

Tinjauan Literatur: Pengaruh Variasi Metode Proses Bending Terhadap Hasil Kecacatan Pada Material Logam Paduan

Mufti Arifin Febriansyah¹, Sri Hastuti^{1*}, Ayub Dwi Nugroho¹, M. Nur Aiman¹, Habibi Khoirul Huda¹, dan Putra Dwi Pangesti¹

¹⁻⁶ Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Kota Magelang, Jawa Tengah, Indonesia

E-mail: muftiarifinfebriansyah@students.untidar.ac.id / hastutisrimasin@untidar.ac.id

Abstrak

Proses bending merupakan teknologi pembentukan logam yang krusial dalam industri manufaktur untuk menghasilkan komponen berbentuk lengkung dengan akurasi geometrik tinggi. Artikel tinjauan ini bertujuan membandingkan kinerja berbagai metode bending, meliputi Roll Bending, Rotary Draw Bending (RDB), Compression Bending (CB), dan V-Bending, dengan fokus pada fenomena springback, cacat wrinkling, distorsi penampang, serta strategi pengendaliannya. Metode penelitian yang digunakan adalah tinjauan literatur komparatif sistematis terhadap lima jurnal penelitian terkini (2020–2025) yang bersumber dari basis data internasional bereputasi (Elsevier/ScienceDirect dan Springer Nature Link), platform preprint ilmiah, serta jurnal dan repositori nasional terakreditasi. Analisis dilakukan dengan mengelompokkan studi berdasarkan metode bending, pendekatan riset, jenis cacat, dan temuan kuantitatif utama.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa 80% jurnal mengidentifikasi springback sebagai permasalahan dominan, sementara 20% berfokus pada deteksi dan kontrol wrinkling secara in-situ. Studi komparatif CB dan RDB menunjukkan bahwa CB menghasilkan springback lebih kecil (rata-rata 3,6°) dibandingkan RDB (4,2°), namun dengan distorsi penampang yang lebih besar. Intervensi berbasis material terbukti sangat efektif, di mana perlakuan panas quenching pada baja AISI 1040 menurunkan deviasi sudut springback hingga sekitar 87%. Pada Roll Bending, peningkatan ketebalan dan ukuran penampang pipa menyebabkan kenaikan gaya bending hingga hampir dua kali lipat. Selain itu, inovasi tooling berbasis Additive Manufacturing mampu menurunkan biaya tooling hingga 50% dengan presisi hasil bending di bawah 0,01%, sehingga sesuai untuk prototipe dan produksi batch kecil.

Tinjauan ini menyimpulkan bahwa tidak terdapat metode bending yang unggul secara universal, sehingga pemilihan proses harus dilakukan secara kontekstual berdasarkan kebutuhan geometrik, sifat material, dan pertimbangan ekonomi.

Kata kunci: Bending, Springback, Wrinkling, Rotary Draw Bending, Compression Bending.

1. Pendahuluan

Proses pembengkokan (*bending*) logam merupakan teknologi manufaktur fundamental yang krusial dalam industri otomotif, *aerospace*, dan konstruksi untuk menghasilkan komponen dengan geometri lengkung yang kompleks, akurasi dimensi tinggi, dan konsistensi yang baik. Keberhasilan proses ini tidak hanya ditentukan oleh pencapaian bentuk akhir, tetapi juga oleh kualitas produk yang meliputi akurasi sudut, integritas permukaan, dan minimnya distorsi[2]. Kualitas tersebut sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara parameter proses kunci seperti jenis dan sifat material (termasuk material canggih *Advanced High-Strength Steel* atau AHSS), ketebalan, radius tekuk, gaya penekanan, serta rancangan dies dan punch. Tantangan utama yang secara konsisten dijumpai adalah fenomena springback akibat sifat

elastis material, cacat *wrinkling* dan *ovalization* pada proses bending tabung atau profil dinding tipis, serta distorsi penampang dan penipisan dinding (*thinning*) yang secara kritis menentukan integritas struktural dan fungsional produk akhir.

Dalam dekade terakhir, penelitian mengenai proses bending telah memberikan kontribusi signifikan dalam memahami dan memitigasi permasalahan utama seperti springback, wrinkling, dan distorsi penampang. Strategi mitigasi springback terus berkembang, mulai dari kompensasi sudut tooling berbasis empiris dan numerik hingga penerapan perlakuan panas terkontrol untuk mengurangi tegangan sisa dan meningkatkan kestabilan geometri produk. Di level sistem kontrol yang lebih tinggi[7], menyajikan model prediksi springback berbasis sistem kontrol tertanam dan strategi simulasi adaptif, yang mampu meningkatkan akurasi prediksi dan efisiensi proses bending otomatis[7].

Untuk mengatasi cacat wrinkling dan ovalization, sejumlah riset internasional mengembangkan sistem pemantauan dan kontrol in-situ berbasis sensor serta integrasi pendekatan closed-loop control pada proses bending, yang terbukti dapat mendeteksi cacat pada tahap awal pembentukan dan mencegah kegagalan lebih lanjut [3]). Selain itu, optimisasi geometri tooling melalui simulasi Finite Element Analysis (FEA) dan prediksi perilaku material menjadi fokus penting untuk meminimalkan springback dan cacat terlihat dalam studi numerik prediktif yang semakin disempurnakan oleh algoritme simulasi mutakhir[7], [11].

Inovasi pada sisi tooling juga menunjukkan perkembangan pesat. Penggunaan flexible tooling dan desain cerdas berbasis Additive Manufacturing (AM) telah diteliti untuk meningkatkan fleksibilitas produksi dan penyesuaian cepat terhadap variasi geometri produk, sekaligus mengurangi lead time dan biaya[10]

Namun, tinjauan literatur menunjukkan bahwa sebagian besar studi tersebut bersifat terisolasi, fokus pada satu metode bending tertentu (seperti *Rotary Draw Bending* atau *V-Bending*) [8], satu jenis material [13], atau satu strategi mitigasi cacat yang spesifik [7]. Berdasarkan tinjauan tersebut, teridentifikasi sebuah kesenjangan (*research gap*) yang signifikan: belum ada studi yang melakukan analisis komparatif sistematis dan terintegrasi yang membandingkan kinerja berbagai metode bending utama (seperti *Rotary Draw Bending*, *Compression Bending*, dan *V-Bending*) dalam menyelesaikan spektrum permasalahan kualitas (*springback*, *wrinkling*, *ovalization*) secara simultan. Studi yang ada cenderung membandingkan hanya dua metode [15] atau mengevaluasi parameter yang terbatas dalam satu metode [3], [14]. Selain itu, integrasi antara inovasi tooling kontemporer khususnya yang berbasis *Additive Manufacturing* ke dalam evaluasi performa berbagai metode tersebut masih sangat terbatas.

Penelitian mengenai proses bending umumnya masih dilakukan secara terpisah berdasarkan metode, material, atau strategi mitigasi cacat tertentu [15] membandingkan hanya dua metode, sementara [3], [14] berfokus pada parameter spesifik dalam satu metode), sehingga pemahaman mengenai trade-off antara kualitas geometrik, kompleksitas tooling, dan fleksibilitas proses belum tersintesis secara komprehensif. Kebaruan tinjauan literatur ini terletak pada penyusunan sintesis komparatif yang holistik dan berbasis data empiris, dengan mengintegrasikan perbandingan berbagai metode bending utama, diantaranya Roll Bending, Rotary Draw Bending, Compression Bending, dan V-Bending, serta evaluasi strategi mitigasi cacat berbasis proses, material, dan sistem kontrol dalam satu kerangka analisis terpadu. Selain itu, potensi dan keterbatasan inovasi tooling modern, khususnya Additive Manufacturing dan sistem sensor in-situ, dianalisis secara kritis dari sisi teknis dan aplikatif. Permasalahan utama yang diangkat adalah bagaimana trade-off kuantitatif antara springback, distorsi penampang, dan kebutuhan tooling bervariasi untuk material dan geometri tertentu, sejauh mana efektivitas relatif strategi mitigasi cacat dapat dibandingkan berdasarkan hasil empiris lintas studi, serta dalam kondisi apa inovasi tooling modern layak diintegrasikan dengan metode bending konvensional tanpa mengorbankan presisi geometrik dan kelayakan ekonomis. Penelitian mengenai proses bending umumnya masih dilakukan secara terpisah

berdasarkan metode, material, atau strategi mitigasi cacat tertentu, sehingga pemahaman mengenai trade-off antara kualitas geometrik, kompleksitas tooling, dan fleksibilitas proses belum tersintesis secara komprehensif. Kebaruan tinjauan literatur ini terletak pada penyusunan sintesis komparatif yang holistik dan berbasis data empiris, dengan mengintegrasikan perbandingan berbagai metode bending utama diantaranya Roll Bending, Rotary Draw Bending, Compression Bending, dan V-Bending serta evaluasi strategi mitigasi cacat berbasis proses, material, dan sistem kontrol dalam satu kerangka analisis terpadu. Selain itu, potensi dan keterbatasan inovasi tooling modern, khususnya Additive Manufacturing dan sistem sensor in-situ, dianalisis secara kritis dari sisi teknis dan aplikatif. Permasalahan utama yang diangkat adalah bagaimana trade-off kuantitatif antara springback, distorsi penampang, dan kebutuhan tooling bervariasi untuk material dan geometri tertentu, sejauh mana efektivitas relatif strategi mitigasi cacat dapat dibandingkan berdasarkan hasil empiris lintas studi, serta dalam kondisi apa inovasi tooling modern layak diintegrasikan dengan metode bending konvensional tanpa mengorbankan presisi geometrik dan kelayakan ekonomis.

Secara keseluruhan, tujuan tinjauan literatur ini adalah menyusun panduan analitis yang terstruktur untuk membantu peneliti dan praktisi industri dalam memilih dan mengoptimasi proses bending sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik. Kontribusi ilmiah yang diharapkan meliputi konsolidasi pengetahuan terkini mengenai berbagai metode bending serta pengembangan kerangka analisis komparatif yang mengaitkan metode pembentukan, karakteristik material, strategi mitigasi cacat, dan konfigurasi tooling. Melalui integrasi antara pendekatan konvensional dan inovasi tooling berbasis Additive Manufacturing, tinjauan ini diharapkan dapat mendukung peningkatan kualitas geometrik produk, efisiensi proses, serta pengambilan keputusan teknis yang lebih rasional dalam industri manufaktur logam.

2. Metodologi

Artikel ini merupakan tinjauan literatur yang menggunakan pendekatan kajian konseptual dan analisis komparatif sistematis. Tahapan penelitian mengacu pada kerangka kajian literatur yang dikembangkan oleh [12] dengan penyesuaian terhadap konteks proses bending. Proses kajian meliputi identifikasi dan seleksi artikel relevan, pengelompokan literatur berdasarkan metode bending, pendekatan penelitian (eksperimental dan numerik), serta jenis cacat yang dianalisis. Selanjutnya, dilakukan analisis komparatif terhadap temuan kuantitatif utama untuk mengidentifikasi pola, trade-off, dan implikasi aplikatif, sehingga alur analisis dapat ditelusuri secara sistematis dan transparan.

2.2 Evaluasi dan Ekstraksi Konten

Kelima jurnal terpilih kemudian dikaji secara mendalam dengan menganalisis aspek metodologi, temuan utama, dan implikasi teknisnya. Proses pembacaan kritis ini membantu kami mengevaluasi konsistensi antara metode dan hasil yang dilaporkan. Data penting dari setiap studi kemudian dikelompokkan dalam matriks analitik untuk memetakan pola temuan.

2.3 Sintesis Tematik

Berdasarkan analisis mendalam terhadap kelima studi utama, kami mengidentifikasi empat tema besar yang menjadi fokus pembahasan. Tema pertama membahas karakteristik fundamental berbagai metode *bending*, dengan studi [8] yang secara eksplisit membandingkan deformasi pada *Compression versus Rotary Draw Bending*. Tema kedua berkaitan dengan strategi mengatasi *springback*, dimana penelitian [7] memberikan bukti empiris efektivitas perlakuan panas *quenching*.

Tema ketiga fokus pada pengendalian cacat *wrinkling*, dengan kontribusi penting dari [3] yang mendemonstrasikan sistem deteksi *in-situ*. Terakhir, tema inovasi *tooling* diwakili oleh studi [13] tentang *flexible roll* dan penelitian mutakhir [11] yang mengeksplorasi tool hasil Additive Manufacturing.

2.4 Perangkaian Pembahasan

Struktur penulisan disusun secara logis dengan menghubungkan temuan antar studi dalam setiap tema. Pola pembahasan dikembangkan untuk menciptakan alur analisis yang koheren, mulai dari identifikasi masalah, strategi solusi, hingga implikasi praktis. Sintesis pengetahuan dari berbagai sumber ini kemudian diramu menjadi sebuah perspektif komprehensif tentang perkembangan terkini teknologi *bending*.

3. Hasil dan pembahasan

Hasil penelitian dan pembahasan mengenai hasil dari penelitian. Untuk format penulisan tabel dan gambar silakan lihat contoh berikut:

3.1. Analisis Gaya dan Deformasi pada Roll Bending

"Beberapa penelitian terdahulu telah menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi gaya dalam proses pembentukan logam. Secara khusus, [13] melakukan analisis mendalam terhadap proses *roll bending* pada pipa persegi. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan pipa dan ukuran penampang secara signifikan meningkatkan gaya *bending* yang diperlukan.

Sebagaimana dirangkum dalam **Tabel 3.1**, pengaruh kedua variabel tersebut terhadap gaya bending bersifat sistematis dan dapat diukur. Terlihat bahwa untuk pipa dengan ukuran penampang terbesar, yaitu 6x6 cm, diperlukan gaya yang jauh lebih besar dibandingkan dengan ukuran yang lebih kecil.

Tabel 3.1. Ringkasan Hasil Analisis Gaya *Bending* pada Proses *Roll Bending* [12]

No.	Ukuran Pipa	Ketebalan 1.6 mm	Ketebalan 2.2 mm
1.	3x3 cm	129.6 kg	178.2 kg
2.	6x6 cm	1036.8 kg	1953.6 kg

Data pada **Tabel 3.1**, memperkuat temuan bahwa peningkatan ketebalan dari 1.6 mm menjadi 2.2 mm pada pipa 6x6 cm menyebabkan gaya *bending* melonjak hampir dua kali lipat. Hal ini mengindikasikan bahwa kekakuan penampang (moment inersia) memegang peran yang sangat kritis dalam proses ini.

3.2. Deteksi dan Kontrol In-Situ Cacat Wrinkle pada Rotary Draw Bending

(Borchmann et al., 2020) berfokus pada pendeteksian dini dan kontrol cacat *wrinkling* selama proses *Rotary Draw Bending* (RDB). Dengan mengintegrasikan laser *line scanner* pada *wiper die* dan sensor gaya pada *mandrel*, penelitian ini berhasil mendeteksi pembentukan *wrinkle* secara *in-situ*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa parameter proses seperti *pressure die offset* dan kecepatan *collet* sangat mempengaruhi terbentuknya *wrinkle*. Sebagaimana dirangkum dalam **Tabel 3.2**, laser *line scanner* secara konsisten mampu mendeteksi kerutan yang disebabkan oleh variasi *pressure die offset* pada semua ukuran pipa. Namun, untuk kerutan yang disebabkan oleh kecepatan *collet* yang tidak tepat, deteksi dini justru lebih baik ditangkap oleh sensor gaya pada *mandrel*.

Tabel 3.2 Ringkasan Efektivitas Sensor dalam Deteksi *In-Situ* Kerutan pada Proses RDB [3]

No.	Ukuran Pipa	Penyebab Kerutan	Sensor yang Efektif
1.	40x1	Pressure Die Offset	Laser, Gaya Wiper Die
2.		Collet Speed	Gaya Mandrel
3.	40x2	Pressure Die Offset	Laser, Gaya Mandrel, Gaya Wiper Die
4.		Collet Speed	Laser, Gaya Wiper Die
5.	40x0.8	Pressure Die Offset	Laser, Gaya Wiper Die
6.		Collet Speed	Laser, Gaya Wiper Die

Data pada **Tabel 3.2.** memperlihatkan bahwa tidak ada satu sensor pun yang universal untuk semua kondisi. Kerutan yang terjadi di area lengkung dekat *clamp dies* lebih efektif dideteksi oleh sensor gaya mandrel, sementara kerutan di area lurus dekat *wiper die* lebih mudah ditangkap oleh laser scanner dan sensor gaya *wiper die*. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan sistem sensor multi-sumber untuk memantau proses RDB secara komprehensif. Penelitian ini memberikan landasan yang kokoh untuk pengembangan sistem kendali *closed-loop* di masa depan, di mana parameter proses seperti posisi *pressure die* dan kecepatan *collet* dapat disesuaikan secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor untuk mencegah kerutan sebelum cacat tersebut menjadi parah[3], [14].

3.3. Studi Komparatif Rotary Draw Bending vs. Compression Bending

Untuk mengkaji variasi trade-off kuantitatif antara kualitas geometrik dan kebutuhan tooling pada metode bending yang berbeda, Tronvoll et al. (2023) melakukan studi komparatif antara Compression Bending (CB) dan Rotary Draw Bending (RDB) pada tabung aluminium AA6060-T4. Perbandingan ini relevan karena kedua metode memiliki mekanisme deformasi dan kompleksitas tooling yang berbeda, sehingga menghasilkan respons kualitas hasil bending yang kontras.

Dari aspek springback, hasil penelitian menunjukkan bahwa CB menghasilkan deviasi sudut yang lebih kecil dibandingkan RDB. Untuk target sudut 90° , nilai springback rata-rata pada CB adalah sekitar $3,6^\circ$, sedangkan pada RDB mencapai sekitar $4,2^\circ$. Temuan ini mengindikasikan bahwa mekanisme pembebanan pada CB cenderung menghasilkan pelepasan elastis yang lebih kecil setelah proses pembengkokan.

Namun, keunggulan CB dalam menekan springback tersebut diikuti oleh peningkatan distorsi penampang. Tronvoll et al. (2023) melaporkan bahwa CB menyebabkan flattening yang lebih tinggi, dengan selisih sekitar 2–3% dibandingkan RDB, serta widening sebesar 1,59% pada CB dibandingkan hanya 0,46% pada RDB. Sebaliknya, penggunaan mandrel dan kontrol geometri yang lebih ketat pada RDB terbukti lebih efektif dalam mempertahankan integritas penampang.

Dari sisi kebutuhan tooling dan implikasi proses, CB memiliki keunggulan karena tidak memerlukan *clamp die*, sehingga mengurangi scrap dan memungkinkan pembuatan lengkungan yang berdekatan. Hal ini menjadikan CB lebih fleksibel dan efisien secara material, terutama untuk prototipe dan produksi batch kecil. Sebaliknya, RDB memerlukan sistem tooling yang lebih kompleks, namun menawarkan konsistensi dan preservasi geometri penampang yang lebih baik.

Tabel 3.3. Ringkasan Perbandingan Kinerja Compression Bending (CB) dan Rotary Draw Bending (RDB) berdasarkan [8]

No.	Parameter	Compression Bending (CB)	Rotary Draw Bending (RDB)
1.	Springback	Lebih Kecil	Lebih Besar
2.	Distorsi Penampang	Lebih Besar	Lebih Kecil
3.	Kelebihan Proses	Kurangi scrap, fleksibilitas desain	Akurasi geometri superior

Sebagaimana dirangkum dalam **Tabel 3.3**, hasil-hasil tersebut memperlihatkan adanya trade-off yang jelas antara akurasi sudut dan preservasi geometri penampang. Compression Bending unggul dalam hal reduksi springback dan efisiensi material, namun dengan konsekuensi distorsi penampang yang lebih besar. Rotary Draw Bending, di sisi lain, mempertahankan kualitas penampang yang lebih baik dengan kebutuhan tooling yang lebih kompleks dan springback yang relatif lebih tinggi. Dengan demikian, pemilihan metode bending harus mempertimbangkan prioritas aplikasi, apakah menekankan akurasi sudut dan fleksibilitas proses, atau preservasi geometri penampang dan presisi dimensional yang tinggi.

3.4. Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Springback pada V-Bending

Dalam konteks membandingkan efektivitas strategi mitigasi cacat berbasis material, Chandra dan Mahyoedin (2023) meneliti pengaruh perlakuan panas quenching terhadap fenomena springback pada proses V-Bending baja AISI 1040. Pendekatan ini merepresentasikan strategi mitigasi yang tidak bergantung pada modifikasi parameter proses atau sistem kontrol, melainkan pada perubahan sifat mekanik material sebelum pembentukan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan quenching secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik material dari 310 MPa menjadi 450,3 MPa serta modulus elastisitas dari 200 GPa menjadi 306,7 GPa. Peningkatan sifat mekanik tersebut berdampak langsung pada penurunan springback. Secara kuantitatif, nilai faktor springback (K_s) tertinggi, yang mengindikasikan springback minimal, dicapai pada material quenching dengan sudut die 85°, yaitu sebesar 0,985. Sebaliknya, material tanpa perlakuan panas menunjukkan nilai K_s yang lebih rendah dan deviasi sudut springback yang jauh lebih besar.

Tabel 1. Pengaruh Quenching terhadap Sifat Material dan *Springback* Baja AISI 1040 [7]

No.	Parameter	Raw Material	Material Quenching	Keterangan
1.	Kekuatan Tarik	310 MPa	450.3 MPa	Peningkatan ~45%
2.	Modulus Elastisitas	200 GPa	306.7 GPa	Peningkatan ~53%
3.	Faktor Springback (K_s) Terbaik	0.890 (die 80°)	0.985 (die 85°)	K_s mendekati 1 menunjukkan springback lebih kecil
4.	Selisih Sudut Springback	9.83°	1.23°	Quenching mengurangi deviasi sudut secara signifikan

Sebagaimana dirangkum dalam Tabel 3.4, perbandingan antara material tanpa perlakuan dan material quenching memperlihatkan bahwa selisih sudut springback dapat direduksi secara signifikan, dari 9,83° menjadi hanya 1,23°. Hal ini menunjukkan bahwa strategi berbasis modifikasi sifat material mampu menghasilkan pengendalian springback yang sangat efektif secara absolut, bahkan tanpa penambahan kompleksitas tooling atau sistem kontrol tambahan.

Secara mekanistik, peningkatan kekuatan tarik dan modulus elastisitas menyebabkan material menjadi lebih kaku, sehingga energi elastis yang tersimpan selama proses pembengkokan dan dilepaskan kembali setelah beban dihilangkan menjadi lebih kecil. Dibandingkan dengan strategi mitigasi berbasis kontrol proses atau sensor in-situ yang bersifat adaptif terhadap variasi kondisi pembentukan, pendekatan berbasis perlakuan panas ini bersifat lebih deterministik dan stabil, namun terbatas pada jenis material tertentu dan memerlukan tahapan proses tambahan sebelum bending.

Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa strategi mitigasi cacat berbasis material merupakan salah satu pendekatan paling efektif dalam menekan springback secara kuantitatif, khususnya untuk baja karbon menengah seperti AISI 1040. Temuan serupa tentang peningkatan sifat mekanik melalui perlakuan panas juga dilaporkan pada baja pegas AISI 1095 dengan proses tempering [15]. Namun, efektivitas tinggi tersebut harus dipertimbangkan bersama keterbatasan fleksibilitas material dan implikasi biaya proses, sehingga pemilihannya perlu disejajarkan dengan strategi mitigasi lain dalam konteks aplikasi industri yang spesifik [7], [16].

3.5. Inovasi Tooling Additive Manufacturing untuk V-Bending

Untuk mengevaluasi kelayakan integrasi inovasi tooling modern pada metode bending konvensional, Bhatia et al. (2025) mengeksplorasi penggunaan tooling V-Bending (punch dan die) berbasis Additive Manufacturing (AM) dari material ABS. Melalui simulasi FEA dan validasi eksperimen pada material SS304 dan AA6061, ditunjukkan bahwa tooling ABS mampu menghasilkan sudut bending 30°, 45°, dan 60° dengan presisi tinggi, ditandai oleh deviasi sudut yang sangat kecil (<0,01%).

Sebagaimana dirangkum dalam Tabel 3.5, kinerja geometrik tooling ABS sebanding dengan tooling baja konvensional, baik dari sisi presisi hasil bending maupun tingkat thinning yang berada pada kisaran aman ($\sim 5\%$). Selain itu, tooling ABS menunjukkan kemampuan menahan tekanan hingga 139 MPa, yang meskipun lebih rendah dibandingkan baja, tetap memadai untuk aplikasi pembentukan lembaran tipis hingga menengah. Keunggulan utama pendekatan ini terletak pada pengurangan biaya tooling hingga sekitar 50% serta fleksibilitas desain dan waktu lead yang jauh lebih singkat.

Tabel 3.5. Ringkasan Perbandingan Kinerja dan Ekonomi Tooling ABS vs. Baja [11]

No.	Aspek	Tooling ABS (AM)	Tooling Baja (Konvensional)
1.	Biaya Produksi Tooling	\$12.13 ($\approx 50\%$ lebih murah)	\$25.41
2.	Presisi Hasil Bending	Tinggi (Deviasi $< 0.01\%$)	Tinggi
3.	Kemampuan Forming	Mampu membentuk SS304 & AA6061	Mampu membentuk SS304 & AA6061
4.	Tingkat Thinning	$\approx 5\%$ (dalam batas aman)	$\approx 5\%$ (dalam batas aman)
5.	Fleksibilitas & Waktu Lead	Sangat Tinggi & Cepat	Terbatas & Lama
6.	Kekuatan Tooling	Mampu menahan tekanan hingga 139 MPa	Sangat Tinggi
7.	Aplikasi Ideal	Prototipe & produksi batch kecil	Produksi massal

Dari perspektif integrasi proses, sifat material ABS yang mampu menyerap shock memberikan distribusi tekanan yang lebih merata pada lembaran logam, sehingga berkontribusi pada minimnya cacat seperti springback dan thinning dalam rentang aplikasi yang diuji. Namun, keterbatasan kekuatan dan durabilitas material ABS membatasi penerapannya pada beban pembentukan tinggi dan produksi massal jangka panjang.

Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa tooling berbasis Additive Manufacturing layak diintegrasikan dengan metode bending konvensional terutama untuk prototipe, produksi batch kecil, dan aplikasi dengan variasi desain tinggi, tanpa mengorbankan presisi geometrik dan kelayakan ekonomis. Sebaliknya, untuk produksi massal dengan tuntutan durabilitas tinggi, tooling baja konvensional tetap menjadi pilihan yang lebih sesuai. Temuan ini secara langsung menegaskan bahwa kelayakan inovasi tooling modern bersifat kondisional dan sangat bergantung pada kebutuhan aplikasi[5], [11].

3.6. Sintesis Hasil dan Implikasi Pemilihan Metode Bending

Secara keseluruhan, hasil-hasil yang dibahas pada Subbab 3.1 hingga 3.5 menunjukkan bahwa kualitas geometrik hasil bending ditentukan oleh interaksi kompleks antara metode pembentukan, karakteristik material, strategi mitigasi cacat, dan konfigurasi tooling. Perbandingan antar metode bending mengungkap adanya trade-off kuantitatif yang konsisten antara springback, distorsi penampang, dan kebutuhan tooling, di mana metode dengan kontrol geometri penampang yang lebih baik cenderung memerlukan sistem tooling yang lebih kompleks dan menunjukkan springback yang relatif lebih besar, sementara metode dengan tooling lebih sederhana mampu menekan springback dengan konsekuensi peningkatan distorsi penampang. Strategi mitigasi cacat berbasis material, seperti perlakuan panas, terbukti paling efektif secara kuantitatif dalam mereduksi springback, namun bersifat terbatas pada material tertentu dan kurang fleksibel terhadap variasi desain. Sebaliknya, pendekatan berbasis optimasi proses dan sistem kontrol in-situ menawarkan fleksibilitas dan kemampuan adaptif terhadap pembentukan cacat, meskipun dengan peningkatan kompleksitas sistem. Inovasi tooling berbasis Additive Manufacturing menunjukkan kelayakan integrasi yang tinggi untuk prototipe dan produksi batch kecil, dengan kinerja geometrik yang sebanding dan keuntungan ekonomi yang signifikan, tetapi belum menggantikan tooling konvensional untuk produksi massal dengan beban tinggi. Dengan demikian, sintesis ini menegaskan bahwa tidak terdapat satu solusi universal dalam proses bending, dan pemilihan metode serta strategi

optimasi harus dilakukan secara kontekstual berdasarkan kombinasi material, geometri, target kualitas, dan skala produksi.

4. Kesimpulan

Tinjauan literatur ini menunjukkan bahwa kualitas geometrik hasil proses bending tidak ditentukan oleh satu faktor tunggal, melainkan oleh kombinasi metode pembentukan, karakteristik material, strategi mitigasi cacat, dan konfigurasi tooling yang digunakan. Perbandingan antar metode bending utama mengungkap adanya trade-off kuantitatif yang konsisten antara springback, distorsi penampang, dan kompleksitas kebutuhan tooling. Metode dengan kontrol geometri penampang yang lebih baik cenderung membutuhkan sistem tooling yang lebih kompleks dan menunjukkan springback yang relatif lebih besar, sedangkan metode dengan tooling lebih sederhana mampu menekan springback dengan konsekuensi peningkatan distorsi penampang.

Strategi mitigasi cacat berbasis modifikasi sifat material, seperti perlakuan panas quenching, terbukti paling efektif secara kuantitatif dalam mengurangi springback dan meningkatkan akurasi sudut hasil bending. Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan fleksibilitas dan hanya relevan untuk jenis material tertentu. Sebaliknya, strategi berbasis optimasi parameter proses dan sistem kontrol in-situ menawarkan kemampuan adaptif yang lebih tinggi dalam mencegah cacat seperti wrinkling, meskipun memerlukan integrasi sistem dan kompleksitas proses yang lebih besar.

Inovasi tooling berbasis Additive Manufacturing menunjukkan potensi yang signifikan sebagai solusi yang ekonomis dan fleksibel, khususnya untuk prototipe dan produksi batch kecil, dengan kinerja geometrik yang sebanding dengan tooling konvensional dan pengurangan biaya serta waktu lead yang substansial. Meskipun demikian, keterbatasan kekuatan dan durabilitas material hasil AM masih membatasi penerapannya pada produksi massal dengan beban pembentukan tinggi.

Secara keseluruhan, hasil tinjauan ini menegaskan bahwa tidak terdapat solusi universal dalam pemilihan metode dan strategi optimasi proses bending. Oleh karena itu, pendekatan yang holistik dan kontekstual dengan mempertimbangkan kebutuhan aplikasi, karakteristik material, target kualitas geometrik, dan skala produksi menjadi kunci dalam menentukan konfigurasi proses bending yang paling optimal. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengambilan keputusan teknis serta membuka peluang penelitian lanjutan yang mengarah pada integrasi strategi mitigasi cacat dan inovasi tooling secara lebih sinergis [5], [7], [8].

Ucapan terima kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah terlibat dalam pembuatan sampai penerbitan artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] A. Bagus Permana and A. Mahendra Sakti, "STUDI EKSPERIMEN KEKUATAN IMPACT DAN BENDING BAJA KARBON PEGAS DAUN AISI 1095 PADA MOBIL KIJANG KAPSUL 7K-EFI TAHUN 2000 DENGAN PERLAKUAN PANAS TEMPERING," 2020.
- [2] Akhyar, "BUKU_AJAR_PROSES_PENGERJAAN_LOGAM," Feb. 2022.
- [3] C. Anwar, N. Rahdiana, and A. Ilmar Ramadhan, "ANALISIS PENGARUH RADIUS DIES TERHADAP SPRINGBACK LOGAM LEMBARAN STAINLESS-STEEL PADA PROSES BENDING HIDROLIK V-DIE," vol. 12, no. 2, 2020, doi: 10.24853/jurtek.12.2.123-132.
- [4] C. B. Nugroho and R. Hidayat, "Studi Cacat Permukaan plat Aluminium pada Proses Pembengkokkan Sudut Mesin Bending," *Jurnal Integrasi* |, vol. 88, no. 2, Sep. 2016.
- [5] C. V Bhatia, D. Patel, M. H. Abidi, and F. Alasim, "Simulation and Experimental Study of the V-Bending Process for SS304 and AA6061 Sheets Using Additively Manufactured Tools," Feb. 18, 2025. doi: 10.20944/preprints202502.1331.v1.

- [6] I. Budhi Rahardja *et al.*, “ANALISIS PENGARUH RADIUS BENDING PADA PROSES BENDING MENGGUNAKAN PELAT SPCC-SD TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR MIKRO,” *Universitas Buana Perjuangan*, vol. 01, no. 01, p. 41151, 2020.
- [7] J. Xu, J. Yan, Y. Huang, and D. Ding, “Simulation and Prediction of Springback in Sheet Metal Bending Process Based on Embedded Control System,” *Sensors*, vol. 24, no. 23, p. 7863, 2024, doi: 10.3390/s24237863.
- [8] L. Borchmann, P. Frohn-Sørensen, and B. Engel, “In situ detection and control of wrinkle formation during rotary draw bending,” in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2020, pp. 589–596. doi: 10.1016/j.promfg.2020.08.106.
- [9] M. F. D. Chandra and Y. RD Mahyoedin, “PENGARUH QUENCHING TERHADAP SPRINGBACK BAJA AISI 1040 DENGAN PROSES V-BENDING.”
- [10] M. Schiller, P. Frohn-Sørensen, F. Schreiber, D. Morez, M. Manns, and B. Engel, “Smart design and additive manufacturing of bending tools to improve production flexibility,” *Manuf Lett*, vol. 41, pp. 91–102, 2024, doi: 10.1016/j.mfglet.2024.09.013.
- [11] M. Wasif, M. Rababah, A. Fatima, and S. U. R. Baig, “Prediction of Springback using the Machine Learning Technique in high-tensile strength sheet metal during the V-Bending Process,” *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 481–488, Dec. 2023, doi: 10.59038/jjmie/170403.
- [12] R. Djoko Andrijono, “Analisis Roll Bending Process pada Square Pipe dengan Desain Flexible Roll,” 2020.
- [13] R. Janatama, dan Vika Rizkia, P. Studi Manufaktur, J. Teknik Mesin, P. Negeri Jakarta, and J. G. A Siwabessy, “Pengaruh Jenis Material Logam Lembaran dan Radius Lengkungan Dies Set Pad dan Punch Terhadap Hasil Sudut Tekuk Proses U-Die Bending,” 2023. [Online]. Available: <http://prosiding.pnj.ac.id>
- [14] R. M. Suryaman, “PENGARUH RADIUS DIES TEKNIK ARC BOTTOMING PADA HASIL SUDUT BENDING PROSES U-DIE BENDING,” Jan. 2023.
- [15] S. A. Tronvoll, J. Ma, and T. Welo, “Deformation behavior in tube bending: a comparative study of compression bending and rotary draw bending,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, no. 3–4, pp. 801–816, Jan. 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10433-7.
- [16] S. Rahma Baesuni, A. M. Azzahra, A. Rizky, S. Nurdyanto, and Y. Prastyo, “ASIAN JOURNAL OF MULTIDISCIPLINARY RESEARCH ASIAN JOURNAL OF MULTIDISCIPLINARY RESEARCH Analisis Defect pada Proses Manual Bending Pipa Tube Brake PT Manufaktur Otomotif dengan Metode DMAIC,” vol. 2, no. 1, 2025.