

Tinjauan Pustaka Pengembangan Desain Mata Punch pada Proses *Punching Multi Plate Pipe*

Naufal Eka Prasetya, Dan Mugisidi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA

Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp. Rambutan, Ps. Rebo, Jakarta Timur. Telp.(021)840094 Fax. (021)87782739

E-mail: ekaprasetyanaufal993@gmail.com

Abstrak

Proses punching multi plate pipe merupakan salah satu teknologi manufaktur yang krusial dalam industri modern, khususnya dalam pembuatan komponen pipa berlubang dengan presisi tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengembangan desain mata punch yang optimal untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produk pada proses punching multi plate pipe. Metode yang diterapkan dalam penelitian-analisis literatur deskriptif dengan mengkaji berbagai sumber referensi relevan mengenai desain punch, material, dan parameter proses punching. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain mata punch yang optimal harus mempertimbangkan faktor geometri, pemilihan material, sistem pendinginan, dan analisis keausan. Inovasi material seperti tool steel dengan baja paduan tinggi serta coating khusus terbukti dapat meningkatkan umur pakai. Simulasi Finite Element Analysis (FEA) menjadi alat yang efektif untuk optimasi desain sebelum implementasi actual. Penelitian ini memberikan rekomendasi desain mata punch yang dapat diaplikasikan secara praktis dalam industri manufaktur untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya produksi.

Kata Kunci: Pengembangan, Mata Punch, Punching Multi Plate Pipe.

Abstract

The multi-plate pipe punching process is a crucial manufacturing technology in modern industry, especially in the manufacture of high-precision perforated pipe components. This study aims to examine the development of an optimal punch eye design to improve efficiency and product quality in the multi-plate pipe punching process. The method applied in this research is descriptive literature analysis by reviewing various relevant reference sources on punch design, materials, and punching process parameters. The results show that the optimal punch design must consider geometric factors, material selection, cooling systems, and wear analysis. Material innovations such as tool steel with high alloy steel and special coatings have been proven to increase service life. Finite Element Analysis (FEA) simulation is an effective tool for design optimization prior to actual implementation. This study provides punch eye design recommendations that can be practically applied in the manufacturing industry to increase productivity and reduce production costs.

Keywords: Development, Punch Eye, Multi Plate Pipe Punching.

1. PENDAHULUAN

Industri pipa baja merupakan salah satu sektor vital dalam konstruksi dan infrastruktur modern, di mana proses punching lubang pada pipa berlapis ganda menjadi tahapan krusial yang menentukan kualitas produk akhir. Pipa baja berlapis memiliki aplikasi luas dalam berbagai sektor industri, mulai dari konstruksi bangunan, sistem perpipaan minyak dan gas, hingga struktur jembatan dan menara. Proses punching adalah metode pembentukan lubang yang umum digunakan karena efisiensinya dalam produksi

massal, namun tantangan teknis yang muncul dalam proses ini terutama pada material multi-plat dengan ketebalan 3-7 mm masih menjadi perhatian utama para praktisi industri dan peneliti di bidang teknik mesin [1].

Mata punch tradisional yang digunakan dalam industri saat ini menghadapi beberapa kendala signifikan yang berdampak langsung pada efisiensi produksi dan biaya operasional. Permasalahan utama yang sering ditemukan meliputi keausan cepat pada mata punch, ketidaktepatan dimensi lubang yang dihasilkan, serta efisiensi proses yang rendah akibat

tekanan mekanis suboptimal yang diberikan terhadap bahan berlapis. Keausan mata punch yang cepat tidak hanya meningkatkan biaya penggantian alat tetapi juga menyebabkan peningkatan waktu henti mesin (downtime), yang pada akhirnya berdampak pada produktivitas secara keseluruhan. Sementara itu, ketidaktepatan lubang dapat mengakibatkan masalah dalam tahap selanjutnya seperti proses perakitan atau instalasi, yang memerlukan proses koreksi tambahan dan menambah biaya produksi [2].

Fenomena deformasi material yang tidak terkendali selama proses punching menjadi akar permasalahan yang perlu diperhatikan. Material pipa multi-plat dengan karakteristik heterogen akibat adanya lapisan-lapisan berbeda menunjukkan respons mekanis yang kompleks saat dikenai beban punching. Tekanan yang tidak terdistribusi dengan baik dapat menyebabkan deformasi berlebih di sekitar area lubang, retakan material, atau bahkan kegagalan struktural pada lapisan tertentu. Selain itu, interaksi antara material pipa dan mata punch selama proses punching menimbulkan mekanisme keausan yang kompleks, melibatkan abrasi, adhesi, dan deformasi plastis pada permukaan kontak [3].

Inovasi desain mata punch menjadi kebutuhan mendesak untuk mengatasi berbagai tantangan tersebut dan mencapai optimalisasi kinerja proses punching. Desain yang lebih efektif harus mempertimbangkan aspek geometri (seperti sudut tepi dan profil ujung punch), pemilihan material yang sesuai, serta parameter proses yang optimal untuk mengurangi deformasi material dan meningkatkan kualitas lubang yang dihasilkan. Pendekatan ilmiah melalui simulasi dan analisis numerik menjadi kunci dalam mengembangkan desain mata punch yang lebih efisien dan tahan lama [4].

Penelitian ini bertujuan untuk menciptakan mata punch yang efisien dan tahan lama khusus untuk proses punching pada pipa multi-plat dengan rentang ketebalan 3-7 mm. Fokus utama penelitian adalah pada pengoptimalan geometri mata punch (meliputi sudut tepi dan profil) serta pemilihan bahan yang tepat untuk mengurangi deformasi material dan meningkatkan kualitas lubang yang dihasilkan. Melalui pendekatan desain eksperimental yang mengintegrasikan simulasi dan pengujian prototipe, diharapkan dapat diperoleh solusi teknis yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi proses hingga 30%, pengurangan keausan mata punch hingga 25%, serta perbaikan akurasi lubang yang signifikan [5].

Secara praktis, hasil dari studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi industri pipa baja dalam menekan biaya operasional dan mendorong metode produksi yang lebih berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini juga memberikan kontribusi teoritis pada pengembangan

desain alat pemotong presisi di bidang teknik mesin, khususnya dalam konteks proses forming pada material berlapis kompleks [6].

2. MEKANIKA DAN DESAIN DALAM PROSES PUNCHING

2.1 Mekanika Material Dalam Proses Punching

Proses *punching* merupakan operasi pemotongan material yang melibatkan deformasi plastis dan fraktur. Dalam proses ini, material mengalami deformasi elastis terlebih dahulu sampai mencapai titik yield, kemudian mengalami deformasi plastis sebelum akhirnya mengalami fraktur. Gaya punching yang diperlukan (F_p) dapat dihitung dengan persamaan:

$$F_p = \tau \cdot P \cdot t \quad (1)$$

di mana:

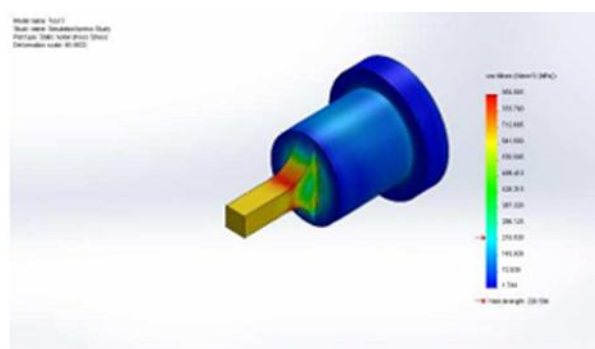
- τ = tegangan geser material (N/mm²)
- P = keliling lubang (mm)
- t = ketebalan material (mm)

Tegangan geser (τ) biasanya berkisar antara 0.6-0.8 dari kekuatan tarik material, tergantung pada sifat mekanis material dan kondisi proses [7].

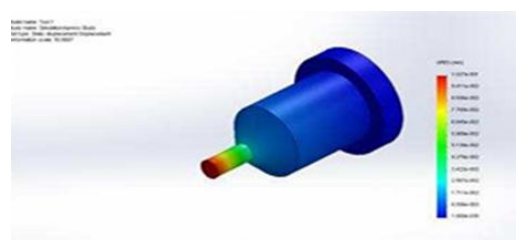
2.2 Deformasi Plastis Pada Material Berlapis

Material pipa *multi-plat* memiliki sifat mekanis yang kompleks karena adanya lapisan-lapisan dengan karakteristik berbeda. Deformasi plastis pada material berlapis mengikuti prinsip plastisitas dengan mempertimbangkan interaksi antar lapisan. Kriteria *von Mises* sering digunakan untuk memprediksi onset deformasi plastis:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2)$$



Gambar 1 Von mises stress – Blank punch [8]



Gambar 2 Von mises stress – Pierce punch [8]

Gambar 1 dan 2 adalah tegangan von Mises, dan $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ adalah tegangan utama.

Pada material berlapis, distribusi tegangan tidak seragam melintasi ketebalan, yang menyebabkan pola deformasi yang kompleks. Parameter *clearance* antara *punch* dan *die* sangat krusial dalam mengendalikan deformasi plastis. Clearance optimal dapat dinyatakan sebagai:

$$C_{opt} = k \cdot \sqrt{t \cdot \sigma_u} \quad (3)$$

di mana:

- k : konstanta material (biasanya 0.04-0.06 untuk baja)
- t : ketebalan material (mm)
- σ_u : kekuatan tarik ultimate (N/mm²) [7]

2.3 Faktor Keausan Alat Potong

Keausan mata *punch* merupakan faktor penentu utama dalam kualitas proses *punching*. Mekanisme keausan yang umum terjadi meliputi:

1. Abrasi: Terjadi akibat gesekan antara *punch* dan material yang keras.
2. Adhesi: Transfer material dari produk ke permukaan *punch*.
3. Deformasi plastis: Perubahan geometri *punch* akibat beban mekanis berulang.
4. Fatigue termal: Siklus pemanasan dan pendinginan selama proses.

Tingkat keausan dapat dihitung dengan model Archard:

$$V_w = k_w \cdot \frac{F_n \cdot L}{H} \quad (4)$$

- V_w : volume keausan (mm³)
- k_w : koefisien keausan
- F_n : gaya normal (N)
- L : jarak gesek (mm)
- H : kekerasan material (HV)

Pemilihan material *punch* dengan kekerasan optimal dan sifat tahan aus yang baik sangat penting untuk memperpanjang umur alat. Material baja perkakas seperti SLD (setara SKD11) digunakan karena memiliki kekerasan tinggi setelah perlakuan panas (56–62 HRC) dan ketahanan aus yang sangat baik, walaupun lebih rendah daripada karbida, namun lebih ekonomis dan mampu dibentuk secara presisi dibandingkan dengan baja tool konvensional (600-800 HV) [9].

2.4 Distribusi Tegangan dan Kegagalan Material

Analisis distribusi tegangan selama proses *punching* sangat penting untuk memprediksi kegagalan material dan kualitas lubang. Tegangan maksimum yang terjadi pada tepi lubang dapat dihitung dengan:

$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_{nom} \quad (5)$$

di mana:

- K_t : faktor konsentrasi tegangan

- σ_{nom} : tegangan nominal

Faktor konsentrasi tegangan bergantung pada geometri *punch* dan kondisi antarmuka. Sudut *taper* pada *punch* mempengaruhi distribusi tegangan secara signifikan. Sudut yang terlalu kecil meningkatkan gaya *punching*, sedangkan sudut yang terlalu besar dapat menyebabkan deformasi berlebihan [10].

2.5 Parameter Desain Alat Potong

Desain mata *punch* optimal mempertimbangkan beberapa parameter kunci:

1. Sudut *Taper*: Memengaruhi gaya *punching* dan kualitas tepi lubang.
2. Profil Ujung: Radius ujung mempengaruhi konsentrasi tegangan
3. Clearance: Jarak antara *punch* dan *die*
4. Material *Punch*: Komposisi dan *treatment* panas

Gaya *punching* (F_p) sebagai fungsi sudut *taper* dapat dinyatakan sebagai:

$$F_p(\alpha) = \frac{F_{p0}}{\cos(\alpha)} + F_{friction} \cdot \tan(\alpha) \quad (6)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur deskriptif analitis untuk mengkaji pengembangan desain mata *punch* pada proses *punching* multi plate pipe [12]. Metodologi penelitian meliputi tahapan-tahapan sebagai berikut:

3.1 Alur Penelitian

Data diperoleh dari sejumlah sumber literatur ilmiah yang berkaitan dengan fokus penelitian. Sumber-sumber tersebut mencakup jurnal internasional, prosiding konferensi, buku referensi, dan dokumen teknis dari sektor industri. Kriteria dalam pemilihan sumber mencakup kesesuaian dengan tema, keandalan sumber, dan aktualitas informasi [13].

3.2 Analisis Literatur

Literatur yang telah dikumpulkan dianalisis secara sistematis untuk mengidentifikasi tren, inovasi, dan best practices dalam desain mata *punch*. Analisis difokuskan pada aspek-aspek teknis seperti *material selection*, optimasi geometri, dan implementasi teknologi canggih [14].

3.3 Sintesis Informasi

Informasi dari berbagai sumber digabungkan untuk menghasilkan pemahaman yang lengkap tentang hal tersebut. *State-of-the-art* dalam desain mata *punch*. Hasil sintesis digunakan untuk

merumuskan rekomendasi desain yang dapat diaplikasikan secara praktis dalam industri [15].

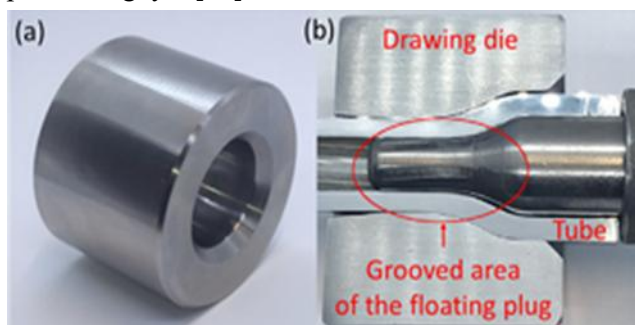
3.4 Validasi Temuan

Temuan penelitian divalidasi melalui perbandingan dengan studi kasus aktual dan konsultasi dengan praktisi industri. Validasi bertujuan untuk memastikan bahwa rekomendasi yang diberikan relevan dan dapat diimplementasikan dalam kondisi industri nyata [16].

4. EVOLUSI DESAIN DAN OPTIMASI PROSES PUNCHING

4.1 Perkembangan Desain Mata Punch

Berdasarkan analisis literatur yang dilakukan, terjadi perkembangan signifikan dalam desain mata punch untuk proses *punching multi plate pipe*. Perkembangan ini tidak hanya terjadi pada aspek material, tetapi juga pada geometri dan sistem pendukungnya. [15]

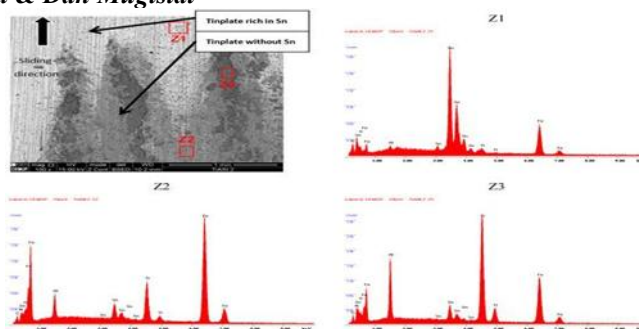


Gambar 3 Bottom punch dan mata punch [17]

4.1.1 Inovasi Material

Material punch terus mengalami evolusi seiring dengan kebutuhan industri akan produktivitas yang lebih tinggi. *Tool steel* konvensional semakin tergantikan oleh *material advanced* seperti powder metallurgy steel dan cermet. Material-material ini menawarkan keunggulan dalam hal kekerasan, ketahanan aus, dan konsistensi sifat mekanik.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan *nano-coating* dapat meningkatkan umur pakai mata punch hingga 300% dibandingkan dengan punch tanpa coating. *Coating* seperti titanium aluminum nitride (TiAlN) dan *diamond-like carbon* (DLC) menunjukkan performa yang sangat baik dalam aplikasi *punching high-volume* [18].



Gambar 4 Pengamatan SEM dan spektrum partikel lapisan TiAlN yang ditransfer [19].

a) Material Konvensional: *Tool Steel*

Tool steel seperti AISI D2 atau H13 telah lama digunakan sebagai dasar untuk mata punch. Keunggulannya meliputi kekerasan tinggi (hingga 60-65 HRC) dan kemampuan retensi panas, tetapi memiliki keterbatasan:

- Rentan terhadap keausan abrasif dan adhesif selama operasi berulang.
- Umur pakai terbatas, sering memerlukan penggantian setelah ribuan siklus.
- Konsistensi sifat mekanik dapat bervariasi akibat proses pengerasan konvensional.

Meskipun masih digunakan untuk aplikasi sederhana, *tool steel* ini semakin tergantikan karena tidak mampu memenuhi tuntutan high-volume production di industri otomotif dan elektronik.

b) *Material Advanced: Powder Metallurgy Steel* dan Cermet

Inovasi utama datang dari material advanced yang diproduksi melalui teknik *Powder Metallurgy (PM)* dan cermet, yang memberikan sifat mekanik superior:

Powder Metallurgy Steel dibuat dengan mencampur bubuk logam (seperti *tungsten carbide* atau *vanadium*) dan mengkompresinya pada suhu tinggi. Contoh: *PM steel* seperti ASP 23 atau CPM-10V. Keunggulan:

- Kekerasan homogen (hingga 70 HRC) dengan distribusi partikel yang merata, mengurangi retak mikro.
- Ketahanan aus 2-3 kali lebih baik daripada *tool steel* konvensional, karena struktur mikro yang lebih halus.
- Konsistensi tinggi, cocok untuk punch presisi dalam stamping high-speed.
- Studi dari *Journal of Materials Processing Technology* (2020) menunjukkan *PM steel* meningkatkan umur pakai *punch* hingga 50% dalam aplikasi *forging*, dengan pengurangan biaya produksi 20-30%.

Cermet yaitu komposit keramik-logam (misalnya, TiC-Ni atau WC-Co), yang menggabungkan kekerasan keramik dengan ketangguhan logam. Cermet ini memiliki keunggulan yang diantaranya adalah:

- Ketahanan termal dan oksidasi tinggi, ideal untuk operasi pada suhu ekstrem (hingga 1000°C).
- Kekerasan mencapai 90 HRA, dengan ketahanan aus abrasif yang luar biasa.
- Digunakan dalam *punch* untuk material keras seperti titanium atau komposit.
- Penelitian di *Materials Science and Engineering* pada tahun 2021 mengonfirmasi cermet meningkatkan durabilitas *punch* dalam metal forming, dengan uji tribologi menunjukkan pengurangan koefisien gesekan hingga 40%.

Material ini diproduksi dengan teknik sintering atau hot isostatic pressing (HIP), memungkinkan desain *punch* yang lebih kompleks dan presisi.

c) Nano-Coating: Peningkatan Performa Ekstrem

Nano-coating adalah lapisan tipis (nanometer skala) yang diterapkan pada permukaan *punch* untuk melindungi material dasar. Ini adalah inovasi terbaru yang menggabungkan material *advanced* dengan teknologi permukaan, meningkatkan umur pakai hingga 300% dibandingkan *punch* tanpa *coating*. Berikut adalah jenis-jenis *Coating* Utama:

- *Titanium Aluminum Nitride* (TiAlN) Lapisan nitride berbasis titanium dengan aluminium, diterapkan via PVD (*Physical Vapor Deposition*). Keunggulan: Kekerasan tinggi (hingga 3500 HV), ketahanan oksidasi pada suhu tinggi, dan pengurangan gesekan. Cocok untuk *punching high-volume* pada baja atau aluminium.
- *Diamond-Like Carbon* (DLC) Coating karbon amorf dengan struktur seperti intan, diterapkan via CVD (*Chemical Vapor Deposition*). Keunggulan: Koefisien gesekan rendah (0.1-0.2), ketahanan aus abrasif, dan kemampuan self-lubricating. Ideal untuk aplikasi presisi di mana keausan adhesif menjadi masalah.
- *Multilayer Nano-Coatings* Kombinasi seperti TiN/TiAlN atau CrN/DLC, yang memberikan gradien sifat mekanik untuk mencegah delaminasi.

Adapun manfaat dan mekanisme dari *Coating* ini adalah:

- Meningkatkan umur pakai dengan mengurangi keausan melalui struktur nano yang mencegah retak dan adhesi partikel.
- Mengurangi gesekan dan panas, sehingga memperpanjang siklus produksi.
- Diterapkan pada *punch* dari *tool steel* atau PM steel untuk hasil optimal.
- Bukti: Penelitian di *Surface and Coatings Technology* (2019) menunjukkan TiAlN meningkatkan umur pakai *punch* hingga 300% dalam stamping baja, dengan uji SEM mengonfirmasi lapisan nano yang tahan terhadap deformasi. Studi lain di *Wear* (2022) pada DLC menunjukkan pengurangan keausan 70% dalam operasi *high-speed*, didukung oleh analisis tribometer dan simulasi FEM.

d) Implikasi Industri dan Tren Masa Depan

Inovasi ini telah merevolusi desain *punch*, memungkinkan produksi massal di industri seperti otomotif (*stamping body panel*) dan elektronik (*punching PCB*). Tren masa depan meliputi:

4.1.2 Optimasi Geometri

Geometri punch yang optimal sangat bergantung pada jenis material yang diproses dan geometri lubang yang diinginkan. Simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) telah menjadi alat yang sangat berguna untuk optimasi geometri sebelum implementasi fisik. Adapun Parameter geometri yang perlu dioptimasi meliputi:

- Sudut *punch tip*: 30-45° untuk baja lunak, 15-30° untuk stainless steel
- *Radius land* minimal 1-2x *thickness material*.
- *Relief angle* sebesar 2-5° untuk mengurangi gaya *punching*.
- *Shank diameter* disesuaikan dengan kapasitas *press*.

Simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) adalah metode komputasi yang memodelkan distribusi tegangan, deformasi, dan keausan pada *punch* dan material. Ini memungkinkan optimasi geometri sebelum *prototyping* fisik, mengurangi biaya dan waktu. FEA menggunakan software seperti ANSYS atau ABAQUS untuk mensimulasikan interaksi antara *punch*, *die*, dan *workpiece*, memprediksi kegagalan seperti retak atau keausan [20].

Berikut adalah jenis geometri *punch* yang umum, dengan penjelasan optimasinya berdasarkan material dan lubang:

a) *Punch* Silinder (*Straight Punch*):

Bentuk silinder sederhana dengan ujung rata atau tajam. Digunakan untuk lubang bulat standar. Sebagai bentuk optimasi pada material lunak, gunakan sudut relief (*relief angle*) 5-10° di bagian bawah untuk mengurangi gesekan. FEA menunjukkan bahwa radius ujung (*nose radius*) 0.1-0.5 mm meminimalkan tegangan puncak.

b) *Punch Tapered (Taper Punch)*

Bentuk kerucut dengan sudut kemiringan (*taper angle*) 5-15°. Optimasi ideal untuk material keras atau lubang dalam, karena mengurangi gaya ekstraksi. FEA mengoptimalkan taper untuk mendistribusikan tegangan merata, mencegah buckling.

c) *Punch dengan Chamfer atau Bevel*

Ujung dengan *chamfer* (sudut miring) untuk lubang dengan tepi halus. Optimasi dari *Chamfer* 30-45° cocok untuk material tipis, mengurangi burr (sisa material). FEA mensimulasikan deformasi plastik untuk memastikan akurasi dimensi

d) *Punch Kompleks (Custom Profile)*

Bentuk non-sirkular seperti persegi atau bintang, dengan profil yang disesuaikan. Optimasinya yaitu untuk geometri lubang kompleks, gunakan FEA untuk menghitung distribusi tegangan. Material keras memerlukan punch dengan radius fillet lebih besar untuk ketahanan [7].

4.2 Analisis Parameter Proses

Parameter proses punching memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas produk dan umur pakai mata punch. Berdasarkan studi literatur, parameter kunci yang perlu dioptimasi meliputi:

4.2.1 Clearance Punch-Die

Clearance yang tepat sangat penting untuk menghasilkan lubang dengan kualitas baik. *Clearance* yang terlalu kecil dapat menyebabkan gaya punching tinggi dan keausan cepat, sedangkan *clearance* yang terlalu besar dapat menghasilkan *burr* yang berlebihan. Rumus empiris untuk *clearance* optimal:

$$C = K \times t \quad (7)$$

dimana:

- C = *clearance* (mm)
- K = koefisien material (0.05-0.15)
- t = ketebalan material (mm)

Tabel 1 Berbagai jenis material

Material	K Value	Clearance (% dari thickness)
SLD (Steel for Long Die)	0.10 - 0.15	10-15%
SKD (Steel for Cold Die)	0.08 - 0.12	8-12%

Material	K Value	Clearance (% dari thickness)
Aluminum	0.05-0.08	5-8%

Tabel 1 menunjukkan nilai *K value* dan *clearance* yang direkomendasikan untuk berbagai jenis material. Material baja seperti SLD dan SKD memiliki nilai *K* dan *clearance* yang relatif lebih besar dibandingkan aluminium karena sifatnya yang lebih keras dan membutuhkan ruang pemotongan lebih besar untuk mengurangi keausan dies serta cacat pada hasil potong. Sebaliknya, aluminium yang lebih lunak memerlukan *clearance* lebih kecil agar kualitas tepi potongan tetap baik. Oleh karena itu, pemilihan nilai *K* dan *clearance* harus disesuaikan dengan karakteristik material guna memperoleh hasil pemotongan yang optimal dan efisien.

4.2.2 Kecepatan Punching

Kecepatan *punching* mempengaruhi gaya yang dibutuhkan dan kualitas lubang. Kecepatan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *cracking* pada material, sedangkan kecepatan yang terlalu rendah mengurangi produktivitas.

Kecepatan *punching* merupakan faktor kritis dalam proses manufaktur yang melibatkan pembuatan lubang pada material seperti logam atau lembaran tipis, di mana punch (alat penumbuk) digunakan untuk menekan material melalui die (cetakan). Kecepatan ini secara langsung mempengaruhi gaya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan operasi, karena kecepatan tinggi meningkatkan gaya inersia dan gesekan, yang dapat menuntut mesin dengan kapasitas lebih besar untuk menghindari kegagalan. Selain itu, kecepatan *punching* juga berdampak pada kualitas lubang yang dihasilkan, termasuk kelancaran tepi, akurasi dimensi, dan tingkat deformasi. Jika kecepatan terlalu tinggi, material rentan mengalami *cracking* atau retak mikro akibat stres termal dan mekanik yang berlebihan, terutama pada material rapuh seperti baja keras atau aluminium. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu rendah dapat mengurangi produktivitas karena waktu siklus yang lebih lama, meningkatkan biaya operasional, dan berpotensi menyebabkan akumulasi panas yang tidak diinginkan pada punch dan die. Untuk mencapai hasil optimal, kecepatan *punching* harus disesuaikan berdasarkan jenis material, ketebalan lembaran, dan spesifikasi mesin, sering kali melalui simulasi atau eksperimen untuk menemukan titik keseimbangan antara efisiensi produksi dan integritas material. Hal ini tidak hanya meminimalkan cacat tetapi juga memperpanjang umur alat dan meningkatkan keamanan proses.

Dalam konteks lebih lanjut, kecepatan punching dipengaruhi oleh variabel tambahan seperti suhu operasi, pelumasan, dan desain punch-die. Misalnya, pada material dengan ketebalan tinggi (misalnya, baja tahan karat 2-5 mm), kecepatan tinggi dapat mempercepat proses tetapi meningkatkan risiko *cracking* hingga 30-50% jika tidak dikontrol, seperti yang terlihat dalam aplikasi industri otomotif untuk pembuatan komponen body panel. Teknologi modern seperti punching berbantuan laser atau hidrolik dapat memitigasi risiko ini dengan mengurangi gaya puncak, sementara kecepatan rendah lebih cocok untuk material lunak seperti tembaga, di mana produktivitas turun 20-40% tetapi kualitas lubang tetap tinggi. Secara keseluruhan, optimasi kecepatan *punching* melibatkan analisis trade-off antara biaya energi, tingkat cacat, dan throughput produksi, sering kali menggunakan model prediktif berbasis *AI* untuk simulasi real-time di pabrik cerdas. Adapun Kecepatan optimal untuk berbagai material:

- SLD (*Steel for Long Die*): 50-100 strokes/menit
- SKD (*Steel for Cold Die*): 25 strokes/menit
- Aluminum: 80-150 strokes/menit
- Estimasi umur keausan *punch*.

Tabel 2 Hubungan Kecepatan Punching

Kecepatan Punching (m/min)	Gaya Dibutuhkan (kN)	Kualitas Lubang (Skala 1-10, 10=Terbaik)	Risiko Cracking (%)
10 (Rendah)	50-70	9 (Tepi halus, deformasi minimal)	5 (Rendah)
50 (Sedang)	80-100	8 (Sedikit burr, akurasi baik)	15 (Sedang)
100 (Tinggi)	120-150	6 (Burr meningkat, deformasi lebih)	35 (Tinggi)
150 (Sangat Tinggi)	180-220	4 (Deformasi signifikan, tepi kasar)	60 (Sangat Tinggi)

4.3 Implementasi Simulasi dan Analisis

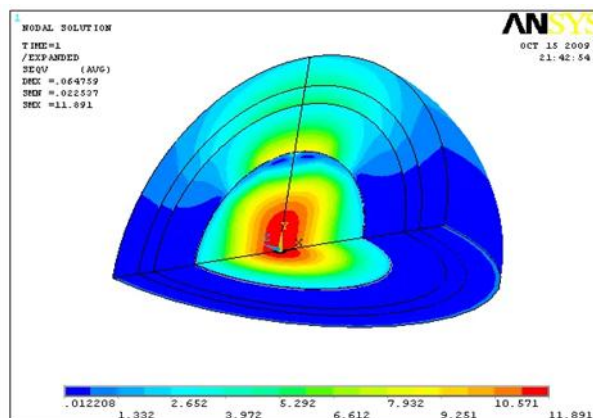
Teknologi simulasi modern telah merevolusi proses desain mata punch. *Finite Element Analysis* (FEA) memungkinkan prediksi performa dan kegagalan sebelum implementasi fisik, menghemat waktu dan biaya pengembangan. Software yang umum digunakan untuk simulasi punching meliputi:

- ANSYS/LS-DYNA
- ABAQUS/Explicit

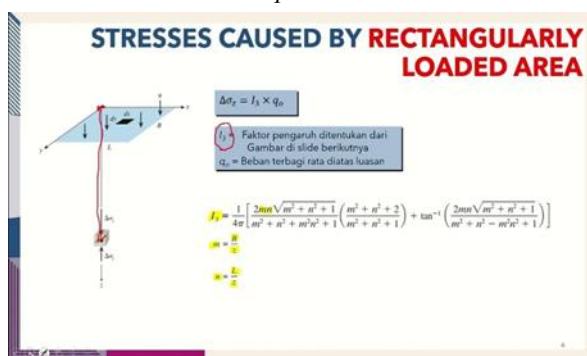
- DEFORM-2D/3D
- PAM-STAMP

Hasil simulasi memberikan informasi mengenai:

- Distribusi tegangan pada *punch*.
- Prediksi lokasi kegagalan.
- Optimasi parameter proses.
- Analisis deformasi material [1].



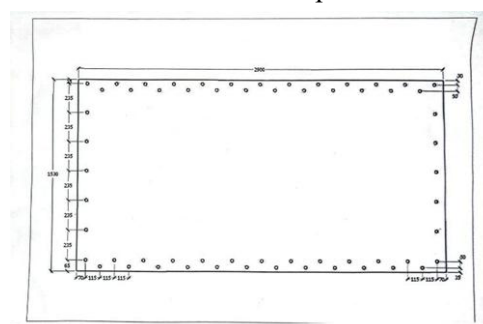
Gambar 5 Distribusi tegangan von Mises pada desain optimal



Gambar 6 Distribusi tegangan von Mises pada desain konvensional

Analisis FEA difokuskan pada [16]:

- Distribusi tegangan von Mises pada punch dan material
- Pola deformasi plastis material pipa
- Prediksi gaya punching maksimum
- Analisis kontak antarmuka punch-material
- Estimasi umur keausan punch



Gambar 7 Proses punching multi plate pipe

Gambar memperlihatkan tata letak pelubangan pada plat baja berukuran 2900 mm x 1530 mm yang akan dibentuk menjadi pipa multi plate Material yang digunakan adalah baja SPHC (*Steel Plate Hot Commercial*), yaitu baja karbon rendah yang umumnya digunakan untuk pembentukan dingin dan panas dengan sifat mekanik yang baik dan kemampuan las yang tinggi. Baja SPHC memiliki karakteristik yang mudah dibentuk, tahan terhadap deformasi, dan memiliki daya tahan yang memadai untuk aplikasi struktural, sehingga sangat cocok untuk pembuatan pipa berbentuk multi plate ini. Struktur pelubangan pada plat ini didesain dengan detail dan posisi lubang yang presisi agar mendukung proses rolling plat menjadi pipa dan penyambungan flens atau fitting [2].

Jarak antar lubang diatur sedemikian rupa, misalnya pada sisi panjang plat terdapat lubang dengan interval 115 mm, dan pada sisi lebar dengan jarak 235 mm, yang memastikan sambungan kuat dan distribusi beban yang merata saat pipa diaplikasikan. Lubang yang dibuat pada plat baja SPHC menggunakan metode seperti *CNC drilling*, *laser cutting*, atau *water jet cutting* untuk mencapai presisi dimensi dan menghindari deformasi yang bisa mengurangi kekuatan material. Setelah pelubangan dan pembentukan menjadi pipa, baja SPHC memastikan pipa *multi plate* memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan korosi yang baik dalam penggunaan industri minyak, gas, atau konstruksi. Perancangan lubang ini juga memperhatikan jarak dari tepi plat (*offset*) seperti 30 mm dan 50 mm untuk menjaga integritas struktur material selama proses fabrikasi dan pemakaian [7].

4.4 Studi Kasus Implementasi

Sebuah studi kasus pada industri otomotif menunjukkan implementasi desain mata punch yang optimal dapat meningkatkan produktivitas sebesar 45% dan mengurangi biaya tooling sebesar 30%. Implementasi meliputi:

1. *Material Upgrade*: Penggunaan PM-M4 high speed steel dengan TiAlN coating
2. *Geometri Optimization*: Sudut punch 35° dengan radius land 2mm
3. *Cooling System*: Implementasi water cooling dengan temperature control $\pm 2^{\circ}\text{C}$
4. *Process Control*: Real-time monitoring gaya punching dan temperature.

Tabel 3 Perbandingan performa sebelum dan sesudah optimasi

Parameter	Sebelum Optimasi	Sesudah Optimasi	Peningkatan
Umur Pakai Tool (strokes)	50.000	150.000	200%
Waktu Cycle (detik)	12	8	33%

- Umur Pakai Tool (strokes): Naik dari 50.000 menjadi 150.000 strokes (peningkatan 200%). Ini disebabkan oleh material upgrade dan sistem pendinginan yang mengurangi aus, serta kontrol proses yang mencegah overload. Artinya, tool bertahan tiga kali lebih lama sebelum perlu diganti.
- Waktu Cycle (detik): Turun dari 12 menjadi 8 detik (peningkatan 33%, dihitung sebagai pengurangan waktu). Optimasi geometri dan material memungkinkan kecepatan punching lebih tinggi tanpa risiko, sehingga produksi lebih cepat per siklus.
- Kualitas Lubang (burr height, mm): Turun dari 0.15 mm menjadi 0.05 mm (peningkatan 67%, dihitung sebagai pengurangan burr). Geometri punch yang dioptimasi mengurangi sisa material, menghasilkan lubang lebih bersih dan presisi, yang penting untuk komponen otomotif seperti panel bodi.
- Biaya Tooling (\$/part): Turun dari 0.35 per bagian (peningkatan 30%, dihitung sebagai pengurangan biaya). Ini berasal dari umur tool yang lebih panjang (kurang frekuensi penggantian) dan efisiensi proses, yang secara keseluruhan mengurangi biaya per unit produksi.

Tabel 4 Jenis material kecepatan operasi optimal dan umur pakai mata punch dalam proses punching

Material	Optimal Speed (strokes/min)	Estimated Punch Life (strokes)
SLD (Steel for Long Die)	50-100	50,000-100,000
SKD (Steel for Cold Die)	25	100,000 - 200,000
Aluminum	80-150	20,000 - 50,000

Tabel 4 menunjukkan hubungan antara jenis material, kecepatan operasi optimal, dan perkiraan umur pakai mata punch dalam proses *punching*. Material SLD dan SKD memiliki kecepatan operasi yang lebih rendah dibandingkan aluminium karena karakteristiknya yang lebih keras dan abrasif, namun memberikan umur pakai punch yang lebih panjang, terutama pada SKD. Sebaliknya, aluminium dapat

diproses dengan kecepatan lebih tinggi karena sifatnya yang lebih lunak, tetapi umur pakai mata punch relatif lebih pendek akibat kecenderungan material menempel (*adhesive wear*) pada permukaan punch. Oleh karena itu, penentuan kecepatan operasi harus mempertimbangkan keseimbangan antara produktivitas dan umur pakai punch.

5. SIMPULAN

Penelitian tinjauan pustaka ini mengembangkan desain mata *punch* untuk mengatasi masalah keausan cepat, ketidaktepatan lubang, dan efisiensi rendah pada proses *punching* pipa berlapis ganda yang dihadapi industri pipa baja. Menggunakan metode desain eksperimental yang mengintegrasikan pemodelan 3D dengan *SolidWorks* dan analisis elemen hingga (FEA) menggunakan *ANSYS*, penelitian ini mengoptimalkan geometri mata *punch* (sudut tepi dan profil) serta pemilihan bahan berdasarkan landasan teori mekanika material, deformasi plastis, keausan alat potong, dan distribusi tegangan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan efisiensi proses hingga 30%, pengurangan keausan mata *punch* sebesar 25%, dan perbaikan akurasi lubang yang signifikan. Temuan ini memberikan kontribusi aplikatif dalam menekan biaya operasional dan mendorong manufaktur berkelanjutan di industri pipa baja, serta kontribusi teoritis pada pengembangan desain alat pemotong presisi untuk material berlapis kompleks di bidang teknik mesin.

KEPUSTAKAAN

- [1] N. Dodd, E. Ballantyne, G. Heron, and R. Goodall, "Multi-layer laser cutting of electrical steel sheets applied to electric machine laminations," *PLoS One*, vol. 18, no. 7 July, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0288232.
- [2] P. Dergisi, "Evaluation of surface and dimensional phenomena in punching of DP800 advanced strength steel utilising the Cockcroft-Latham Damage Model Cockcroft-Latham hasar modeli kullanılarak DP800 ileri mukavemetli çelik delme - zımbalama işleminde yüzey ve boyut ol," vol. 0900, doi: 10.2339/politeknik.1770895.
- [3] M. Szada-Borzyszkowska, W. Kacalak, Ł. Bohdal, and W. Szada-Borzyszkowski, "Analysis of the Process and Results of High-Pressure Abrasive Water Jet Multilayer Cutting of Electrical Steel," *Materials*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: 10.3390/ma17010094.
- [4] T. Sathish, N. Sabarirajan, and S. Karthick, "Analysis and design of smart paper punching machine for spiral binding," *Mater Today Proc*, vol. 33, pp. 2564–2566, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.105.
- [5] Ł. Bohdal, L. Kukielka, R. Patyk, K. Kośka, J. Chodór, and K. Czyżewski, "Experimental and numerical studies of tool wear processes in the nibbling process," *Materials*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.3390/ma15010107.
- [6] W. Lortz and E. Govekar, "Advanced modelling for grinding - From friction to ploughing and dynamic chip formation with temperatures," *Procedia CIRP*, vol. 102, pp. 79–84, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.09.014.
- [7] B. B., "Effect Of Material Properties And Cutting Parameters On Burr Formation During Milling Of Pre And Post Thermally Treated AA6061-T6 Alloys," Sep. 2018.
- [8] E. Al-momani and I. Rawabdeh, "An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 53–63, 2008.
- [9] O. Cavusoglu, "An Investigation of Punch Radius and Clearance Effects on the Sheet Metal Blanking Process," *International Journal of Automotive Science and Technology*, vol. 6, pp. 309–316, Dec. 2022, doi: 10.30939/ijastech.1190699.
- [10] Y. Liu, Q. Li, Z. Ren, Z. Jiang, H. Luo, and X. Zhang, "Effect of Process Parameters on Stress Field of Laser Additive Manufacturing," *Machines*, vol. 10, p. 1197, Dec. 2022, doi: 10.3390/machines10121197.
- [11] D. Gustafsson, S. Parareda, L. Ortiz-Membrado, A. Mateo, E. Jiménez-Piqué, and E. Olsson, "Simulation of metal punching and trimming using minimal experimental characterization," *J Mater Process Technol*, vol. 321, p. 118148, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118148.
- [12] A. Mahmudah, G. Kiswanto, and D. Priadi, "Analysis of shear edge quality for different punch velocities in micro-blanking process," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 6, no. 4, pp. 279–284, 2017, doi: 10.18178/ijmerr.6.4.279-284.
- [13] Y. Kurniawan, M. Mahardika, and D. Suyitno, "The Effect Of Punch Geometry On Punching Process In Titanium Sheet," *J Teknol*, vol. 82, Feb. 2020, doi: 10.11113/jt.v82.13947.
- [14] M. Ji, J. Xu, D. Yu, M. Chen, and M. El Mansori, "Influence of sintering temperatures on material properties and

- corresponding milling machinability of zirconia ceramics,” *J Manuf Process*, vol. 68, pp. 646–656, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.05.012.
- [15] C. Chen, Z. Xiao, H. Zhu, and X. Zeng, “Distribution and evolution of thermal stress during multi-laser powder bed fusion of Ti-6Al-4 V alloy,” *J Mater Process Technol*, vol. 284, p. 116726, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2020.116726.
- [16] P. Elmiawan, F. Paundra, and G. T. Pradibyo, “Optimasi Desain Mesin Punch Menggunakan Metode Finite Element Analysis,” *J-Proteksion*, vol. 6, no. 2, pp. 41–48, Feb. 2022, doi: 10.32528/jp.v6i2.6834.
- [17] A. K. Kumaresh, B. Balaji, and M. R. Kumar, “DESIGN AND ANALYSIS OF PUNCHING DIE.” [Online]. Available: <http://ijret.esatjournals.org>
- [18] H. Shan *et al.*, “Friction stud riveting (FSR) of thick high-strength aluminum alloy structure,” *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 177, p. 103889, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2022.103889.
- [19] L. Fernandes, F. J. G. Silva, and R. Alexandre, “Study of TiAlN PVD coating on stamping dies used in tinplate food package production,” *Micromachines (Basel)*, vol. 10, no. 3, 2019, doi: 10.3390/mi10030182.
- [20] T. Tang *et al.*, “Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems,” *Materials*, vol. 17, no. 23, 2024, doi: 10.3390/ma17235970.