yang paling rentan serta melihat pengaruh kondisi termal terhadap kualitas pembentukan produk. Literatur yang dihimpun berasal dari penelitian yang mengombinasikan simulasi elemen hingga dengan uji tempa nyata pada berbagai temperatur pemanasan. Hasil kajian menunjukkan bahwa tepi cetakan selalu menjadi titik konsentrasi tegangan tertinggi, terutama pada suhu billet rendah yang meningkatkan risiko deformasi plastis. Sementara itu, temperatur optimum mampu menghasilkan aliran logam yang lebih baik dan memperpanjang umur pakai cetakan. Kajian ini menegaskan pentingnya pengaturan suhu billet untuk menjaga ketelitian dan kestabilan proses forging.

Kata kunci: hot forging, suhu billet, tegangan cetakan, distribusi termomekanis, finite element simulation

LATAR BELAKANG

Proses hot forging sering menghadapi permasalahan terkait ketidakseimbangan distribusi tegangan dan temperatur pada cetakan (dies), terutama ketika billet dipanaskan pada suhu yang tidak sesuai. Ketidakteraturan ini dapat memicu cacat pembentukan,

Received November 20, 2025; Revised Desember 03, 2025; Januari 01, 2026

* Ibnu Rosyid Ridwana, ibnu.rosyid.ridwana@students.untidar.ac.id

TINJAUAN LITERATUR: PENYEMPURNAAN PROSES PENEMPAAN LOGAM DENGAN ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR

aliran material yang kurang optimal, hingga kerusakan dini pada cetakan akibat konsentrasi beban termomekanik yang berlebihan (Bergas et al., 2023).

Proses tempa merupakan proses pembentukan suatu logam dengan cara penekanan logam ke dalam suatu cetakan sehingga terbentuk suatu produk (Pustaka, 2009). Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas fenomena deformasi, desain preform, kelelahan termomekanik, dan analisis cacat lipatan menggunakan simulasi elemen hingga (FEA). Namun demikian, masih terdapat celah penelitian terkait bagaimana variasi temperatur billet memengaruhi distribusi tegangan dan temperatur pada dies dalam proses hot forging, khususnya pada pembuatan komponen fastener head.

Sejumlah studi menunjukkan bahwa kondisi termal yang tidak terkendali dapat memperburuk pola aliran logam, meningkatkan resistansi deformasi, serta mempercepat keausan die. Oleh karena itu, pemodelan proses melalui simulasi elemen hingga menjadi pendekatan penting untuk memahami karakteristik pembebanan dan respons termal pada cetakan dalam rentang temperatur pemanasan billet 950–1150 °C.

KAJIAN TEORITIS

Penempaan panas (*Hot Forging*) adalah metode manufaktur yang bertujuan membentuk logam dengan memanaskannya hingga suhu rekristalisasi lalu menempanya atau menggunakan tekanan (Forming & Pinion, 2023). Metode ini menghasilkan karakteristik mekanik yang unggul dengan biaya yang cukup hemat (Equbal et al., 2014). Komponen yang dihasilkan, seperti kepala pengikat (*Fastener Heads*), biasanya memiliki bentuk yang berbeda saat dipotong dan dibutuhkan dalam jumlah besar, sehingga penggunaan cetakan tertutup (closed-die) merupakan cara terbaik untuk membuatnya.

Penggunaan simulasi komputer, khususnya Metode Elemen Hingga (FEM) sejak tahun 1980-an menjadikan revolusi pada proses desain produk tempa (Siripath et al., 2024). Dalam memudahkan analisis digunakan simulasi menggunakan program *Finite Element* (FE) seperti MSC Simufact digunakan untuk memodelkan proses deformasi dan termal yang kompleks. Dengan simulasi ini dapat menemukan daerah kegagalan pada cetakan melalui simulasi tegangan dan distribusi suhu lalu dapat meningkatkan proses serta pengurangan waktu dan kehilangan material sebelum percobaan fisik dilakukan (Equbal et al., 2014).

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan *overview* atau studi literatur dari beberapa jurnal, yang jurnal tersebut menerapkan metode gabungan antara eksperimen fisik (experimental work) dan simulasi numerik (numerical simulation). Desain penelitian difokuskan pada proses penempaan panas cetakan tertutup (closed-die hot forging) dengan flash untuk memproduksi kepala pengikat (fastener heads). Pendekatan ini memiliki tujuan untuk membandingkan hasil nyata dengan hasil simulasi guna mengidentifikasi tegangan ekuivalen dan distribusi suhu yang menyebabkan deformasi plastis pada cetakan.

Materi penelitian terdiri dari dua komponen utama, yaitu benda kerja (workpiece) dan perkakas cetakan (die), untuk benda kerja menggunakan baja karbon AISI 1045 berbentuk batang silinder dengan diameter dasar 30 mm yang dipotong menjadi panjang 160 mm untuk menghasilkan sampel sebanyak 20 billet. Dan cetakan (die) Terbuat dari baja paduan 56NiCrMoV7 (DIN 1.2714) yang terdiri dari cetakan atas (upper die) dan cetakan bawah (lower die). Sampel benda kerja dibagi menjadi 5 kelompok pengujian, di mana setiap kelompok terdiri dari 4 buah spesimen yang diberi perlakuan suhu berbeda.

Pengumpulan data melalui beberapa tahapan yaitu pemodelan model 3D benda kerja dan cetakan dibuat menggunakan AutoCAD dan diekspor dalam format ".sat" ke dalam perangkat lunak MSC Simufact Forming. Lalu eksperimen fisik dimana benda kerja dipanaskan pada lima variasi suhu pemanasan, yaitu 1150 derajat celcius, 1100 derajat celcius, 1050 derajat celcius, 1000 derajat celcius, dan 950 derajat celcius. Dan yang terakhir pengukuran data dimensi produk hasil tempa (parameter A, B, C, dan D) diukur secara fisik dan dibandingkan dengan hasil prediksi dimensi dari simulasi.

Analisis data menggunakan metode simulasi elemen hingga (Finite Element Method) dengan bantuan perangkat lunak MSC Simufact. Analisis difokuskan pada dua parameter yaitu distribusi tegangan ekuivalen untuk mengevaluasi area kritis pada cetakan yang memiliki potensi mengalami kegagalan dan distribusi temperatur untuk melihat perpindahan panas selama kontak antara billet dan cetakan.

TINJAUAN LITERATUR: PENYEMPURNAAN PROSES PENEMPAAN LOGAM DENGAN ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR

HASIL

Setiap tahap proses dianalisis secara terpisah pada seluruh rentang temperatur pengujian, yaitu 1150°C, 1100°C, 1050°C, 1000°C, dan 950°C. Hasil eksperimen kemudian dibandingkan dengan simulasi elemen hingga (FE) berdasarkan bentuk dan dimensi produk, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 1. Terdapat konsistensi yang kuat antara hasil eksperimen dan simulasi FE pada semua temperatur pemanasan, tanpa ditemukannya cacat pembentukan ataupun kebutuhan tahap preform tambahan. Pola terbentuknya *flash* menunjukkan kesamaan aliran material antara kedua pendekatan tersebut. Perbandingan dimensi produk pada Tabel 1 menggambarkan kesesuaian yang baik antara hasil praktis dan simulasi. Selain itu, analisis distribusi tegangan ekuivalen dan tegangan utama maksimum pada die atas dan die bawah telah dilakukan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3, di mana nilai tegangan tertinggi tercatat pada area tepi kedua die. Hasil analisis ini dirangkum dalam Tabel 2 (Mohammed et al., 2022).

Tegangan tinggi yang timbul selama proses penempaan menjadi salah satu penyebab utama kegagalan die akibat kombinasi beban mekanis dan temperatur tinggi, sehingga memicu kelelahan termomekanis pada material die. Nilai tegangan ekuivalen maksimum diketahui melampaui kekuatan luluh cetakan sebesar 380 MPa, sehingga deformasi plastis lokal berpotensi terjadi pada area kritis tersebut. Distribusi temperatur pada die atas dan die bawah, yang ditampilkan pada Gambar 4, menunjukkan peningkatan temperatur pada area yang mengalami kontak lebih lama dengan *billet* panas. Die yang telah dipreheating pada 250°C mengalami kenaikan temperatur signifikan terutama pada zona pembentukan kepala pengikat. Temperatur *billet* diukur langsung dari panel digital tungku pemanas, sedangkan temperatur die dipantau menggunakan termometer inframerah. Temuan ini mempertegas bahwa kombinasi beban termal dan mekanis berpengaruh besar terhadap respon die selama proses penempaan (Mohammed et al., 2022).

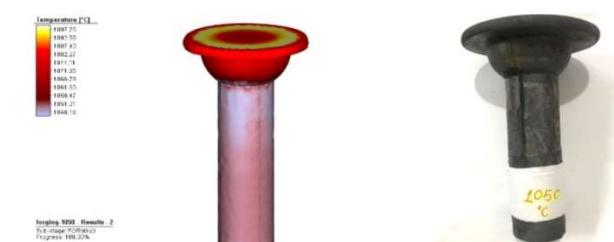
TINJAUAN LITERATUR: PENYEMPURNAAN PROSES PENEMPAAN LOGAM DENGAN ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR



(a)



(b)

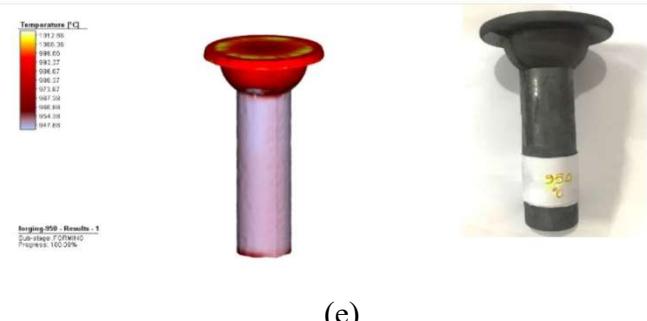


(c)



(d)

TINJAUAN LITERATUR: PENYEMPURNAAN PROSES PENEMPAAN LOGAM DENGAN ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR



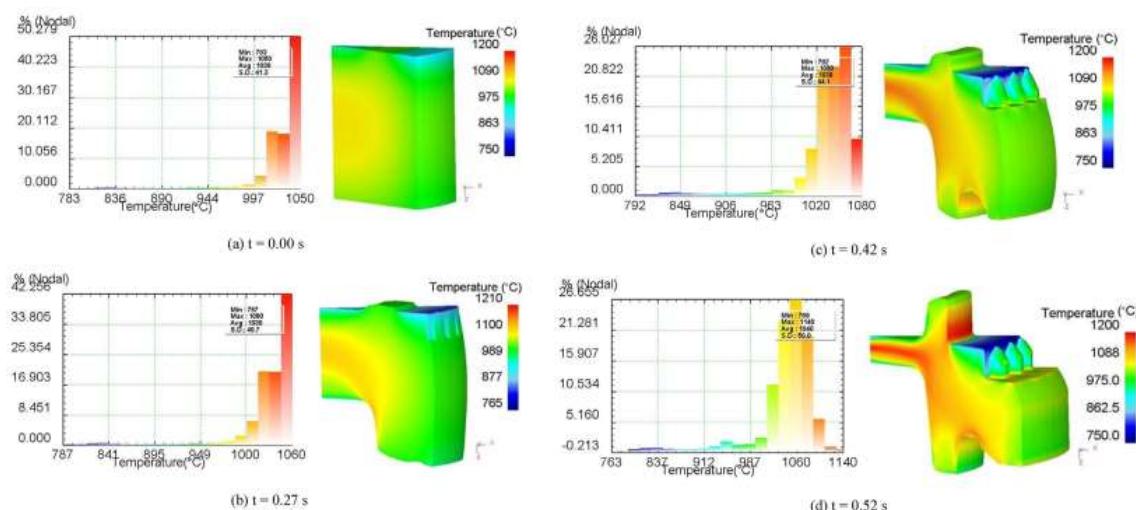
Gambar 1. Hasil dan Analisis Eksperimen pada (a) 1150 °C (b) 1100 °C (c) 1050 °C (d) 1000 °C (e) 950 °C

Pada penelitian (Huang et al., 2022) menunjukkan bahwa temperatur merupakan faktor yang sangat menentukan kualitas akhir produk forging karena secara langsung memengaruhi perilaku deformasi logam, pola aliran material, serta evolusi mikrostruktur selama proses pembentukan. Pada temperatur yang memadai, material mengalami deformasi plastis yang stabil dan mampu mengalir ke seluruh bagian rongga die secara merata. Namun ketika temperatur terlalu rendah, aliran logam menjadi tidak seragam dan resistansi deformasi meningkat, sehingga bagian tertentu dari die tidak terisi secara penuh. Kondisi ini menimbulkan cacat seperti *underfilling* dan daerah kosong pada produk, yang secara langsung menurunkan kualitas bentuk dan integritas struktural komponen. Temuan ini dikuatkan oleh bagian dokumen yang menyebutkan bahwa temperatur yang tidak cukup tinggi menyebabkan “aliran logam tidak sempurna dan risiko cacat meningkat” serta menimbulkan ketidakmampuan mengisi die secara penuh serta retak akibat meningkatnya tegangan internal, terutama pada area deformasi tinggi.

Sebaliknya, ketika forging dilakukan pada temperatur yang berada dalam rentang optimum, material memasuki kondisi termal yang memungkinkan terjadinya *dynamic recrystallization* secara penuh. Proses rekristalisasi dinamis ini menghasilkan butiran mikrostruktur yang halus, seragam, dan memiliki orientasi yang lebih stabil. Struktur butir halus tersebut berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik produk, terutama dalam hal kekuatan, ketangguhan, serta kemampuan menahan beban dinamis. Produk yang ditempa pada temperatur optimum tidak hanya memiliki bentuk yang lebih akurat dan bebas cacat, tetapi juga memiliki performa material yang lebih baik untuk aplikasi beban tinggi.

Namun demikian, penelitian (Huang et al., 2022) juga menunjukkan bahwa temperatur yang terlalu tinggi dapat memberikan dampak negatif terhadap hasil forging. Temperatur yang melebihi batas optimum menyebabkan butir mikrostruktur mengalami pertumbuhan berlebih (*grain growth*), yang pada akhirnya mengurangi kekuatan dan ketahanan fatik produk. Selain itu, temperatur tinggi meningkatkan kemungkinan oksidasi permukaan dan kerusakan lapisan luar material selama proses penempaan. Produk yang ditempa pada kondisi suhu yang terlalu tinggi cenderung memiliki sifat mekanik yang lebih rendah dibandingkan produk yang ditempa pada rentang temperatur optimum, meskipun kemampuan pengisian die cenderung lebih baik. Dengan demikian, terdapat kompromi antara kemudahan deformasi dan kualitas mikrostruktur yang harus diperhatikan.

Secara keseluruhan, penelitian (Huang et al., 2022) menjelaskan bahwa keberhasilan proses forging sangat ditentukan oleh pengaturan temperatur yang tepat. Temperatur yang terlalu rendah menyebabkan cacat pengisian dan peningkatan risiko retak akibat tegangan internal, sementara temperatur optimum menghasilkan mikrostruktur halus dengan sifat mekanik unggul. Temperatur yang terlalu tinggi, meskipun mempermudah aliran deformasi, justru berpotensi menurunkan kekuatan material akibat pertumbuhan butir dan oksidasi berlebih. Temuan ini menegaskan bahwa temperatur bukan hanya memengaruhi proses deformasi, tetapi juga menentukan kualitas struktur internal dan performa akhir produk forging, sehingga kontrol temperatur menjadi aspek kritis dalam desain proses dan pengendalian mutu komponen yang ditempa.



Gambar 2. Distribusi Temperatur (a) $t = 0.00\text{ s}$; (b) $t = 0.27\text{ s}$; (c) $t = 0.42\text{ s}$; (d) $t = 0.52\text{ s}$.

TINJAUAN LITERATUR: PENYEMPURNAAN PROSES PENEMPAAN LOGAM DENGAN ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR

PEMBAHASAN

Ghalehbandi & Biglari tahun 2020 yang sesuai pada referensi (Ghalehbandi & Biglari, 2020) menjelaskan dalam proses *hot forging*, cetakan mengalami tekanan tinggi selama proses pengisian dan juga ekstraksi bagian ketika cetakan tempa didinginkan oleh pelumas. Tingkat tekanan yang tinggi ini dapat menyebabkan timbulnya dan pertumbuhan kerusakan pada cetakan. Secara umum, kerusakan pada cetakan tempa dapat diklasifikasikan ke dalam kategori berikut: keausan gesekan, deformasi mekanis permukaan cetakan, dan oksidasi permukaan pada suhu tinggi (Hawryluk et al., 2020).

Mohammed dkk tahun 2022 yang sesuai pada referensi (Mohammed et al., 2022). Pada tabel 1 dijelaskan konvergensi dimensi antara nilai rata-rata jumlah produk dari pengalaman praktis peneliti dan hasil yang diperoleh dengan elemen hingga. Simbol B menunjukkan suhunya pada 1100 °C. Simbol C menunjukkan kepala formasi melingkar dengan afinitas tertinggi pada 950 °C. Simbol D menunjukkan ketebalan flash dengan konvergensi terdekat pada 1000 °C. Variasi dimensi antara hasil metode yang sebenarnya dan nilai yang diharapkan untuk analisis elemen tertentu bergantung pada kompleksitas formasi dan rongga cetakan, serta apakah proses pembentukan adalah satu tahap atau multi-tahap. Selain itu, ini menunjukkan posisi potongan tempa pada cetakan bawah, yang berbeda pada setiap siklus palu sesuai dengan pengalaman operator produksi. (B) dan turunkan diameter *flash* (A) (Mohammed et al., 2022). Gao dkk tahun 2019 yang sesuai pada referensi (Gao et al., 2019) menjelaskan bahwa Pada proses forging, suhu billet yang digunakan biasanya tinggi, misalnya 1000 °C, dan suhu preheat die sekitar 250 °C (Chan et al., 2009). Temperatur yang tinggi membantu memudahkan deformasi material dan mengurangi risiko cacat seperti retak dan deformasi yang tidak diinginkan. Selain itu, suhu yang tepat dapat mempengaruhi aliran material dan kualitas hasil forging secara keseluruhan (Gao et al., 2019).

Mohammed dkk tahun 2022 yang sesuai pada referensi (Mohammed et al., 2022) menjelaskan bahwa warna kuning menunjukkan bahwa tegangan ekuivalen didistribusikan ke seluruh area pembentukan. Tegangan meningkat lebih lanjut di sekitar tepi dan ujung cetakan. Ini terlihat terutama di area di mana flash terbentuk di area pelubangan. Pada gilirannya, hal ini dapat menyebabkan cetakan mengalami kerusakan

permanen dan panas dan kerusakan alat kerja yang signifikan selama proses penempaan. Pastikan bahwa tegangan ekuivalen tidak melampaui tegangan luluh saat merancang alat dan memilih logam cetakan karena ini menunjukkan bahwa nilai tegangan ekuivalen telah melampaui titik luluh logam cetakan. Pada tabel 5 juga ditunjukkan bahwa cetakan bawah memiliki tegangan ekuivalen yang lebih tinggi daripada cetakan atas. Nilai tegangan ekuivalen tertinggi pada cetakan bawah adalah 739,70 MPa / 240,64 dan produk pada suhu pemanasan 950 °C. Cetakan bawah lebih rentan terhadap suhu tinggi karena lebih banyak bersentuhan dengan bagian yang dipanaskan. Karena jumlah penempaan yang lebih besar dan kelelahan logam, area yang bersentuhan lebih lama dengan logam lebih aus(Mohammed et al., 2022).

Biba dkk tahun 2020 yang sesuai pada referensi (Biba et al., 2020), menegaskan bahwa penggunaan persamaan *Laplace* untuk menghasilkan permukaan *isothermal (equipotential)* terbukti efektif dalam merancang preform yang optimal, memastikan pengisian cetakan secara lengkap, mengurangi pembentukan lipatan (*laps*), serta mengurangi beban *forging*. Hasil studi kasus industri menunjukkan bahwa metode ini mampu meminimalkan cacat permukaan dan mengurangi limbah material, sekaligus meningkatkan stabilitas deformasi selama proses *forging* (Biba et al., 2020).

Hawryluk dkk tahun 2020 yang sesuai pada referensi (Hawryluk et al., 2020) menambahkan tentang mekanisme keausan pada alat forging, termasuk pengaruh kondisi proses seperti suhu dan kontak antara material yang diforging dan alat, serta analisis geometris dan mikrostruktur alat yang mengalami degradasi selama proses forging. Proses keausan pada alat forging sangat kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai mekanisme, termasuk keausan abrasif, kelelahan termomekanik, spalling, dan deformasi plastis. Secara umum, alat mengalami fase awal dengan keausan yang rendah, diikuti oleh periode percepatan keausan akibat degradasi permukaan, dan akhirnya menunjukkan penurunan kecepatan keausan pada tahap akhir. Penurunan ini dikonfirmasi melalui simulasi FE yang menunjukkan penurunan tekanan selama proses, yang berkontribusi terhadap pengurangan keausan (Hawryluk et al., 2020). Pembahasan menekankan perlunya pengembangan model yang lebih komprehensif yang mampu mengintegrasikan berbagai mekanisme keausan agar prediksi umur alat menjadi lebih akurat. Selain itu, penelitian ini menyoroti pentingnya kombinasi metode eksperimen dan numerik,

TINJAUAN LITERATUR: PENYEMPURNAAN PROSES PENEMPAAN LOGAM DENGAN ANALISIS TEGANGAN DAN TEMPERATUR

termasuk analisis mikrostruktur, pengukuran geometris, dan simulasi FE, untuk memahami secara mendalam hubungan antara kondisi proses forging dan degradasi alat. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat digunakan untuk meningkatkan desain alat, memperpanjang umur pakainya, dan mengoptimalkan proses forging secara keseluruhan (Hawryluk et al., 2020).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kajian ini menegaskan bahwa perubahan suhu billet memiliki pengaruh besar terhadap distribusi tegangan dan panas pada cetakan selama proses closed-die hot forging, di mana tepi die selalu menjadi area paling rentan menanggung beban berlebih, terutama pada suhu billet yang lebih rendah yang cenderung memicu deformasi plastis dan keausan dini. Suhu yang berada pada rentang optimum terbukti memberikan aliran material yang lebih stabil, pengisian rongga yang lebih lengkap, serta hasil dimensi yang lebih konsisten, sekaligus membantu memperpanjang umur pakai cetakan. Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar proses forging memperhatikan pengaturan suhu billet secara lebih ketat dan mempertimbangkan penggunaan material cetakan alternatif atau desain geometri die yang lebih tahan terhadap beban termomekanik sehingga proses dapat berjalan lebih stabil, efisien, dan menghasilkan kualitas produk yang lebih baik. desain dan material die yang lebih tahan terhadap beban termomekanik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan tinjauan literatur. Penulis berterima kasih kepada para dosen pembimbing dan pengampu mata kuliah yang telah memberikan arahan, masukan ilmiah, serta bimbingan selama proses kajian literatur dan penyusunan naskah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak institusi. Tidak lupa, penulis menghargai kontribusi para peneliti terdahulu yang menjadi dasar pengembangan tinjauan literatur ini. Setiap bantuan, baik berupa diskusi akademik maupun dukungan administratif, sangat berarti bagi terselesaikannya tinjauan literatur ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Biba, N., Vlasov, A., Krivenko, D., Duzhev, A., & Stebunov, S. (2020). ScienceDirect ScienceDirect Closed Die Forging Preform Shape Design Using Isothermal Surfaces Method. *Procedia Manufacturing*, 47(2019), 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.219>
- Chan, W. L., Fu, M. W., Lu, J., & Chan, L. C. (2009). *Journal of Materials Processing Technology Simulation-enabled study of folding defect formation and avoidance in axisymmetrical flanged components*. 209, 5077–5086. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.02.005>
- Equbal, I., Shamim, M., & Ohdar, R. K. (2014). A grey-based Taguchi method to optimize hot forging process. *MSPRO*, 6(Icmpc), 1495–1504. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.129>
- Forming, N., & Pinion, S. (2023). *Hot Forging Die Design Optimization Using FEM Analysis for Near-Net Forming of 18CrNiMo7-6 Steel Pinion Shaft*.
- Gao, P. F., Fei, M. Y., Yan, X. G., Wang, S. B., Li, Y. K., Xing, L., Wei, K., Zhan, M., Zhou, Z. T., & Keyim, Z. (2019). *Prediction of the folding defect in die forging : A versatile approach for three typical types of folding defects*. 39(February), 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.027>
- Ghalehbandi, S. M., & Biglari, F. (2020). Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools. *Engineering Failure Analysis*, 113(April), 104545. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545>
- Hawryluk, M., Kaszuba, M., & Gronostajski, Z. (2020). *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Identification of the relations between the process conditions and the forging tool wear by combined experimental and numerical investigations*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.04.005>
- Huang, X., Zang, Y., Ji, H., & Wang, B. (2022). Combination gear hot forging process and microstructure optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 1242–1259. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.113>
- Mohammed, A. I., Ahmed, I. K., & Allow, M. A. (2022). *Improvement of Metal Forging Processes by Stresses and Temperatures Analysis*. 40(June 2021), 869–878.
- Pustaka, K. (2009). *PROSES FORGING DENGAN VARIASI TEMPERATUR PADA PADUAN*. 509–518.
- Siripath, N., Jantepa, N., & Sucharitpwatskul, S. (2024). *Integrating Taguchi Method and Finite Element Modelling for Precision Ball Joint Manufacturing with AISI 1045 Medium Carbon Steel*. 15(October), 1801–1822. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v15i6.7132>