

TINJAUAN LITERATUR: ANALISIS CACAT PADA COLD FORGING DENGAN FOKUS PADA PEMODELAN NUMERIK DAN PREDIKSI KERUSAKAN MATERIAL

Akbar Masrukhan, Ryan Mahfud Hidayat, Dwi Angga Pratama Saputra, M. Aditya Sahasrakirana, Fitra Wahyu Ramadhani

Universitas Tidar

Email: junaediakbar90@gmail.com, hryan2611@gmail.com, aditkiranaa@gmail.com,
aggprtm3805180@gmail.com, fitrawrd@gmail.com

ABSTRAK

Cold forging merupakan proses pembentukan logam yang banyak digunakan pada industri manufaktur karena mampu menghasilkan komponen dengan presisi tinggi dan efisiensi material yang baik. Selain itu, proses ini juga memiliki tantangan berupa munculnya berbagai jenis cacat yang dapat menurunkan kualitas produk serta mengganggu stabilitas proses. Penelitian ini menyajikan tinjauan komprehensif terhadap lima studi terkait cacat pada proses *cold forging* yang meliputi retak permukaan, retak internal, *chevron cracking*, cacat akibat *piercing*, serta deformasi tidak stabil berupa *inelastic buckling*. Sintesis dari kelima jurnal menunjukkan bahwa cacat tersebut pada umumnya dipengaruhi oleh sifat material, kondisi mikrostruktur, parameter proses, geometri cetakan, dan kondisi tribologi pada antarmuka material dengan cetakan. Tinjauan ini juga menyoroti perkembangan metode prediksi modern, termasuk analisis akar masalah, simulasi numerik berbasis metode elemen hingga, dan model kerusakan anisotropik yang dapat memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai mekanisme kegagalan. Selain itu, studi kasus yang dikaji menegaskan bahwa cacat sering muncul pada tahap awal pembentukan dan dapat berkembang pada tahap selanjutnya apabila tidak dikendalikan dengan tepat. Tinjauan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi optimasi proses *cold forging* serta mendukung upaya menuju sistem produksi yang lebih stabil dan bebas cacat.

Kata Kunci : *Cold Forging, Chevron Cracking, Piercing, Inelastic Buckling.*

Article History

Received: Desember 2025
Reviewed: Desember 2025
Published: Desember 2025

Plagiarism Checker No 800
Prefix DOI : Prefix DOI :
10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi



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

1. PENDAHULUAN

Era Industri manufaktur yang modern menuntut proses produksi yang mampu menghasilkan komponen berkualitas tinggi, presisi, dan efisien baik dari sisi energi maupun material. Salah satunya, teknologi pembentukan logam yang memenuhi tuntutan tersebut yaitu *cold forging*, merupakan proses deformasi plastis pada temperatur di bawah rekristalisasi (Gronostajski et al., 2019). Proses *cold forging* menawarkan sejumlah keunggulan penting, seperti peningkatan kekuatan material akibat *strain hardening* serta kemampuan menghasilkan komponen dengan toleransi dimensi yang ketat dan *surface finish* yang baik (Watanabe et al., 2022). Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan *cold forging* banyak diterapkan pada industri otomotif, permesinan, dan alat sambung (*fastener*).

Namun, proses *cold forging* memiliki tantangan yang berpengaruh akibat sifat pembentukannya ditemperatur rendah. Material yang mengalami deformasi pada kondisi ini memiliki keuletan yang terbatas, sehingga lebih rentan terhadap konsentrasi tegangan, ketidakseragaman aliran logam, dan ketidakstabilan deformasi (Mermer & Ovali, 2023). Kondisi tersebut dapat memicu berbagai cacat (*defects*), baik pada permukaan maupun bagian dalam material. Jenis cacat yang sering ditemui antara lain retak permukaan, retak internal, *chevron cracking*, *piercing defects*, *surface-crack defects*, hingga fenomena *inelastic buckling* yang terkait dengan instabilitas geometri (Lagat et al., 2025). Adanya cacat-cacat ini berdampak langsung pada kualitas produk, tingkat *reject*, dan keandalan komponen selama penggunaan.

Beragam penelitian telah dilakukan untuk memahami mekanisme kegagalan pada proses *cold forging*. Pada tingkat industri, analisis akar masalah (*root cause analysis*) sering digunakan untuk mengidentifikasi penyebab cacat yang muncul pada proses nyata. Studi kegagalan retak pada mur M14 merupakan contoh nyata bagaimana pendekatan ini dapat menjelaskan pengaruh desain cetakan, distribusi tegangan, dan ketidakseragaman aliran material terhadap terjadinya retak selama pembentukan (Aji et al., 2019).

Seiring perkembangan teknologi, pendekatan prediksi berbasis simulasi numerik semakin banyak digunakan. Pemodelan *buckling inelastik*, misalnya, memungkinkan prediksi ketidakstabilan geometri sebelum komponen diproduksi, sehingga mengurangi kebutuhan *trial-and-error* (Lagat et al., 2025). Selain itu, pengembangan model kerusakan anisotropik memberikan kemampuan untuk memperkirakan terjadinya *ductile fracture* berdasarkan perilaku material pada kondisi tegangan kompleks (Watanabe et al., 2022).

Cacat spesifik seperti *chevron cracking* pada paduan aluminium EN AW 7075 menunjukkan bahwa kondisi mikrostruktur dan perlakuan panas (*heat treatment*) turut memainkan peran penting dalam perilaku deformasi internal material (Müller et al., 2023). Demikian pula, cacat *piercing* dan *surface-crack* pada proses ekstrusi fastener mencerminkan kompleksitas interaksi antara tegangan, aliran material, dan desain proses multistage (Lin et al., 2017).

Dengan mensintesis temuan dari berbagai penelitian tersebut, review ini bertujuan memberikan pemahaman menyeluruh mengenai jenis cacat pada proses *cold forging*, mekanisme penyebabnya, serta pendekatan prediktif yang dapat digunakan untuk mencegah kegagalan. Kajian ini diharapkan berkontribusi pada pengembangan proses *cold forging* yang lebih stabil, efisien, dan berorientasi pada kualitas *zero-defect*.

2. METODOLOGI REVIEW

Metodologi review ini disusun untuk menyeleksi dan menggabungkan literatur yang membahas cacat akibat proses *cold forging*. Proses pencarian jurnal dimulai dengan mencari dari beberapa sumber seperti *Google Scholar*, *ScienceDirect*, dan *SpringerLink* dengan menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan cacat pembentukan *cold forging*. Pencarian ini menghasilkan sejumlah artikel, kemudian dipilih kembali berdasarkan kesesuaian topik.

Kriteria pemilihan artikel meliputi empat hal, yaitu artikel harus membahas proses *cold forging*, menjelaskan jenis cacat yang muncul, menggunakan metode analisis atau pemodelan yang jelas, dan memberikan data atau penjelasan yang dapat dibandingkan

dengan penelitian lain. Artikel yang tidak memenuhi kriteria tersebut tidak dimasukkan ke dalam pembahasan.

Dari hasil penyaringan, lima jurnal yang paling relevan dipilih. Lima jurnal ini mewakili penelitian berbasis kasus nyata dan penelitian berbasis pemodelan. Semua jurnal dianalisis menggunakan pendekatan sintesis naratif, yaitu cara menggabungkan isi dari setiap jurnal ke dalam tema yang sama. Analisis dilakukan dengan membaca isi jurnal, mengidentifikasi pokok masalah, membandingkan temuan, serta menarik hubungan antara parameter proses dan munculnya cacat.

Melalui pendekatan ini, review dapat menyajikan gambaran yang jelas mengenai jenis cacat dalam *cold forging*, faktor penyebabnya, dan metode prediksi yang digunakan dalam penelitian terdahulu. Pendekatan ini membantu memberikan pemahaman yang lebih mudah diikuti dan mendukung tujuan untuk menyusun overview yang ringkas serta menyeluruh.

3. KLASIFIKASI CACAT PADA PROSES COLD FORGING

Beragam cacat (*defects*) dapat muncul pada proses *cold forging* sebagai akibat dari sifat material, parameter proses, desain cetakan, dan kondisi tribologi. Berdasarkan sintesis dari lima jurnal yang direview, cacat pada proses tempa dingin dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok utama, yakni retak permukaan dan retak internal, *chevron cracking*, dan ketidakstabilan deformasi seperti *inelastic buckling*.

3.1. Cacat Retak Permukaan dan Retak Internal

Retak permukaan (*surface cracks*) dan retak internal adalah cacat yang paling sering ditemui pada *cold forging*. Cacat ini umumnya disebabkan oleh konsentrasi tegangan lokal, geometri yang tidak optimal, aliran material yang tidak seragam, serta peningkatan kekerasan akibat *strain hardening*.

Dalam penelitian kasus industri mengenai kegagalan mur M14, retak permukaan terbentuk akibat distribusi tegangan tarik lokal pada area tertentu dari geometri cetakan, serta ketidakseimbangan aliran logam selama proses pembentukan (Aji et al., 2019). Temuan ini menunjukkan bahwa desain *die*, radius transisi, dan gaya pembebanan sangat berpengaruh terhadap terbentuknya retak awal.

Retak internal (*internal cracks*) juga dapat terjadi pada proses pembentukan multistage seperti ekstrusi *fastener*. Studi mengenai *piercing and surface-crack defects* menunjukkan bahwa cacat ini dipicu oleh interaksi antara gaya pembebanan tinggi, kualitas permukaan *billet*, dan tahapan *piercing* yang dapat menghasilkan celah internal yang kemudian berkembang selama proses deformasi berikutnya (Lin et al., 2017). Retak internal sering kali baru terlihat setelah pemotongan atau pemeriksaan nondestruktif.

3.2. Chevron Cracking (Central Bursting)

Cacat *chevron cracking* merupakan bentuk retak internal berbentuk pola “V” atau “fishbone” yang terjadi terutama pada proses ekstrusi berdampak tinggi. Fenomena ini berkaitan dengan kondisi tegangan hidrostatik yang tidak memadai di bagian tengah material, sehingga area tersebut mengalami retak internal progresif.

Penelitian *Chevron Cracking During Full Forward Impact Extrusion of EN AW 7075* menunjukkan bahwa cacat ini sangat dipengaruhi oleh kondisi *heat treatment* awal



material, kekerasan, dan kondisi tribologi antara billet dan cetakan. Material aluminium EN AW 7075 yang terlalu keras atau mengalami ketidakhomogenan mikrostruktur menunjukkan kecenderungan lebih tinggi mengalami *chevron cracking*. Hal ini mengindikasikan bahwa kontrol mikrostruktur dan kondisi antarmuka sangat penting untuk meminimalkan cacat ini.

3.3. Ketidakstabilan Deformasi: *Inelastic Buckling*

Selain cacat retak, *cold forging* juga rentan menghasilkan cacat yang berkaitan dengan ketidakstabilan geometri atau *inelastic buckling*. Fenomena ini terjadi ketika komponen tidak mampu mempertahankan bentuk aksialnya selama diberi beban tekan tinggi, menyebabkan deformasi lateral yang tidak diinginkan.

Studi *Predictive Numerical Modeling of Inelastic Buckling for Process Optimization in Cold Forging* menekankan bahwa *inelastic buckling* dipengaruhi oleh rasio dimensi komponen, sifat mekanik material (Aluminium, Stainless Steel, dan Copper), serta kondisi pembebanan selama proses. Tidak seperti retak, *buckling* lebih dipengaruhi oleh geometri dan kondisi batas, namun sifat kekakuan material tetap berperan dalam menentukan ambang stabilitas.

4. MEKANISME KEGAGALAN DAN FAKTOR PENYEBAB

Mekanisme kegagalan pada proses *cold forging* merupakan hasil interaksi kompleks antara sifat material, kondisi proses, geometri cetakan, dan lingkungan tribologis. Setiap jenis cacat yang muncul, baik berupa retak permukaan, retak internal, *chevron cracking*, maupun *inelastic buckling*, memiliki penyebab fundamental yang saling terkait. Berdasarkan sintesis dari kelima jurnal yang direview, mekanisme kegagalan dapat dianalisis melalui tiga faktor utama, yaitu sifat material dan kondisi mikrostruktur, parameter proses dan desain cetakan, serta kondisi tribologi dan kualitas antarmuka material-cetakan.

4.1. Pengaruh Material dan Kondisi Mikrostruktur

Sifat material merupakan faktor paling dominan yang menentukan kecenderungan cacat pada *cold forging*. Material dengan *ductility* rendah atau kekerasan yang terlalu tinggi cenderung tidak mampu menahan regangan tinggi yang terjadi selama pembentukan, sehingga memicu retak. Kasus retak pada mur M14 menunjukkan bahwa distribusi kekerasan awal dan kondisi material berperan penting dalam menentukan respons deformasi (Aji et al., 2019).

Pada material paduan aluminium EN AW 7075, penelitian terkait *chevron cracking* mengonfirmasi bahwa kondisi heat treatment awal sangat menentukan perilaku deformasi internal (Müller et al., 2023). Material yang mengalami *over-aging* atau memiliki mikrostruktur tidak homogen menghasilkan zona tegangan tarik internal yang tinggi, sehingga rentan mengalami retak berbentuk *central bursting*.

Selain itu, pengaruh anisotropi material juga menjadi faktor penyebab *ductile fracture*, sebagaimana dibahas dalam penelitian *An Anisotropic Damage Model for Prediction of Ductile Fracture during Cold-Forging*. Material anisotropik menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap arah tegangan utama, sehingga model kerusakan berbasis anisotropi diperlukan untuk memprediksi lokasi dan inisiasi retak (Watanabe et al., 2022).

4.2. Parameter Proses dan Desain Cetakan

Parameter proses seperti gaya tekan, kecepatan pembebanan, fraksi deformasi, serta distribusi regangan sangat menentukan munculnya cacat. Pada kasus industri mur M14, desain radius cetakan yang tidak memadai dan kondisi pembebanan yang tidak seimbang menghasilkan tegangan tarik lokal yang menjadi titik inisiasi retak (Aji et al., 2019).

Sementara itu, penelitian *Piercing and Surface-Crack Defects in Combination Extrusion of Fasteners* menunjukkan bahwa proses multistage dengan tahapan piercing dapat membentuk ketidaksempurnaan internal sejak tahap awal, yang kemudian berkembang menjadi retak seiring proses deformasi bertahap (Lin et al., 2017). Hal ini menunjukkan pentingnya kontrol aliran material dan desain transisi antar tahap pembentukan.

Pada fenomena *inelastic buckling*, faktor geometri seperti rasio panjang terhadap diameter menjadi sangat krusial. Pemodelan numerik memperlihatkan bahwa komponen dengan geometri panjang dan ramping lebih mudah mengalami instabilitas lateral ketika menerima beban tekan tinggi (Lagat et al., 2025). Desain komponen dan pemilihan parameter proses harus mempertimbangkan batas kestabilan ini.

4.3. Kondisi Tribologi dan Antarmuka Material-Cetakan

Kondisi tribologi, termasuk pelumasan dan kekasaran antarmuka, sangat berpengaruh terhadap tegangan geser dan distribusi aliran material. Ketidakcocokan kondisi tribologi dapat meningkatkan gesekan, memicu konsentrasi tegangan, serta menyebabkan distorsi aliran material yang menjadi penyebab retak. Studi *Chevron cracking during full forward impact extrusion of aluminum alloy EN AW 7075 in dependence of heat treatment condition and tribological system* menunjukkan bahwa sistem tribologi yang kurang optimal memperparah kondisi tegangan internal pada paduan EN AW 7075, sehingga mempercepat inisiasi *chevron cracking* (Müller et al., 2023).

Demikian pula, pada proses *fastener*, kondisi antarmuka yang buruk antara billet dan die menghasilkan aliran material tidak seragam yang berujung pada cacat *surface-crack defects* (Lin et al., 2017).

5. METODOLOGI PREDIKSI DAN OPTIMASI

Metodologi prediksi dalam proses *cold forging* telah berkembang pesat seiring dengan kebutuhan industri untuk mengurangi cacat, menekan biaya *trial-and-error*, dan meningkatkan stabilitas proses. Pendekatan prediktif modern kini memadukan analisis eksperimental, pemodelan numerik, serta model kerusakan material untuk memetakan perilaku deformasi dan meminimalkan risiko cacat sebelum proses produksi dilakukan. Berdasarkan sintesis dari lima jurnal yang direview, metodologi prediksi dan optimasi dalam *cold forging* dapat dikelompokkan menjadi tiga pendekatan diantaranya, analisis akar masalah berbasis pengamatan langsung, pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga (FEM), dan pemodelan kerusakan material tingkat lanjut.

5.1. Analisis Akar Masalah Eksperimental (*Root Cause Analysis*)

Pendekatan eksperimen lapangan dan analisis penyebab langsung merupakan metode tradisional namun tetap relevan, terutama pada kasus cacat yang muncul di industri. Teknik *root cause analysis* (RCA) digunakan untuk mengidentifikasi sumber ketidakteraturan proses, menganalisis geometri cacat, serta mengevaluasi variabel



proses yang menyebabkan kegagalan. Kasus retak pada mur M14 menjadi contoh penerapan RCA yang efektif. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa melalui analisis permukaan retak, pengujian kekerasan, dan evaluasi aliran material, akar penyebab retak dapat ditelusuri pada desain cetakan yang kurang optimal dan distribusi regangan yang tidak seragam (Aji et al., 2019). Metode ini memungkinkan tindakan korektif seperti modifikasi radius *die* atau pengaturan gaya pembebanan untuk mencegah cacat terulang.

5.2. Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM)

Simulasi numerik berbasis FEM telah menjadi alat utama dalam memprediksi perilaku deformasi dan potensi cacat pada *cold forging*. Pendekatan ini memungkinkan visualisasi distribusi tegangan, regangan, aliran material, dan kondisi batas yang sulit diamati secara langsung pada proses nyata.

Penelitian *Predictive Numerical Modeling of Inelastic Buckling for Process Optimization in Cold Forging* menunjukkan bagaimana pemodelan FEM dapat digunakan untuk memprediksi terjadinya *inelastic buckling* pada material seperti aluminium, stainless steel, dan tembaga (Lagat et al., 2025). Melalui simulasi FEM, parameter seperti rasio dimensi kritis, kekakuan material, dan kondisi pembebanan dapat dianalisis untuk menentukan batas stabilitas komponen sebelum produksi dilakukan.

Pada proses *fastener*, simulasi FEM dalam studi *Piercing and Surface-Crack Defects in Combination Extrusion of Fasteners* digunakan untuk menganalisis aliran material dan tegangan lokal selama proses *piercing* dan ekstrusi kombinasi (Lin et al., 2017). Simulasi ini membantu memprediksi terbentuknya cacat internal sejak tahap awal, sehingga desain proses serta urutan pembentukan dapat dioptimalkan.

5.3. Pemodelan Kerusakan Material Lanjut (Advanced Damage Modeling)

Model kerusakan material merupakan pendekatan mutakhir untuk memprediksi retak dan *ductile fracture* berdasarkan kondisi tegangan-regangan lokal. Pendekatan ini tidak hanya mempertimbangkan besarnya tegangan, tetapi juga arah tegangan, efek anisotropi, serta energi kerusakan yang terakumulasi selama deformasi.

Penelitian *An Anisotropic Damage Model for Prediction of Ductile Fracture during Cold-Forging* menunjukkan bahwa material anisotropik memiliki perilaku kerusakan yang berbeda tergantung arah gaya pembebanan (Watanabe et al., 2022). Model kerusakan anisotropik ini mampu memprediksi titik inisiasi retak dengan lebih akurat dibandingkan model isotropik konvensional. Dengan demikian, teknologi ini sangat relevan untuk proses *cold forging* pada komponen yang memiliki bentuk kompleks atau melibatkan tegangan multiaksial.

Model kerusakan juga digunakan dalam studi *Chevron Cracking During Full Forward Impact Extrusion of EN AW 7075*, yang menunjukkan bahwa kondisi mikrostruktur dan *heat treatment* dapat dimasukkan ke dalam parameter kerusakan untuk memprediksi pembentukan *chevron cracking* (Müller et al., 2023). Hal ini memperkuat pentingnya integrasi antara pemodelan numerik dan karakterisasi material dalam upaya mencapai proses tanpa cacat.

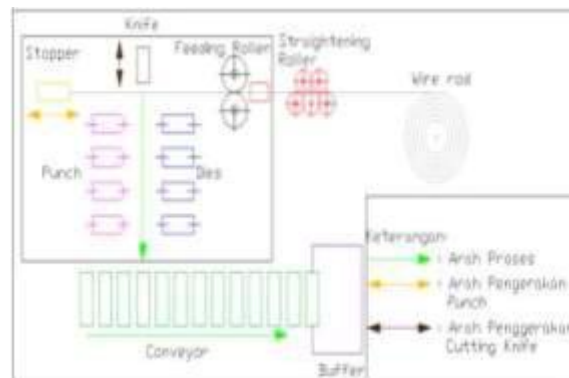
6. STUDI KASUS APLIKASI FASTENER DAN EKSTRUSI

Studi kasus pada komponen *fastener* dan proses ekstrusi memberikan gambaran langsung mengenai bagaimana teori deformasi plastis, pemodelan numerik, serta karakterisasi material diterapkan untuk memahami dan mencegah kegagalan pada proses *cold forging*. Berdasarkan

kelima jurnal yang direview, terdapat dua kelompok aplikasi utama yang relevan, yaitu proses pembentukan *fastener* seperti mur dan baut, serta proses ekstrusi pada paduan aluminium berkekuatan tinggi. Kedua kelompok ini memperlihatkan interaksi kompleks antara geometri, aliran material, kondisi pembebanan, dan mikrostruktur material.

6.1. Aplikasi pada Proses Pembentukan Fastener (Mur dan Baut)

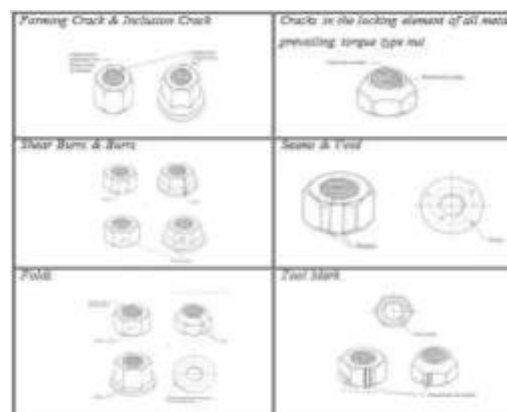
Fastener merupakan komponen yang banyak diproduksi menggunakan teknologi *cold forging* karena membutuhkan kekuatan tinggi, presisi geometri, dan efisiensi produksi. Namun, kompleksitas desain *fastener* dan pembentukan *multistage* menyebabkan komponen ini rentan terhadap cacat, terutama retak permukaan, retak internal, dan cacat akibat *piercing*.



Gambar 1. Skema proses tempa dingin / cold forming mur dan baut

Studi Kasus Mur M14

Pada kasus retak yang terjadi pada mur M14, analisis industri menunjukkan bahwa retak muncul pada tahap awal proses pembentukan akibat tegangan tarik lokal yang berlebihan (Aji et al., 2019). Desain radius cetakan yang kurang optimal menyebabkan konsentrasi tegangan pada area kritis sehingga retak mulai berkembang selama proses ekstrusi lanjutan. Studi tersebut menegaskan bahwa optimasi geometri *die*, pemilihan parameter pembebanan, serta kontrol terhadap strain distribution merupakan faktor penting dalam mencegah kegagalan.



Gambar 3. Jenis-jenis cacat pada mur[5].

Studi Kasus Cacat Piercing dan Surface-Crack pada Fastener

Penelitian *Piercing and Surface-Crack Defects in Combination Extrusion of Fasteners* menunjukkan bahwa cacat internal dapat terbentuk sejak tahap *piercing* pada proses *multistage*. Ketidaktepatan pada permukaan billet, gaya pembebanan yang terlalu tinggi, atau desain *piercing* yang tidak sesuai mengakibatkan terbentuknya rongga atau celah internal. Celah ini kemudian berkembang menjadi retak (*surface-crack defects*) pada tahap deformasi berikutnya. Hasil ini menunjukkan pentingnya pengendalian kualitas *billet* awal, desain *piercing* yang tepat, serta analisis FEM untuk memprediksi jalur aliran material selama proses.

6.2. Aplikasi pada Proses Ekstrusi Material Non-Ferrous (Aluminium 7075)

Paduan aluminium berkekuatan tinggi seperti EN AW 7075 banyak digunakan untuk komponen struktural yang memerlukan rasio kekuatan-berat tinggi. Namun, material ini juga lebih sensitif terhadap kondisi *heat treatment*, sehingga rentan mengalami cacat internal seperti *chevron cracking*.

Studi Kasus Chevron Cracking pada EN AW 7075

Penelitian *Chevron Cracking During Full Forward Impact Extrusion of EN AW 7075* mengidentifikasi bahwa *chevron cracking* dipicu oleh perubahan kondisi tegangan internal akibat ketidakhomogenan mikrostruktur dan kekerasan awal material. Billet yang mengalami perlakuan panas tertentu (misalnya kondisi *over-aged*) menunjukkan kecenderungan lebih tinggi untuk mengalami *central bursting*. Selain itu, kondisi tribologi antara *billet* dan *die* memperburuk konsentrasi tegangan internal sehingga mempercepat inisiasi retak.

Studi ini menegaskan bahwa pemilihan kondisi *heat treatment*, karakterisasi mikrostruktur, dan optimasi pelumasan merupakan strategi penting untuk mencegah kegagalan pada proses ekstrusi intensif.

6.3. Pembelajaran dari Studi Kasus

Dari kedua aplikasi tersebut, terdapat beberapa kesimpulan penting:

1. Desain geometri dan distribusi regangan merupakan faktor kunci pengendalian retak. Studi mur M14 dan *fastener multistage* menunjukkan bahwa radius, *chamfer*, dan transisi geometri menentukan aliran material serta tegangan lokal.
2. Mikrostruktur material dan *heat treatment* berpengaruh besar pada cacat internal. Kasus aluminium 7075 menekankan bahwa material dengan kondisi awal tidak homogen cenderung mengalami *chevron cracking*.
3. Simulasi FEM memberikan kemampuan prediktif yang kuat. Studi *fastener multistage* dan analisis *buckling* menunjukkan bahwa banyak cacat dapat diprediksi sebelum produksi.
4. Tahap awal proses sangat menentukan cacat akhir. Cacat yang terbentuk pada *piercing* atau deformasi awal sering berkembang dan baru terlihat pada tahap akhir pembentukan.

7. DISKUSI DAN ARAH PENGEMBANGAN MASA DEPAN

Hasil sintesis dari kelima jurnal menunjukkan bahwa kualitas proses *cold forging* sangat dipengaruhi oleh interaksi antara faktor material, parameter proses, geometri, dan



kondisi tribologi. Faktor-faktor tersebut tidak bekerja secara terpisah, melainkan membentuk sistem yang saling memengaruhi dan menentukan kecenderungan terjadinya cacat. Oleh karena itu, pemahaman komprehensif terhadap mekanisme kegagalan, seperti retak permukaan, retak internal, *chevron cracking*, dan *inelastic buckling*, merupakan kunci dalam meningkatkan reliabilitas proses pembentukan komponen industri.

Secara umum, hasil kajian menunjukkan bahwa cacat pada *cold forging* tidak dapat dicegah hanya dengan mengandalkan pengamatan visual atau analisis kasus sederhana. Pada kasus industri seperti mur M14, analisis akar masalah memberikan gambaran konkret mengenai penyebab terjadinya retak akibat desain radius dan distribusi tegangan yang tidak seimbang (Aji et al., 2019). Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam menjelaskan fenomena tegangan kompleks yang terjadi selama deformasi plastis.

Sementara itu, perkembangan pemodelan numerik (FEM) dan metode prediktif memberikan kontribusi signifikan dalam memahami fenomena kegagalan yang tidak terlihat secara langsung. Studi *Predictive Numerical Modeling of Inelastic Buckling* menunjukkan bahwa banyak kegagalan dapat diprediksi sejak tahap desain hanya dengan menganalisis batas stabilitas geometri dan tegangan kritis. Temuan ini menunjukkan pergeseran paradigma dari *post-failure analysis* menuju *predictive process design* (Lagat et al., 2025).

Model kerusakan material yang lebih canggih, seperti anisotropic damage model, memberikan peningkatan akurasi prediksi retak terutama untuk material yang menunjukkan perilaku anisotropik atau mengalami tegangan multiaksial (Watanabe et al., 2022). Pendekatan ini sangat penting mengingat banyak proses tempa dingin menghasilkan distribusi tegangan kompleks yang tidak dapat direpresentasikan oleh model isotropik klasik.

Selain itu, penelitian pada paduan aluminium EN AW 7075 memberikan wawasan tentang pentingnya kontrol mikrostruktur dan heat treatment dalam mencegah *chevron cracking* (Müller et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa optimasi tidak hanya dilakukan pada desain proses dan cetakan, tetapi juga pada tahap persiapan material. Pada proses fastener multistage, studi *Predictive Numerical Modeling of Inelastic Buckling for Process Optimization in Cold Forging of Aluminum, Stainless Steel, and Copper* menegaskan bahwa cacat internal sering terbentuk pada tahap awal proses sehingga diperlukan kontrol kualitas billet yang lebih ketat serta desain piercing yang lebih efektif (Lagat et al., 2025).

Jika dikaitkan secara luas, keseluruhan temuan ini menunjukkan adanya kebutuhan menuju integrasi penuh antara:

1. Karakterisasi material berbasis mikrostruktur.
2. Pemodelan numerik dan simulasi proses.
3. Metode prediksi kerusakan tingkat lanjut.
4. Optimasi desain cetakan dan parameter proses.
5. Pengendalian kualitas material awal dan kondisi tribologi.

Arah pengembangan masa depan menekankan penggunaan sistem prediktif berbasis *digital forming* atau *virtual forging*, di mana seluruh variabel proses dan perilaku



material dimodelkan secara menyeluruh sebelum produksi aktual dilakukan. Integrasi kecerdasan buatan (AI) dan *machine learning* juga berpotensi digunakan untuk mempercepat identifikasi pola cacat dan rekomendasi parameter proses optimal berdasarkan data historis.

Dengan demikian, pengendalian cacat dalam *cold forging* ke depan bukan hanya berfokus pada perbaikan setelah cacat terjadi, tetapi lebih kepada pencegahan berbasis prediksi yang akurat, pemahaman material yang mendalam, serta optimasi proses secara menyeluruh. Pendekatan ini menjadi fondasi penting dalam upaya mencapai sistem produksi *zero-defect* yang sangat dibutuhkan oleh industri manufaktur modern.

8. KESIMPULAN

Proses *cold forging* merupakan teknologi pembentukan logam yang sangat penting dalam industri manufaktur modern karena mampu menghasilkan komponen dengan presisi tinggi, penggunaan material yang efisien, dan kekuatan mekanik yang meningkat akibat terjadinya *strain hardening*. Meskipun memiliki banyak keunggulan, proses ini masih menghadapi tantangan berupa munculnya berbagai jenis cacat. Cacat tersebut mencakup retak permukaan, retak internal, *chevron cracking*, cacat akibat *piercing*, serta ketidakstabilan deformasi yang dikenal sebagai *inelastic buckling*. Melalui sintesis dari lima jurnal yang dikaji, diperoleh pemahaman yang lebih utuh mengenai penyebab dan mekanisme terjadinya berbagai cacat tersebut.

Cacat pada proses *cold forging* umumnya muncul akibat keterkaitan antara tiga faktor utama, yaitu sifat material dan kondisi mikrostruktur, parameter proses serta desain cetakan, dan kondisi tribologi pada antarmuka material dengan cetakan. Studi kasus seperti retak pada mur M14 dan cacat *piercing* pada pembentukan *fastener* menunjukkan bahwa distribusi regangan dan desain geometri memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan kualitas akhir produk. Sementara itu, kasus *chevron cracking* pada paduan aluminium 7075 menegaskan bahwa kondisi mikrostruktur, terutama hasil perlakuan panas, sangat memengaruhi respons material terhadap deformasi intensif.

Ketersediaan metode prediktif modern memberikan peningkatan signifikan dalam upaya memahami dan mengendalikan fenomena kegagalan. Pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga mampu memetakan distribusi tegangan dan regangan secara detail, sehingga memungkinkan identifikasi titik kritis sebelum produksi aktual dilakukan. Model kerusakan berbasis anisotropi juga memberi kemampuan prediktif yang lebih akurat untuk memperkirakan inisiasi retak terutama pada kondisi pembebanan kompleks. Pendekatan prediksi tersebut membawa perubahan dari analisis setelah kerusakan terjadi menuju strategi pencegahan sejak tahap perencanaan proses.

Secara keseluruhan, upaya mencapai proses *cold forging* yang bebas cacat memerlukan kolaborasi berbagai aspek yang meliputi pemahaman mendalam mengenai sifat material, optimasi geometri dan parameter proses, pengendalian kondisi tribologi, serta pemanfaatan teknologi pemodelan yang semakin maju. Dengan pendekatan yang lebih terintegrasi, industri dapat bergerak menuju pencapaian proses produksi yang lebih stabil, efisien, dan mendukung tercapainya kualitas produk tanpa cacat. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan strategi peningkatan kualitas *cold forging* serta mendorong penelitian lanjutan yang lebih mendalam.



DAFTAR PUSTAKA

- Aji, D. P., Iwan Sumarno, D., Studi Teknik Sipil, P., Trisakti, U., Nusa Putra, U., Kyai Tapa No, J., Grogol petamburan, K., Jakarta Barat, K., Raya Cibolang Kaler No, J., & Sukabumi, K. (2019a). ANALISIS AKAR MASALAH KEGAGALAN CACAT RETAK (CRACK) PADA PROSES PEMBENTUKAN TEMPRA DINGIN (COLD FORMING) MUR M14. In *Jurnal RekayasaTeknologi Nusa Putra* (Vol. 6, Issue 1).
- Gronostajski, Z., Pater, Z., Madej, L., Gontarz, A., Lisiecki, L., Łukaszek-Sołek, A., Łuksza, J., Mróz, S., Muskalski, Z., Muzykiewicz, W., Pietrzyk, M., Śliwa, R. E., Tomczak, J., Wiewiórowska, S., Winiarski, G., Zasadziński, J., & Ziółkiewicz, S. (2019). Recent development trends in metal forming. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(3), 898-941. <https://doi.org/10.1016/J.ACME.2019.04.005>
- Lagat, D., Munawar, H., Akhusama, E., Alugongo, A., & Rutto, H. (2025b). Predictive Numerical Modeling of Inelastic Buckling for Process Optimization in Cold Forging of Aluminum, Stainless Steel, and Copper. *Processes*, 13(10), 3177. <https://doi.org/10.3390/pr13103177>
- Lin, H. S., Lee, C. Y., Li, W. S., & Wu, C. T. (2017b). PIERCING AND SURFACE-CRACK DEFECTS IN COMBINATION EXTRUSION OF FASTENERS. *MATEC Web of Conferences*, 123. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712300018>
- Müller, M., Schwark, N., Weiser, I. F., Herrig, T., & Bergs, T. (2023b). CHEVRON CRACKING DURING FULL FORWARD IMPACT EXTRUSION OF ALUMINUM ALLOY EN AW 7075 IN DEPENDENCE OF HEAT TREATMENT CONDITION AND TRIBOLOGICAL SYSTEM. *Materials Research Proceedings*, 28, 445-454. <https://doi.org/10.21741/9781644902479-49>
- Watanabe, A., Hayakawa, K., & Fujikawa, S. (2022a). An Anisotropic Damage Model for Prediction of Ductile Fracture during Cold-Forging. *Metals*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/met12111823>
- Mermer, M., & Ovali, I. (2023). INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRE-DEFORMATION SHAPE ON COLD FORMING PROPERTIES IN THE PRODUCT MATERIAL IN FASTENER PRODUCTION. *Thermal Science*, 27(4), 3261-3268. <https://doi.org/10.2298/TSCI2304261M>