



## **LITERATURE REVIEW: PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN METODOLOGI PEMBENTUKAN LOGAM DALAM MANUFAKTUR MODERN**

Tiko Es Saputra Ceren<sup>1,a\*</sup>, Sri Hastuti<sup>2,b\*</sup>, Dodi Saputro<sup>3</sup>, Andriyani Bagas Saputra<sup>4</sup>,  
Putra Dwi Setiawan<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Program Studi SI Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Tidar

E-mail : <sup>a</sup>tiko.es.saputra.ceren@students.untidar.ac.id, <sup>b</sup>hastutisrimesin@untidar.ac.id

Masuk : 2 Februari 2026

Direvisi : 14 Maret 2026

Disetujui : 16 April 2026

**Abstrak:** Industri otomotif global saat ini memprioritaskan pengurangan berat kendaraan dan peningkatan keselamatan melalui penggunaan *Advanced High-Strength Steel* (AHSS). Namun, proses pembentukan AHSS menghadapi tantangan teknis yang kompleks seperti fenomena *springback* yang tinggi akibat tegangan sisa serta keterbatasan kriteria kegagalan tradisional *Forming Limit Diagram* (FLD) dalam memprediksi retak tanpa pelokalan regangan (*necking*). Tinjauan literatur ini bertujuan untuk merangkum dan mengevaluasi perkembangan terkini dalam pemodelan konstitutif serta teknik simulasi numerik guna meningkatkan akurasi prediksi deformasi, kegagalan, dan optimasi proses manufaktur pada baja kekuatan tinggi. Metodologi yang digunakan adalah studi literatur sistematis terhadap perkembangan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*/FEM), model pengerasan material, serta kriteria kerusakan ulet pada rentang keadaan tegangan yang luas. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa penggunaan model pengerasan kinematik yang mempertimbangkan efek Bauschinger, seperti model Yoshida-Uemori, sangat krusial dalam memprediksi *springback* secara akurat dibandingkan model isotropik konvensional. Selain itu, adopsi model kerusakan fenomenologis terbaru seperti *Modified Mohr-Coulomb* (MMC) terbukti mampu mengatasi keterbatasan FLD dalam memprediksi retak geser dan tepi pada AHSS generasi ketiga. Integrasi parameter dinamis seperti laju regangan dan model gesekan (*friction*) variabel dalam simulasi numerik secara signifikan meningkatkan validitas hasil terhadap data eksperimental. Penerapan teknologi cerdas berbasis Industri 4.0 juga menawarkan prospek baru dalam pengendalian kualitas proses pembentukan logam secara *real-time*.

Kata kunci: *Advanced High-Strength Steel* (AHSS), Simulasi Numerik, *Springback*, Pemodelan Konstitutif, Kriteria Kegagalan.

**Abstract:** The global automotive industry currently prioritizes vehicle weight reduction and safety enhancement through the use of *Advanced High-Strength Steel* (AHSS). However, the forming process of AHSS faces complex technical challenges such as high *springback* due to residual stress and the limitations of the traditional *Forming Limit Diagram* (FLD) failure criterion in predicting cracks without strain localization (*necking*). This literature review aims to summarize and evaluate recent developments in constitutive modeling and numerical simulation techniques to improve the accuracy of deformation prediction, failure, and manufacturing process optimization in high-strength steel. The methodology used is a systematic literature review of the development of the *Finite Element Method* (FEM), material hardening models, and ductile damage criteria over a wide range of stress states. The results of the review indicate that the use of kinematic hardening models that consider the Bauschinger effect, such as the

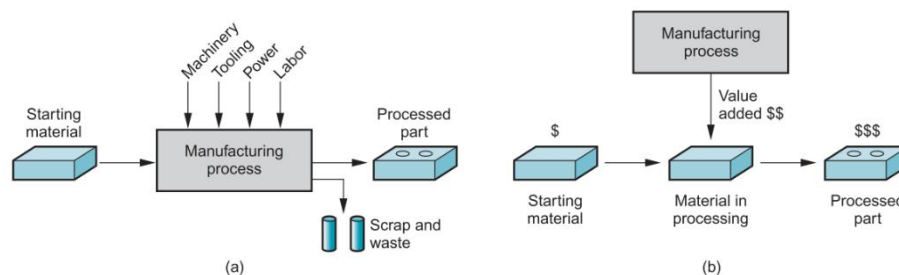
*Yoshida-Uemori model, is crucial in predicting springback accurately compared to conventional isotropic models. In addition, the adoption of the latest phenomenological damage models such as the Modified Mohr-Coulomb (MMC) has been proven to overcome the limitations of FLD in predicting shear and edge cracks in third-generation AHSS. The integration of dynamic parameters such as strain rate and variable friction models into numerical simulations significantly improves the validity of the results against experimental data. The application of Industry 4.0-based intelligent technologies also offers new prospects in real-time quality control of metal forming processes.*

**Keywords:** Advanced High-Strength Steel (AHSS), Numerical Simulation, Springback, Constitutive Modeling, Failure Criteria.

## PENDAHULUAN

Industri otomotif global saat ini berfokus pada strategi pengurangan berat kendaraan untuk meningkatkan efisiensi energi dan standar keselamatan penumpang. Perkembangan ini menyebabkan pergeseran penggunaan material dari baja lunak konvensional ke arah *Advanced High-Strength Steel* (AHSS) yang menawarkan rasio kekuatan terhadap berat jauh lebih unggul [1]–[3]. Meskipun demikian, proses pembentukan AHSS menghadapi kompleksitas teknis yang tinggi karena kekuatan luluh yang besar menyebabkan fenomena *springback* signifikan serta kendala dalam kontrol dimensi [4], [5]. Penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa kriteria kegagalan tradisional seperti *Forming Limit Diagram* (FLD) memiliki keterbatasan dalam memprediksi berbagai jenis retak, seperti retak geser dan tepi, yang sering terjadi pada material AHSS tanpa didahului oleh pelokalan regangan (*necking*). Sebagai solusinya, para peneliti telah mengembangkan berbagai pendekatan baru, mulai dari pemodelan konstitutif tingkat lanjut seperti model pengerasan kinematik Yoshida-Uemori untuk menangkap efek Bauschinger, hingga pemanfaatan simulasi numerik berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk mengoptimalkan parameter proses secara virtual [6]. Tren riset terkini juga mulai mengintegrasikan konsep Industri 4.0 dan penggunaan jaringan saraf tiruan (*Artificial Neural Network*) untuk meningkatkan presisi hasil simulasi di tengah lingkungan manufaktur yang semakin kompleks.

Manufaktur dalam pembentukan logam didefinisikan sebagai aplikasi proses fisik untuk mengubah geometri, sifat, atau penampilan material awal guna menghasilkan komponen yang bernilai tambah [7]. Proses ini beroperasi pada prinsip deformasi plastis, di mana gaya mekanis dari perkakas atau cetakan (*die*) digunakan untuk melampaui kekuatan luluh material sehingga terjadi perubahan bentuk permanen sesuai geometri yang diinginkan [8], [9]. Secara sistematis, produksi mencakup rangkaian operasi yang dimulai dari proses dasar seperti pengerolan atau penempaan untuk membentuk geometri awal, diikuti oleh proses sekunder seperti penekukan, pemotongan, atau penarikan dalam (*deep drawing*), hingga operasi penyelesaian untuk mencapai spesifikasi desain akhir. Sistem produksi ini umumnya diklasifikasikan ke dalam deformasi curah (*bulk deformation*) untuk perubahan bentuk masif dan pengerjaan lembaran logam (*sheet metalworking*) yang melibatkan rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi [10]. Di era modern, integrasi konsep Industri 4.0 dan manufaktur cerdas melalui penggunaan sensor serta pertukaran data secara *real-time* menjadi sangat penting untuk meningkatkan presisi, kualitas produk, dan efisiensi energi dalam seluruh rantai nilai produksi.



Gambar 1. Proses Manufaktur [7]

Sementara itu, secara ekonomis, manufaktur merupakan aktivitas transformasi material menjadi barang dengan nilai tambah yang lebih tinggi melalui satu atau lebih operasi pemrosesan dan/atau perakitan. Nilai tambah muncul karena perubahan bentuk, sifat, ataupun penggabungan material yang telah diproses, sehingga produk yang dihasilkan menjadi lebih bermanfaat dan memiliki nilai jual yang lebih besar; contohnya, proses perubahan bijih besi menjadi baja, pasir menjadi kaca, maupun minyak bumi menjadi plastik [7]. Dalam kerangka ini, manufaktur dapat pula dipahami sebagai produksi produk untuk digunakan atau dijual dengan menggunakan tenaga kerja, mesin, peralatan, pemrosesan, atau formulasi, serta menjadi inti dari industri sekunder karena menghubungkan bahan baku yang berasal dari sektor primer dengan produk jadi berskala besar yang siap dipasarkan. Istilah manufaktur dapat merujuk pada beragam aktivitas manusia, namun paling umum digunakan dalam konteks desain dan rekayasa, di mana bahan mentah diolah secara sistematis menjadi barang jadi dalam skala industri, yang mencakup tahap perancangan, pemilihan material, hingga pengendalian mutu dalam rangka menjamin kualitas, efisiensi, dan keandalan produk [9].

Teknologi pembentukan logam telah bergeser secara signifikan dari metode konvensional menuju integrasi sistem cerdas guna memenuhi tuntutan manufaktur modern yang semakin kompleks dan mengutamakan keberlanjutan [11]. Ali dan Qattawi menguraikan kemajuan pesat dalam penggunaan simulasi numerik berbasis Metode Elemen Hingga (FEM) yang saat ini menjadi standar industri dalam memprediksi fenomena kritis seperti *springback* serta mengoptimalkan parameter presisi pada proses pembentukan lembaran logam secara virtual [12]. Di sisi lain, Dixit meninjau evolusi metodologi pemodelan yang beralih dari metode analitis klasik menuju pendekatan pemodelan mikrostruktur yang lebih maju, seperti *crystal plasticity* dan simulasi dinamika molekul, untuk menangkap perilaku deformasi material pada skala mikro secara lebih akurat [13]. Sementara itu, Trzepieciński menyoroti tren global dalam adopsi teknik pembentukan nonkonvensional, termasuk *incremental sheet forming* (ISF) dan *electromagnetic forming* (EMF), yang menawarkan fleksibilitas operasional tinggi dan efisiensi biaya dalam memproses material ringan yang sulit dibentuk [14]. Awasthi dkk. lebih lanjut menekankan peran krusial dari implementasi teknologi *servo press* yang terintegrasi dengan *Industrial Internet of Things* (IIoT) dalam ekosistem Industri 4.0 guna meningkatkan produktivitas serta efisiensi energi dalam seluruh rantai nilai produksi [11]. Sebagai pelengkap, penelitian terbaru mengenai baja kekuatan tinggi (AHSS) menunjukkan bahwa tantangan teknis pada material modern kini menuntut pengembangan kriteria kegagalan tingkat lanjut yang mampu melampaui batasan tradisional *Forming Limit Diagram* (FLD) konvensional [1], [5].

Tujuan penyusunan artikel *review* ini adalah untuk merangkum dan mengevaluasi perkembangan terkini dalam pemodelan konstitutif serta teknik simulasi numerik guna meningkatkan akurasi prediksi deformasi, kegagalan, dan optimasi proses manufaktur pada baja kekuatan tinggi. Selain itu, artikel ini bertujuan untuk mengidentifikasi kelebihan dan keterbatasan dari masing-masing metode pembentukan logam, sehingga dapat memberikan landasan ilmiah bagi pemilihan proses yang tepat pada aplikasi manufaktur modern serta membuka peluang pengembangan riset lanjutan di bidang teknologi pembentukan logam.

## METODOLOGI

Artikel *review* ini disusun berdasarkan analisis literatur dari basis data ilmiah seperti ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, Taylor & Francis, dan Google Scholar. Pencarian dilakukan menggunakan kata kunci: *metal forming*, *plastic deformation*, *sheet metal forming*, *bulk forming*, *forging defects*, *forming simulation*, dan *advanced high-strength steel*. Literatur yang digunakan mencakup artikel jurnal terbitan tahun 2010–2024 dengan fokus pada proses, aplikasi, dan perkembangan teknologi.

Kriteria inklusi dalam penelitian ini mencakup: (1) studi dengan kontribusi empiris atau numerik terkait proses pembentukan logam, (2) artikel *review* serta penelitian eksperimental di bidang *metal forming*, dan (3) studi yang membahas pengembangan material baru dan teknologi simulasi. Sebaliknya, kriteria eksklusi mencakup: (1) publikasi

yang tidak memiliki relevansi langsung dengan proses pembentukan logam, serta (2) artikel tanpa data teknis atau diskusi ilmiah yang memadai.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Prinsip Dasar Pembentukan Logam

*Metal forming* bukan sekadar metode manufaktur tradisional, melainkan sebuah aplikasi kompleks dari prinsip deformasi plastis untuk menghasilkan komponen bernilai tambah tinggi bagi sektor strategis seperti otomotif dan dirgantara [10]. Analisis kritis terhadap proses ini menunjukkan bahwa kontrol terhadap parameter suhu (*hot, warm, cold working*) merupakan kompromi antara efisiensi energi dan presisi dimensi; di mana panas berfungsi menurunkan *flow stress* namun berisiko pada integritas permukaan [13]. Secara mikroskopis, efektivitas pembentukan sangat bergantung pada manajemen densitas dislokasi yang memicu *work hardening* dan evolusi mikrostruktur [15]. Penting untuk dicatat bahwa hubungan tegangan-regangan tidak lagi cukup dipahami secara linear. Penggunaan model konstitutif seperti Johnson-Cook atau Zerilli-Armstrong dalam simulasi modern sangat krusial untuk menjembatani kesenjangan antara perilaku material skala mikro dengan respons makroskopis selama proses pembentukan. Lebih lanjut, analisis terhadap *strain rate* mengungkapkan bahwa pada proses berkecepatan tinggi, formabilitas material berubah secara nonlinear karena adanya perubahan drastis pada koefisien gesekan (*friction*) dan suhu lokal [16]. Oleh karena itu, optimasi proses modern kini mulai bergeser pada penggunaan model berbasis kecerdasan buatan untuk memprediksi perilaku deformasi dengan akurasi yang melampaui model analitis klasik [17].

### 3.2 Klasifikasi Pembentukan Logam

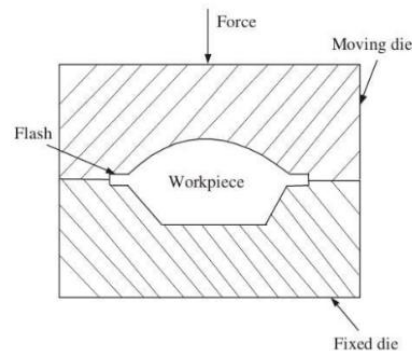
Secara tradisional, klasifikasi pembentukan logam dipisahkan secara kaku menjadi *Sheet Metal Forming* (SMF) dan *Bulk Forming* berdasarkan rasio luas permukaan terhadap volume. SMF didominasi oleh fenomena permukaan seperti *necking* dan *springback* yang membutuhkan pemodelan anisotropi lembaran yang sangat presisi, sementara *bulk forming* berfokus pada aliran material 3D dengan kebutuhan gaya yang masif. Namun, analisis terhadap tren industri terkini menunjukkan adanya konvergensi metodologi melalui munculnya *Sheet-Bulk Metal Forming* (SBMF).

SBMF merepresentasikan sintesis ilmiah yang signifikan, di mana operasi *bulk* diterapkan pada lembaran logam untuk menghasilkan fitur fungsional yang kompleks dalam satu rantai produksi. Munculnya kategori ini mengaburkan batas tradisional dan menghadirkan tantangan baru dalam kontrol aliran material serta tribologi lokal. Kesenjangan riset saat ini terletak pada kebutuhan akan model kerusakan yang mampu menangani transisi kondisi tegangan dari *plane strain* (khas lembaran) ke kondisi tegangan triaksialitas tinggi (khas *bulk*) dalam satu simulasi numerik yang terintegrasi.

### 3.3 Berbagai Proses Pembentukan Logam

#### 3.3.1 Forging

*Forging* (penempaan) telah berevolusi dari sekadar pengubahan bentuk menjadi metode peningkatan sifat mekanis melalui redistribusi karbida. Namun, analisis kritis menunjukkan bahwa interaksi gesekan yang tidak seragam sering kali menciptakan gradien suhu yang memicu cacat internal [18]. Tantangan utama dalam *forging* modern adalah minimisasi variabilitas distribusi tegangan-regangan melalui sistem diagnostik cerdas berbasis *machine learning* untuk mengoptimalkan kualitas produk secara *real-time* [19]. Variabilitas kondisi ini membuat proses analisis cacat menjadi lebih kompleks, sehingga diperlukan pendekatan diagnostik yang mampu membantu operator dan *engineer* dalam mengidentifikasi penyebab cacat serta mengoptimalkan kualitas produk *forging* [18], [19].

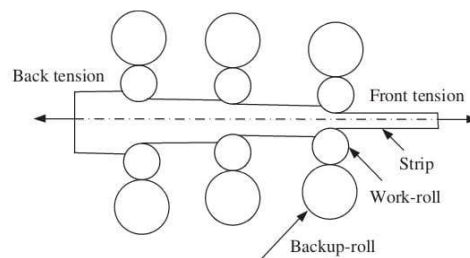


Gambar 2. Proses Penempaan [13]

Proses ini disebut penempaan cetakan tertutup (*impression-die forging*). Pada gambar tersebut, benda kerja ditempatkan di dalam rongga cetakan di antara dua cetakan, yaitu cetakan bergerak (*moving die*) dan cetakan tetap (*fixed die*). Saat benda kerja mendapatkan tekanan dari atas, material terdeformasi mengikuti bentuk rongga cetakan. Tekanan tinggi yang diberikan menyebabkan kelebihan material mengalir keluar melalui celah kecil di bagian tepi cetakan dan membentuk kilatan (*flash*), yang nantinya akan dipotong pada proses *finishing*. Cetakan ini berfungsi untuk memberi bentuk akhir pada produk. Gambaran ini menjelaskan bagaimana gaya kompresi dan cetakan (*die*) membentuk komponen logam *forging*.

### 3.3.2 Rolling

*Rolling* (pengerolan) tetap menjadi metode paling strategis untuk produksi massal, namun terdapat dilema teknis antara *hot rolling* dan *cold rolling*. Meskipun *hot rolling* mampu menghasilkan struktur butir *equiaxed* tanpa *work hardening*, pengerjaan ini berisiko memunculkan tegangan sisa akibat pendinginan yang tidak seragam. Proses ini menjadi metode pembentukan logam yang strategis untuk menghasilkan komponen berpenampang panjang serta bagian-bagian dengan geometri yang lebih detail. Di sisi lain, *cold rolling* menawarkan kualitas permukaan superior namun menuntut gaya pembentukan yang jauh lebih besar, sehingga memerlukan sistem kontrol otomatis yang sangat presisi untuk menjaga toleransi ketebalan (*draft*). Melalui tahapan seperti *annealing* pada proses *Cold Rolled and Closed Annealed*, *cold rolling* dapat meningkatkan keuletan serta menghasilkan permukaan yang halus melalui teknik *skin-rolling* yang mampu menekan fenomena *Lüders bands* dengan mengunci dislokasi di permukaan. Meskipun memiliki kekurangan berupa resistansi yang lebih rendah terhadap *buckling* dan torsi, produk hasil *cold rolling* banyak diaplikasikan pada pembuatan batang, *strip*, *rod*, dan lembaran logam yang membutuhkan toleransi presisi serta kualitas permukaan tinggi [20].



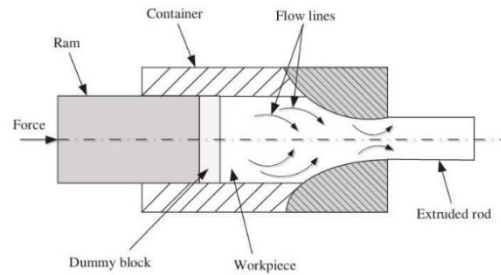
Gambar 3. Proses Pengerolan [13]

Gambar 3 menunjukkan proses pengerolan (*rolling*) dengan sistem yang menggunakan banyak rol (*multi-roll system*), di mana sepotong logam ditarik di antara dua rol kerja (*work rolls*) yang mengurangi ketebalannya. Setiap rol kerja dilengkapi dengan rol penopang (*backup rolls*) yang bertugas menahan pembungkukan (*bending*), sehingga tekanan pembentukan tetap terjaga konstan. Selama proses ini, *strip* logam ditarik dari dua sisi: terdapat tegangan

belakang (*back tension*) di sisi awal yang menjaga stabilitas pergerakan material dan tegangan depan (*front tension*) di sisi akhir untuk mengatur kualitas serta kerataan *strip*. Ilustrasi ini menunjukkan penggunaan kombinasi tekanan dan gaya tarik secara bersamaan untuk mencapai deformasi yang merata dalam proses pengerolan.

### 3.3.3 Extrusion

*Extrusion* (ekstrusi) menunjukkan keunggulan signifikan pada metode *indirect extrusion* dalam hal efisiensi energi karena pengurangan gesekan antara *billet* dan wadah (*container*). Inovasi terkini dalam ekstrusi logam ringan (aluminium/magnesium) kini lebih berfokus pada optimasi sudut cetakan (*die*) untuk meminimalkan beban puncak dan mencegah cacat seperti *central burst*, yang sering kali tidak terdeteksi pada pemeriksaan visual awal [8], [21].



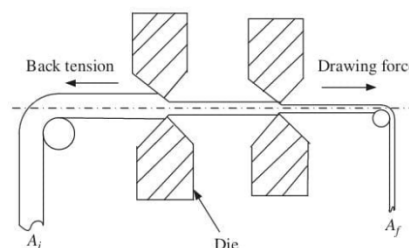
Gambar 4. Proses Ekstrusi [13]

Gambar 4 menunjukkan proses ekstrusi langsung (*direct extrusion*), di mana *ram* mendorong *dummy block* untuk memaksa benda kerja di dalam wadah (*container*) menuju cetakan (*die*). Dengan tekanan tinggi dari *ram*, material mengalir mengikuti jalur yang telah ditentukan dan keluar melalui *die*, sehingga menghasilkan produk panjang yang disebut batang ekstrusi. Wadah berfungsi untuk menjaga material agar tetap berada pada jalur yang benar, sementara *dummy block* melindungi *ram* dari kontak langsung dengan material panas. Ilustrasi ini menunjukkan bagaimana tekanan mengubah material padat menjadi bentuk yang diinginkan melalui deformasi plastis.

### 3.3.4 Drawing

*Drawing* (penarikan) merupakan proses pembentukan logam di mana parameter sudut cetakan (*die*) dan pelumasan menjadi faktor penentu yang saling memengaruhi. Sudut cetakan yang kecil menghasilkan deformasi yang lebih halus, tetapi meningkatkan gaya gesek akibat luas area kontak yang lebih besar [22]. Sintesis dari berbagai studi menunjukkan bahwa keberhasilan penarikan dalam (*deep drawing*) sangat bergantung pada kemampuan material menahan penipisan berlebih (*excessive thinning*), yang secara kritis dipengaruhi oleh kecepatan penarikan dan karakteristik termal perkakas.

Parameter utama *drawing* meliputi gaya tarik, sudut *die*, pelumasan, dan kecepatan *drawing*. Sudut *die* memengaruhi distribusi tegangan dan gesekan; sudut yang kecil menghasilkan deformasi lebih halus namun meningkatkan panjang kontak sehingga menaikkan gaya gesek. Pelumasan yang tepat diperlukan untuk menurunkan gaya tarik serta mencegah cacat seperti *scratching*, *galling*, dan permukaan kasar. Adapun cacat umum yang sering terjadi pada proses *drawing* antara lain *central burst*, *diameter variation*, *die marks*, dan *surface cracking* [23].



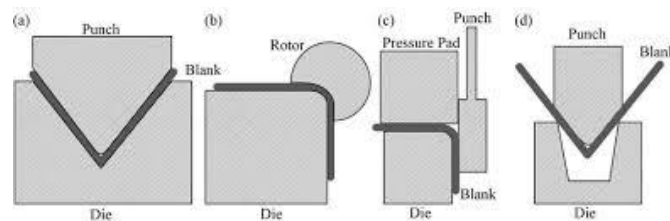
Gambar 5. Proses *Drawing* [13]

Gambar 5 menunjukkan proses *wire drawing*, yaitu proses penarikan material logam melalui sebuah *die* untuk mengurangi diameter dari ukuran awal menjadi ukuran akhir yang diinginkan. Selama proses berlangsung, gaya tarik (*drawing force*) diberikan pada sisi keluaran untuk menarik kawat melalui *die*, sementara tegangan balik (*back tension*) diberikan pada sisi masukan untuk menjaga kestabilan aliran material. *Die* berfungsi membatasi dan membentuk penampang kawat sehingga terjadi deformasi plastis yang membuat kawat menjadi lebih panjang dengan diameter yang lebih kecil. Ilustrasi ini menggambarkan hubungan antara gaya tarik, tegangan balik, dan deformasi yang terjadi selama proses *drawing* berlangsung.

### 3.3.5 Bending

*Bending* (penekukan) merupakan proses yang paling rentan terhadap fenomena *springback*, terutama pada material berkekuatan tinggi seperti AHSS [24]. Sumbu netral (*neutral axis*) bergeser ke arah sisi dalam karena perbedaan respons material terhadap beban tarik dan tekan. Parameter penting dalam *bending* meliputi radius *bending* minimum, *springback*, serta ketebalan material.

Analisis kritis terhadap sumbu netral (*neutral axis*) menunjukkan bahwa pergeserannya ke sisi dalam selama deformasi menciptakan distribusi tegangan sisa yang kompleks. Solusi riset saat ini berpindah dari sekadar teknik penekukan berlebih (*overbending*) manual menuju penggunaan model kompensasi numerik yang mempertimbangkan degradasi modulus elastisitas selama proses pelepasan beban (*unloading*) [4].



Gambar 6. Proses *Bending* [25]

Gambar 6 menunjukkan proses penekukan pada pelat logam. Pada ilustrasi (a), pelat ditekan di dalam cetakan (*die*), kemudian penekan bergerak kembali ke atas sehingga logam terbentuk sesuai dengan rongga cetakannya. Gambar (b) juga menampilkan proses *bending*, tetapi menggunakan komponen *rotator* untuk membuat profil tertentu. Demikian pula untuk variasi pada gambar (c) dan (d), yang menunjukkan proses *bending* menggunakan jenis penekan atau tipe *die* yang berbeda. Pemberian beban ini memicu deformasi plastis sehingga pelat logam dapat terbentuk secara presisi sesuai dengan kontur cetakannya.

## 3.4 Tantangan dan Perkembangan Teknologi dalam Proses Pembentukan Logam Modern

Perkembangan terkini dalam proses pembentukan logam dan industri baja bergerak menuju manufaktur cerdas, terintegrasi secara digital, serta berorientasi pada keberlanjutan untuk menjawab tuntutan produk yang makin kompleks, ringan, dan hemat energi [26], [27]. Perkembangan ini menyoroti transformasi proses pembentukan pelat, khususnya di industri otomotif dan kedirgantaraan, melalui penerapan *servo press* elektromekanis, pemodelan numerik (seperti FEM dan pendekatan lainnya), serta integrasi IIoT dan konsep manufaktur cerdas (*smart manufacturing*/Industri 4.0) guna meningkatkan akurasi, produktivitas, dan keberlanjutan pada seluruh rantai produksi berbasis *sheet metal forming*.

Dalam dimensi digital, fokus utama bergeser pada formulasi peran *Cyber-Physical Production Systems* (CPPS), analitik data, dan *digital twin* di sepanjang siklus hidup produk pembentukan pelat logam, sekaligus mengidentifikasi tantangan utama seperti akuisisi data *in-line*, penelusuran *blank* secara individual (*individual blank tracking*), integrasi sensor, serta optimasi proses secara *real-time* pada rantai proses pemotongan, pembentukan, hingga penyambungan [13]. Trzepieciński menyajikan tinjauan luas mengenai tren eksperimental dan numerik dalam *sheet metal forming* selama satu dekade terakhir, termasuk pengembangan metode nonkonvensional (seperti

*incremental sheet forming*, *electromagnetic forming*, *flexible-die and solid granular medium forming*, serta *microforming* dan *warm/hot forming*) beserta kemajuan model numerik multiskala dan multifisika untuk memprediksi aliran material, gesekan atau pelumasan, *springback*, kerusakan, serta batasan formabilitas (*limit formability*) pada material ringan berkekuatan tinggi [1].

Dari sisi industri baja dan teknologi pengerolan (*rolling*), inovasi proses berkembang pesat di tengah kondisi kelebihan pasokan (*oversupply*) global dan meningkatnya kebutuhan baja berkinerja tinggi. Inovasi ini menekankan pentingnya *thermo-mechanically controlled processing* (TMCP), produksi *strip* tipis (*compact strip production/CSP* dan *endless strip production/ESP*), strategi pendinginan fleksibel, serta model numerik hubungan antara mikrostruktur dan sifat mekanis yang dikaitkan dengan sistem kontrol canggih berbasis Industri 4.0. Pendekatan tersebut diterapkan untuk menghasilkan pelat dan *strip* dari baja jenis HSLA, DP, TRIP, dan TWIP yang kuat namun tetap memiliki sifat mudah dibentuk (*formable*) dan mudah dilas (*weldable*) [26]. Selain itu, perkembangan teknologi juga menggarisbawahi potensi metode kombinasi seperti *rolling-pressing* dan *casting-rolling-pressing* menggunakan unit *cast-and-roll*. Analisis teoretis menunjukkan bahwa pemilihan tata letak peralatan (seperti posisi matriks relatif terhadap rol dan kondisi gesekan) sangat menentukan domain keberlakuan proses, koefisien penarikan maksimum, dan konsumsi energi minimum pada pembentukan profil-profil kompleks. Secara keseluruhan, studi-studi ini mengindikasikan bahwa arah riset dan implementasi industri ke depan berfokus pada penggabungan inovasi material (baja AHSS, paduan ringan) dan skema pembentukan tingkat lanjut (*servo-based sheet forming*, *incremental and high-speed forming*, TMCP, serta jalur *casting, rolling, and pressing*) dengan infrastruktur digital kaya sensor, simulasi multiskala, dan kerangka CPPS/IIoT guna mewujudkan produksi komponen kendaraan, pesawat, serta struktur rekayasa lainnya yang fleksibel, hemat sumber daya, dan memiliki kualitas geometris maupun fungsional yang tinggi [11], [14], [28].

#### 3.4.1 Aplikasi Simulasi Numerik dalam Konteks Pembentukan Logam

Simulasi numerik telah bertransformasi dari sekadar alat bantu desain menjadi *Digital Twin* yang esensial dalam ekosistem manufaktur modern Industri 4.0. Pergeseran paradigma terjadi dari *virtual try-out* berbasis *Forming Limit Diagram* (FLD) konvensional menuju pemodelan komprehensif yang mengintegrasikan kondisi non-isotermal serta laju regangan tinggi [5].

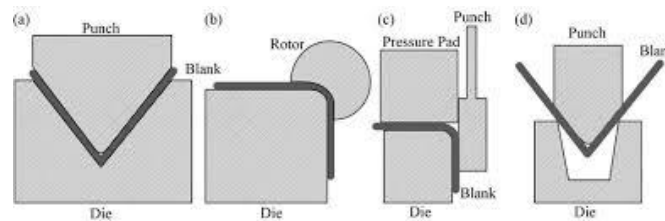
Secara kritis, simulasi Metode Elemen Hingga (FEM) saat ini dituntut untuk mengadopsi kriteria fraktur yang lebih maju, seperti *Modified Mohr-Coulomb* (MMC), guna memprediksi kegagalan pada kondisi tegangan rendah di mana FLD tradisional sering kali gagal memberikan prediksi akurat [29]. Riset masa depan diprediksi akan lebih banyak mengintegrasikan jaringan saraf tiruan (*Artificial Neural Network/ANN*) untuk mempercepat waktu komputasi simulasi multiskala (*multiscale*) yang sangat berat, tanpa mengorbankan detail mikrostruktur material [12].

Studi literatur juga menekankan bahwa analisis formabilitas dan *springback* semakin bergeser ke pendekatan prediktif berbasis FLD, *Forming Limit Stress Diagram* (FLSD), atau *Forming Limit Band* (FLB) serta model kerusakan terkalibrasi numerik, dengan dukungan *submodeling* dan *mesh* adaptif untuk meningkatkan efisiensi komputasi. Keberhasilan prediksi sangat bergantung pada kalibrasi fenomena kunci seperti anisotropi, mekanisme pengerasan (*hardening*), degradasi modulus elastisitas, serta pemodelan gesekan (*friction*) yang realistis. Lebih lanjut, kerangka numerik ini diperluas untuk proses nonkonvensional seperti *laser forming* dan *incremental sheet forming*, sehingga secara kolektif menggambarkan evolusi menuju ekosistem simulasi pembentukan pelat yang multiskala, kaya fisika, dan terintegrasi erat dengan validasi eksperimental [5].

#### 3.4.2 Material Tingkat Lanjut dalam Aplikasi Teknik Pembentukan Logam

Penggunaan AHSS menghadirkan lompatan signifikan dalam rasio kekuatan terhadap berat, namun sekaligus memperkenalkan tantangan formabilitas yang ekstrem [1].

Analisis komparatif antar-generasi AHSS menunjukkan bahwa sementara Generasi Pertama (*Dual Phase/DP, Transformation-Induced Plasticity/TRIP*) menawarkan kekuatan tinggi, Generasi Ketiga (*Quenching and Partitioning/Q&P, Medium-Manganese/Medium-Mn*) berupaya mencapai keseimbangan daktilitas dan biaya yang lebih optimal [3]. Kesenjangan ilmiah yang paling mencolok ditemukan pada keterbatasan *Forming Limit Diagram* (FLD) tradisional dalam memprediksi retak geser dan tepi yang terjadi tanpa didahului penipisan lokal (*necking*). Oleh karena itu, riset terkini menekankan perlunya transisi ke *Fracture Forming Limit Diagram* (FFLD) dan penggunaan *Digital Image Correlation* (DIC) untuk karakterisasi regangan *full-field*. Di masa depan, kurva triaksialitas diprediksi akan menggantikan FLD karena kemampuannya membandingkan tegangan dengan regangan secara lebih efektif, sehingga memberikan prediksi yang lebih andal untuk skenario pembentukan multisumbu yang kompleks pada kendaraan modern.



Gambar 7. Grafik Elongasi dan Tegangan AHSS Material [30]

Oleh karena itu, pemodelan konstitutif dan fraktur yang lebih maju berbasis kriteria luluh anisotropik, pengerasan (*hardening*) kompleks, parameter triaksialitas (*triaxiality*) dan *Lode angle*, serta kalibrasi menggunakan pengujian nonproporsional dan pengukuran regangan *full-field* (seperti DIC) sangat diperlukan agar simulasi FEM mampu memprediksi batas bentuk, kerusakan, dan fraktur AHSS secara andal dalam skenario pembentukan multistap dan multisumbu. Secara sintesis, ketiga artikel tersebut saling melengkapi: artikel pertama memberikan landasan metalurgi dan aplikasi AHSS di industri otomotif, artikel kedua menguraikan strategi pengendalian *heat-affected zone* (HAZ) untuk sambungan las berkinerja tinggi, dan artikel ketiga menyediakan kerangka teoretis dan eksperimental untuk pemodelan formabilitas serta kerusakan daktil. Dengan demikian, ketiga studi tersebut secara bersama-sama menawarkan panduan komprehensif mulai dari desain paduan hingga pembentukan dan pengelasan AHSS pada kendaraan modern [2]. Sinergi antara inovasi material AHSS, arsitektur proses cerdas berbasis sensor, dan ekosistem simulasi prediktif merupakan arah masa depan manufaktur logam yang aman, berkelanjutan, dan berperforma tinggi.

## KESIMPULAN

Proses pembentukan logam merupakan pilar utama manufaktur modern yang mengintegrasikan transformasi geometris dan perubahan sifat mekanis dalam penciptaan nilai tambah. Perancangan proses yang aman dan efisien sangat bergantung pada pemahaman deformasi plastis, hubungan tegangan-regangan, serta pengaruh suhu dan laju regangan. Klasifikasi ke dalam *sheet metal forming*, *bulk forming*, dan *sheet-bulk metal forming* (SBMF) menegaskan perbedaan mekanika deformasi, mode kegagalan, dan pendekatan pemodelan, sekaligus menunjukkan potensi hibridisasi SBFM dalam integrasi fungsi dan pemangkasan rantai proses dengan konsekuensi meningkatnya kompleksitas kontrol aliran material dan tribologi. Tinjauan terhadap proses *forging*, *rolling*, *extrusion*, *drawing*, dan *bending* menunjukkan bahwa setiap proses memiliki karakteristik pembebanan, kondisi termal, dan spektrum cacat yang khas, sehingga pemilihan proses harus mempertimbangkan keseimbangan antara formabilitas, kualitas permukaan, efisiensi energi, dan risiko cacat seperti *central burst*, retak permukaan, *springback*, dan *wrinkling*.

Perkembangan industri saat ini mengarah pada ekosistem pembentukan logam yang cerdas dan terdigitalisasi melalui pemanfaatan *servo press*, IIoT, CPPS, dan *digital twin* untuk pemantauan *in-line* serta optimasi *real-time* dalam rantai proses yang adaptif. Di sisi pemodelan, simulasi numerik berbasis FEM berkembang menuju kerangka

prediktif multiskala yang mengintegrasikan anisotropi, mekanisme *hardening*, serta kriteria kerusakan dan fraktur, dengan akurasi yang sangat bergantung pada kualitas kalibrasi parameter material dan kondisi antarmuka. AHSS diposisikan sebagai material kunci bagi desain struktur ringan dan tangguh, yang menuntut integrasi desain mikrostruktur, strategi pembentukan dan pengelasan, serta pemodelan tingkat lanjut. Secara keseluruhan, masa depan teknologi pembentukan logam ditentukan oleh sinergi antara inovasi material, arsitektur proses maju, dan ekosistem simulasi-sensor terintegrasi untuk mendukung manufaktur komponen berperforma tinggi yang aman dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Pereira, N. Peixinho, and S. L. Costa, "A Review of Sheet Metal Forming Evaluation of Advanced High-Strength Steels (AHSS)," *Metals*, vol. 14, no. 4. p. 394, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/met14040394>.
- [2] X. Hu and Z. Feng, "Advanced High-Strength Steel - Basics and Applications in the Automotive Industry," United States, 2021. doi: <https://doi.org/10.2172/1813170>.
- [3] A. K. Perka, M. John, U. B. Kuruveri, and P. L. Menezes, "Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications: Arc and Laser Welding Process, Properties, and Challenges," *Metals*, vol. 12, no. 6. p. 1051, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/met12061051>.
- [4] M. Endayanti *et al.*, "Effect of Plate Thickness on Springback in V-Bending of Aluminium Sheets," *Impr. J. Teknol. Dan Inf.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2024.
- [5] L. F. Folle *et al.*, "A Review on Sheet Metal Forming Behavior in High-Strength Steels and the Use of Numerical Simulations," *Metals*, vol. 14, no. 12. p. 1428, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/met14121428>.
- [6] H. Leon-Henao, N. Avedissian, and A. J. Ramirez, "Influence of epoxy adhesive on the weldability and mechanical behavior of 22MnB5 in weld bonding," *Weld. World*, vol. 70, pp. 2941–2954, 2026, doi: <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02323-9>.
- [7] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 7th ed. United States: John Wiley & Sons, 2019.
- [8] Z. S. A. Jabbar and M. N. Abdullah, "Simulation of Direct Extrusion Process of Aluminum Alloy Using the Finite Element Method," *Al-Rafidain Eng. J.*, vol. 29, no. 1, pp. 68–73, 2024.
- [9] Y. Sun, S. Yu, and G. Wang, "3 - General manufacturing route for medical devices," in *Metallic Biomaterials Processing and Medical Device Manufacturing*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2020, pp. 95–136. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102965-7.00003-5>.
- [10] M. P. Groover, "Metal Forming Processes," in *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, United States: John Wiley & Sons, 2019.
- [11] A. Awasthi, K. K. Saxena, and V. Arun, "Sustainable and smart metal forming manufacturing process," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, no. 2021, pp. 2069–2079, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.177>.
- [12] M. A. Ablat and A. Qattawi, "Numerical simulation of sheet metal forming: a review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 1, pp. 1235–1250, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9103-5>.
- [13] U. S. Dixit, "1 - Modeling of metal forming: a review," in *Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques*, Elsevier Series in Mechanics of Advanced Materials, 2020, pp. 1–30. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818232-1.00001-1>.
- [14] T. Trzepieciński, "Recent Developments and Trends in Sheet Metal Forming," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 6, p. 779, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/met10060779>.
- [15] S. Kumar and E. Povoden-karadeniz, "Plastic Deformation Behavior in Steels during Metal Forming Processes: A Review," in *Material Flow Analysis*, London: IntechOpen, 2021. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.97607>.
- [16] P. Verleysen, J. Peirs, J. Van Slycken, K. Faes, and L. Duchene, "Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 8, pp. 1457–1464, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.018>.

- [17] S. Cho, H. Kim, C. Park, and W. Chung, "Effect of Strain Rate and Friction on Formability According to Major Deformation Modes in Sheet Metal Forming," *steel Res. Int.*, vol. 94, p. 2200255, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202200255>.
- [18] S. Mewada *et al.*, "Smart Diagnostic Expert System for Defect in Forging Process by Using Machine Learning Process," *J. Nanomater.*, vol. 2022, no. 1, p. 2567194, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/2567194>.
- [19] A. M. Kumar, R. Parameshwaran, and R. Rajasekar, "Simulation of 1.2765 DIN steel billet and crack analysis during the forging process using DEFORM 3D software," *Materialwiss.*, vol. 52, p. 332, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/mawe.202000191>.
- [20] O. M. Ikumapayi, E. T. Akinlabi, P. Onu, and O. P. Abolusoro, "Rolling operation in metal forming: Process and principles – A brief study," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, Part 2, pp. 1644–1649, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.343>.
- [21] D. Leśniak *et al.*, "Latest advances in extrusion processes of light metals," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 24, no. 3, p. 184, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00988-5>.
- [22] V. Y. Risonarta, H. A. Fadly, and H. F. Perdana, "Metallurgical Analysis of Steel Plate for Deep Drawing Application," *Int. J. Ind. Res. Appl. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 25–28, 2017, doi: <https://doi.org/10.9744/JIRAE.2.1.25-28>.
- [23] S. M. Najm, T. Trzepieciński, O. M. Ibrahim, K. Szwajka, and M. Szewczyk, "Analysis of the friction performance of deep-drawing steel sheets using network models," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 132, pp. 3757–3769, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13565-0>.
- [24] A. Ringel and G. Hirt, "Bending behavior of structured steel sheets with undercuts for interlocking with Al die-cast metal," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 17, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01797-6>.
- [25] M. Wasif, A. Fatima, S. A. Iqbal, M. Tufail, and H. Karim, "Analysis and optimization of springback during the V-bending of hot-rolled high-strength steels (JSH440)," *J. Eng. Res.*, vol. 10, no. 3, Part A, pp. 298–314, 2022, doi: <https://doi.org/10.36909/jer.11027>.
- [26] B. Buchmayr, M. Degner, and H. Palkowski, "Future Challenges in the Steel Industry and Consequences for Rolling Plant Technologies," *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 163, pp. 76–83, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00501-018-0708-x>.
- [27] H. Hagenah *et al.*, "4.0 in metal forming – questions and challenges," *Procedia CIRP*, vol. 79, pp. 649–654, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.055>.
- [28] A. R. Fastyskovskii, A. N. Prudnikov, A. G. Nikitin, and T. N. Oskolkova, "Current trends in the development of metal forming," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 866, no. 1, p. 012003, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012003>.
- [29] M. C. Oliveira and J. V. Fernandes, "Modelling and Simulation of Sheet Metal Forming Processes," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 12, p. 1356, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/met9121356>.
- [30] A. Laarich, "Designing a Heat Treatment to Achieve Ductile Advanced High Strength Steels," 2020, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36105.06249>.