

Pengembangan proses manufaktur tempa dingin untuk paku ladam kuda

Ade Bagdja^{1*}, Gatot Santoso¹, Rachmad Hartono¹, Dedi Lazuardi¹, Farid Budi Nurfaraj¹, Adi Muhammad¹, Ahmad Wijaya¹, Muhammad Andre Fadillah¹, Arnold Muhammad Radiansyah¹, Sandi Alfriagi¹, Rahmat Hidayatullah¹, Fajar Ariffalah¹

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan
Jl. Dr. Setiabudhi no 193 Bandung 40153

Email korespondensi: bagdja.ade@unpas.ac.id

Received: 21 February 2025, Reviewed: 25 March 2025, Published: 30 April 2026

<https://doi.org/10.71452/jtmi2112026107>

Abstrak. Peminat cabang olahraga pacuan kuda semakin meningkat di Indonesia. Perlengkapan yang digunakan oleh kuda salah satunya adalah paku ladam kuda. Paku ladam juga digunakan untuk menempelkan ladam pada kuku kuda, seperti sepatu pada manusia. Paku kuda ini masih diimpor. Permasalahan utama adalah teknologi yang dikuasai para Pandai Besi tradisional, sehingga kualitas produk paku ladam kudanya kurang konsisten. Untuk menjawab kebutuhan ini, dirancang rangkaian penelitian untuk mengembangkan proses manufaktur paku ladam kuda tempa dingin yang dapat diimplementasikan oleh para Pandai Besi di Indonesia. Pada penelitian ini dikembangkan satu set peralatan produksi untuk membuat paku ladam kuda yang terdiri dari satu (1) *Drop Hammer* serta enam (6) set pasangan cetakan. Enam (6) set cetakan terdiri dari satu (1) cetakan upsetting, dua (2) cetakan trimming, dan empat (4) cetakan tempa dingin. Material cetakan menggunakan baja S45C serta paku ladam kuda menggunakan kawat timah Pb. Pengujian dilakukan pada 200 spesimen awal untuk proses tempa I, tempa II, dan tempa III, dengan hasil keberhasilan proses tempa sebesar 90%.

Kata kunci: Paku Ladam Kuda, Tempa Dingin, Teknologi Pembentukan.

Abstract. The popularity of horse racing in Indonesia is increasing recently. One accessory needed is horseshoe nails, which are used to attach the horseshoes to the horse's hooves like shoes on humans. These horseshoe nails are still imported. In Indonesia, the blacksmith has technological limitations to produce horseshoe nails because of using traditional ways. Therefore, the quality of the horseshoe nails are relatively low. For this purpose, a series of studies were designed to develop a cold forging manufacturing process for horse nails that can be implemented by Blacksmiths. Specifically in this study, a set of lab's scale production equipment was developed to make horseshoe nails consisting of one (1) Drop Hammer and six (6) sets of mold pairs. Of the six (6) sets of mold pairs, consisting of one (1) upsetting mold, two (2) trimming molds and four (4) cold forging molds. The material for the mold is S45C Steel and for horseshoe nails using Pb lead wire. Testing was carried out on 200 initial specimens for forging processes I, II, and III, resulting in a forging process success rate of 90%.

Keywords: horseshoe nails, Cold Forging, Forming Technology.

PENDAHULUAN

Kuda dalam kesehariannya memerlukan paku ladam. Paku ladam kuda ini menempelkan ladam kuda ke kuku kaki kuda [1-4]. Paku ladam kuda harus mempunyai karakteristik ketahanan yang tinggi untuk menahan berat badan kuda serta tekanan dan gesekan saat kuda berjalan atau berlari melintasi berbagai medan kasar, berbatu, jalanan, padang rumput dengan kelembapan dan kotoran yang ada. Material paku ladam kuda yang sering digunakan adalah baja karbon rendah yang kadang-kadang dilapisi tembaga untuk tujuan antimikroba. Gambar 1 menunjukkan bagian dari paku ladam kuda yang terdiri dari: mahkota (Crown), kepala (Head), badan (Shaft), sudut miring (Bevel), serta kuku (Nail). Ukuran paku ladam kuda disesuaikan dengan ladam serta kuku kuda. D disesuaikan dengan postur kuda, Gambar 2 menunjukkan berbagai variasi ukuran paku ladam kuda menurut standar Eropa [5-6]. Gambar 2 menunjukkan standar ukuran dan bentuk kuku tapal (horseshoe nails) tipe E untuk kuda olahraga, rekreasi, dan kuda pekerja ringan menurut standar Eropa. Setiap paku diberi kode ukuran mulai dari E2 hingga E14, yang menunjukkan variasi panjang dan dimensi paku untuk menyesuaikan ukuran tapal serta ketebalan dinding kuku kuda. Panjang paku meningkat secara bertahap, misalnya dari sekitar 41 mm pada ukuran E2 hingga sekitar 72 mm pada ukuran E14. Bentuk paku

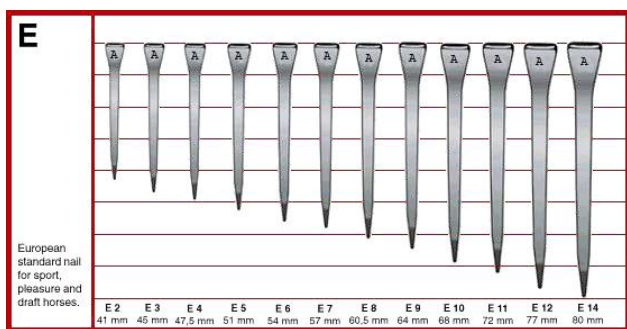
relatif seragam dengan kepala pipih dan batang meruncing ke ujung tajam, namun dimensi batang dan panjangnya berubah sesuai ukuran.



Gambar 1. Bagian Paku Ladam Kuda

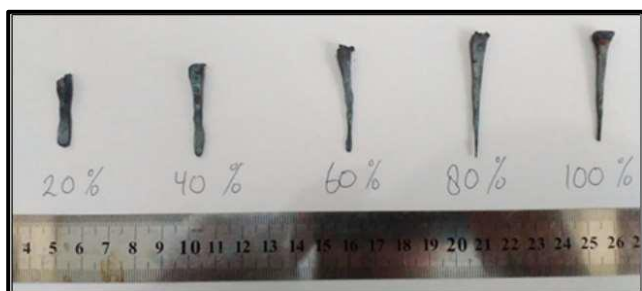
Diagram pada Gambar 2 biasanya digunakan sebagai panduan dalam pemilihan paku tapal yang tepat agar pemasangan tapal aman, kuat, dan sesuai dengan anatomi kuku kuda. Selama proses tempa panas, terjadi deformasi yang berpengaruh pada struktur dan nilai kekerasan. Secara umum, dengan berjalannya proses tempa panas, material

paku kuda mengalami perpanjangan (*elongation*) serta peningkatan kekerasan [11].



Gambar 2. Variasi ukuran Paku Ladam Kuda [2-3]

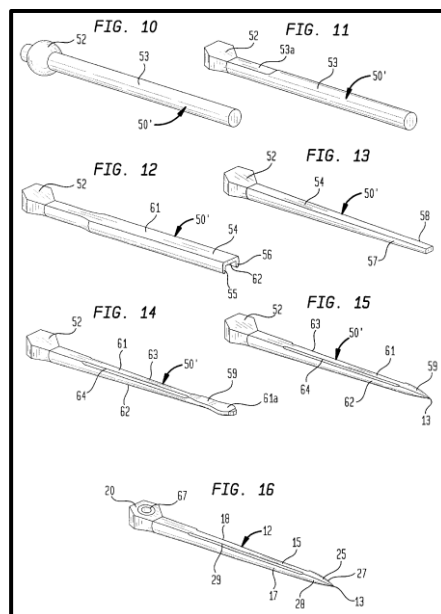
Teknologi manufaktur yang digunakan untuk membuat paku ladam kuda adalah proses penempaan. Saat ini dikenal 2 proses tempa yang digunakan: (1) proses tempa panas dan (2) proses tempa dingin. Pada proses penempaan panas, pembentukan geometri paku ladam kuda bergantung pada aliran material selama proses penempaan [7-10]. Gambar 3 menunjukkan proses aliran material saat pembentukan paku ladam kuda melalui proses penempaan panas.



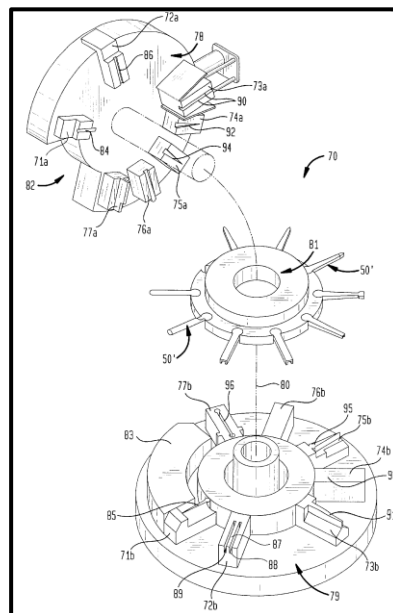
Gambar 3. Tahapan [roses pembentukan paku ladam kuda dengan proses tempa panas [7]

Pada proses pembentukan paku ladam kuda menggunakan proses tempa dingin, tahapan proses pembentukannya merupakan serangkaian proses *Upsetting – Forging – Trimming* [12-14]. Perubahan geometri tidak terjadi secara signifikan pada proses tempa dingin, tetapi lebih banyak bergantung pada proses *trimming*, seperti pada Gambar 4. Proses pembentukan paku ladam kuda terdiri dari: *Fig 10. Upsetting – Fig 11. & Fig 12. Tempa dingin – Fig 13. Trimming – Fig 14. Tempa dingin – Fig 15. Trimming – Fig 16. Marking*. Lebih lanjut, Gambar 5 menunjukkan pasangan cetakan (dies) atas dan bawah dari proses pembentukan paku ladam kuda menggunakan proses dingin [12-14].

Pada penelitian ini, proses tempa yang dipilih adalah tempa dingin. Alasan utama pemilihan proses tempa dingin adalah tidak diperlukannya tungku pemanas yang harus dijaga selama proses pembentukan. Selain melalui proses tempa dingin, para pengrajin besi diharapkan dapat membuat paku ladam kuda dengan kualitas yang lebih baik serta kapasitas produksi yang lebih besar.



Gambar 4. Paten tahapan proses pembentukan Paku Ladam Kuda dengan proses tempa dingin [12-14]



Gambar 5. Pasangan cetakan pembentukan paku ladam kuda dengan proses tempa dingin [12-14]

Keunggulan proses tempa dingin dibandingkan dengan tempa panas adalah akurasi geometri yang lebih tinggi, yang diimbangi dengan kualitas permukaan yang lebih baik [15-16]. Sehingga proses finishing produk paku ladam kuda saat produksi di tempat pengrajin akan menjadi lebih mudah.

METODE PENELITIAN

Proses Pembentukan Tempa Dingin Paku Ladam Kuda

Tahapan proses pembentukan paku ladam kuda dengan proses tempa dingin, seperti pada Gambar 6, terdiri dari:

1. **Upsetting:** proses pembentukan bakalan dari kepala paku ladam kuda,
2. **Tempa Dingin:** proses pembentukan mahkota dan kepala paku ladam tapal kuda. Sampai proses

pembentukan berakhir, bentuk mahkota dan kepala dari paku ladam kuda ini tidak akan diproses kembali,

3. **Tempa Dingin**: proses persiapan pembentukan badan dari paku ladam kuda,
4. **Trimming**: proses pembentukan badan paku ladam kuda. Pembuatan sisi miring dari badan paku ladam kuda dilanjutkan pada proses ke – 5,
5. **Tempa Dingin**: proses persiapan pembentukan kuku / bentuk tajam dari paku ladam kuda,
6. **Trimming**: proses akhir, yaitu pemotongan bentuk tajam dari paku ladam kuda.



Gambar 6. Tahapan proses pembentukan paku ladam kuda proses tempa dingin

Pada proses yang dilakukan di pabrik komersial paku ladam kuda, ada proses terakhir yang dilakukan, yaitu proses **marking** yang merupakan pemberian tanda/logo produsen pada bagian kepala paku ladam kuda. Namun, pada penelitian ini, pemberian marking tidak dilakukan karena dianggap tidak memiliki nilai fungsi dalam proses pembentukan paku ladam kuda.

Rancang Bangun Peralatan Pembentukan Paku Ladam Kuda

Peralatan proses pembentukan paku ladam kuda dengan proses dingin terbagi menjadi dua (2) bagian utama, yaitu:

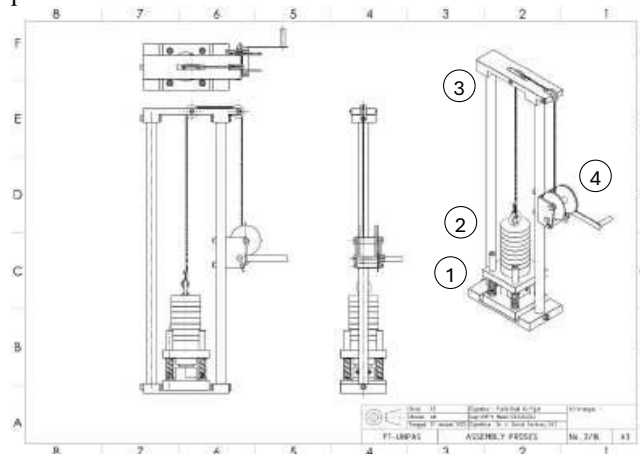
1. *Drop Hammer*: memberikan daya tekan saat proses pembentukan dilakukan,
2. Enam (6) set cetakan: satu (1) *upsetting* – tiga (3) tempa dingin – dua (2) *trimming*.

Drop Hammer

Drop Hammer dirancang dan dibuat dalam skala laboratorium untuk memberikan gaya pembentukan pada cetakan yang dibuat. *Drop Hammer* yang dibuat terdiri dari sub sistem seperti pada Gambar 7:

1. Dudukan Cetakan: dimana nanti cetakan diletakan,
2. Beban Pemberat: pada saat dijatuhkan memberikan gaya tekan pembentukan,
3. Rangka: menopang struktur pemberi beban,
4. Kerekan Beban: yang mengatur titik mana beban dijatuhkan.

Gambar 8 menunjukkan *Drop Hammer* yang dibuat selama penelitian beserta konfigurasi teknisnya. Besar gaya tekan yang diberikan pada cetakan bergantung pada berat beban dan ketinggiannya. Berat beban dapat diatur dengan menyusun beban 2 – 10 kg secara modular. Ketinggian gerak jatuh beban pun diatur antara 10 – 50 cm. Setiap tahapan proses, berat dan ketinggian ini dicoba sampai diperoleh konfigurasi yang tepat yang diperlukan untuk proses pembentukan.



Gambar 7. Rancangan Drop Hammer



| | |
|----------------------|---------------|
| Dimensi (cm) | 80 x 80 x 140 |
| Sub Sistem (Bahan) | |
| Rangka | AISI 304 |
| Lower & Upper Slider | Al 6061 |
| Hammer | AISI 1045 |
| Beban / Hammer | |
| Berat (Kg) | 2 - 10 |
| Tinggi (cm) | 10 - 50 |

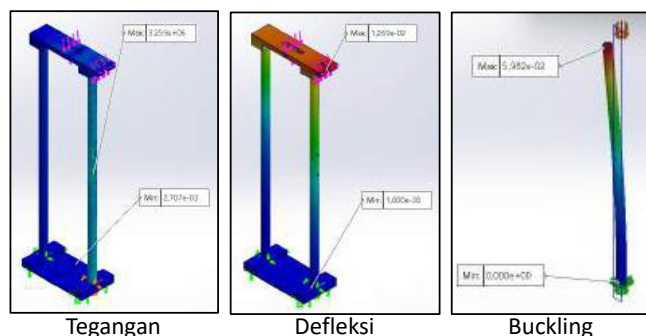
Gambar 8. Drop Hammer yang dibuat saat penelitian

Untuk memastikan kekuatan rancangan Drop Hammer ini, dilakukan analisis metode elemen hingga untuk melihat tegangan – defleksi –buckling terhadap beban kerja yang ada, seperti pada Gambar 9. Tegangan maksimum yang terjadi adalah 3,24 MPa (masih jauh dari tegangan luluh 240 MPa), dan defleksi maksimum di sisi atas sebesar 0,013 mm. Lebih lanjut, pada analisis *buckling* struktur *Drop Hammer*, diperoleh Buckling Factor of Safety sebesar 53,5.

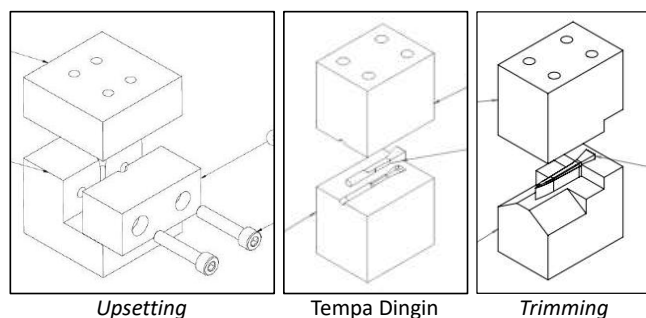
Enam (6) set Cetakan Tempa Dingin

Secara prinsip, cetakan yang dibuat adalah tiga (3) pasang, yaitu: (1) Cetakan *Upsetting*; (2) Cetakan Tempa Dingin, dan (3) Cetakan *Trimming*, seperti pada Gambar 10. Pasangan cetakan terdiri dari cetakan atas dan cetakan bawah, dengan rongga benda kerja di antaranya. Terdapat 6 pasangan cetakan yang dibuat, yaitu: (a) satu (1) set pasangan cetakan *Upsetting*, (b) tiga (3) pasangan cetakan Tempa Dingin, dan (c) Dua (2) pasangan cetakan *trimming*. Setiap rongga (*cavity*) pada pasangan cetakan disesuaikan dengan tahapan

pembentukan geometri paku ladam kuda, seperti pada Gambar 6.



Gambar 9. Analisa & Simulasi FEM dari Drop Hammer



Gambar 10. Cetakan pembentukan Paku Ladam Kuda

Kebutuhan gaya tekan pada proses ini, secara teoretik dihitung berdasarkan tegangan pada produk cetakan dikalikan dengan luas penampang pembentukannya. Untuk proses tempa dingin, luas permukaan ini merupakan luas proyeksi dari benda kerja. Perhitungan gaya tekan yang diperlukan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Gaya yang diperlukan untuk proses *Upsetting* dan Tempa Dingin

| | Luas Penampang (mm ²) | Gaya Tekan (KN) |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| <i>Upsetting</i> (Tahap 1) | 36,31 | 1,646 |
| Tempa (Tahap 2) | 171,13 | 3,890 |
| Tempa (Tahap 3) | 161,16 | 3,663 |

Pengujian & Analisa Proses Pembentukan Paku Ladam Kuda

Setelah rancangan *Drop Hammer* dan keenam cetakan dibuat, pengujian dilakukan untuk melihat konsistensi dari proses pembentukan paku ladam kuda. Jumlah spesimen yang digunakan adalah 200 buah kawat timah Pb berdiameter \varnothing 3,9 mm dan panjang 40 mm. Konfigurasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 11.

Untuk memastikan jumlah berat beban serta ketinggian, maka dicoba konfigurasi berat serta ketinggian terhadap hasil pembentukan. Baru setelah diperoleh hasil yang baik, pengujian pembentukan pada setiap tahapan dilakukan. Tabel 2 menunjukkan proses penentuan berat dan tinggi beban untuk proses pembentukan tempa dingin tahap 2, di mana proses pembentukan sempurna diperoleh pada berat 8 kg dan ketinggian 40 cm.



Gambar 11. Cetakan pembentukan Paku Ladam Kuda

Tabel 2. Penentuan berat & tinggi Beban pada proses tempa dingin Tahap - 2

| No | Beban (Kg) | Ketinggian (cm) | Jumlah Penempaan | Hasil Penempaan |
|----|------------|-----------------|------------------|--------------------|
| 1 | 6 | 45 | 1 | Terbentuk Sebagian |
| 2 | 7 | 35 | 1 | Terbentuk Sebagian |
| 3 | 7 | 45 | 1 | Terbentuk Sebagian |
| 4 | 8 | 35 | 1 | Terbentuk Sebagian |
| 5 | 8 | 40 | 1 | Terbentuk Sempurna |
| 6 | 8 | 40 | 1 | Terbentuk Sempurna |
| 7 | 8 | 40 | 1 | Terbentuk Sempurna |

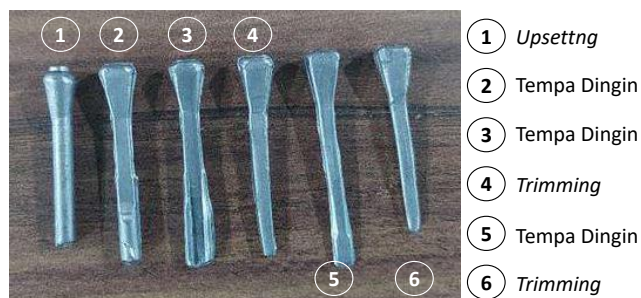
Proses pengujian tahapan pembentukan paku ladam kuda, dapat dilihat pada Tabel 3. Dari tahap 1 sejumlah 200 spesimen, diperoleh 175 spesimen, lalu dilanjutkan ke tahap 2, di mana dari 171 spesimen (dari yang baik pada tahap 1) dibentuk dengan proses tempa dingin menghasilkan 155 spesimen baik, dan seterusnya sampai tahap 6. Jumlah rata-rata rasio spesimen baik terhadap spesimen awal adalah 89%. Persentase ini menunjukkan konsistensi proses pembentukan. Catatan, khusus untuk Tahap - 4, karena pasangan cetakan dibuat dengan Aluminium Dural, maka proses penekanan dilakukan secara manual tidak menggunakan *Drop Hammer*.

Tabel 3. Tingkat keberhasilan geometri pembentukan & konfigurasi *Drop Hammer*

| | Jumlah Produk | | Jml (%) | <i>Drop Hammer</i> | | |
|----------------------------|---------------|-------|---------|--------------------|-------------|-----------|
| | Awal | Akhir | | Beban (Kg) | Tinggi (cm) | Gaya (KN) |
| <i>Upsetting</i> (Tahap 1) | 200 | 175 | 88% | 8 | 40 | 1,979 |
| Tempa (Tahap 2) | 171 | 155 | 91% | 10 | 45 | 4,599 |
| Tempa (Tahap 3) | 155 | 135 | 87% | 10 | 42 | 4,292 |
| <i>Trimming</i> (Tahap 4) | 135 | 101 | - | Manual | | |
| Tempa (Tahap 5) | 101 | 93 | 92% | 9 | 25 | 3,953 |
| <i>Trimming</i> | 93 | 85 | 91% | 6 | 35 | 0,776 |

Tahapan hasil pembentukan dapat dilihat pada Gambar 12. Terlihat dari Tahap 1 – Tahap 5, proses pembentukan sesuai dengan yang direncanakan. Tetapi untuk Tahap 6, geometri hasil akhir kurang sempurna karena geometri cetakan terkendala oleh proses pemesinan yang hanya menggunakan CNC. Di mana ujung runcing dari paku ladam kuda tidak tercapai. Proses pemesinan yang harus digunakan adalah dengan menggunakan mesin *EDM* atau *Laser*

Machining, sehingga geometri detail cetakan dapat diperoleh.



Gambar 12 Tahapan pembentukan Paku Ladam Kuda

KESIMPULAN & SARAN

Pembuatan peralatan tahapan pembentukan paku ladam kuda menggunakan metode drop hammer dan enam (6) set cetakan telah berhasil dilaksanakan. Cetakan dibuat menggunakan material baja S45C, sedangkan material paku ladam kuda pada tahap pengujian menggunakan kawat timah (Pb) sebagai media simulasi pembentukan. Pengujian dilakukan terhadap 200 spesimen, dengan tingkat keberhasilan pembentukan sebesar 90% berdasarkan kesesuaian geometri hasil pada setiap tahapan proses. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peralatan yang dikembangkan telah mampu merepresentasikan mekanisme pembentukan paku ladam kuda secara memadai dan dapat digunakan sebagai model awal proses manufaktur.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan sistem pembentukan bertahap beserta rancangan cetakan yang dapat digunakan sebagai dasar eksperimen untuk memahami karakteristik deformasi material dan urutan proses pembentukan paku ladam kuda. Selain itu, penelitian ini memberikan referensi teknis dalam pengembangan peralatan manufaktur skala laboratorium yang berpotensi diadaptasi menuju proses produksi yang lebih terstandar. Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan tahapan pembentukan dengan cetakan bertingkat dapat meningkatkan konsistensi bentuk produk, mengurangi ketergantungan terhadap proses manual, serta membuka peluang pengembangan produksi paku ladam kuda yang lebih efisien dan berulang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. J. Whyde, Patent Number WO02/34044 A1: Horseshoe Nail, 2 Mei 2002, WIPO.
- [2] Shane Togami, Design Patent Number US D644093S: Horseshoe Nail, 30 Agustus 2011, USPTO.
- [3] Rudoof Karel Marie Kerckhaert, Patent Number EP2609807A1: Horseshoe nail for nailing a horseshoe on a horse's toe, 19 November 2019, EPO.
- [4] Carlos Stelin, Patent Numnber US20140299335A1: Nail for horse shoe, 9 Oktober 2014, USPTO.
- [5] Kerckhaert, Liberty: a Nail Evolution, Royal Kerckhaert Horseshoe Factory Nail Catalog.
- [6] Mustad USA, Product Catalog, 2023
- [7] M. S. Permana, G. Santoso, and B. Heru, Pengembangan Metode Proses Manufaktur dan Pemilihan Material Ladam & Paku Untuk Kuda Pacu dan Ketangkasan Berkuda, Univ. Pas., vol. 0030105601.
- [8] W. W. Miner, Patent Number US490396: Method of Making Horseshoe Nails, 14 Januari 1893, USPTO.
- [9] Gatot Santoso, dkk., Paten no IDS000009614: CETAKAN TEMPAN PANAS PAKU KUDA, 23 Januari 2025, Direktorat Jendral Kekayaan Intelektual, Kementerian Hukum Republik Indonesia.

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan penggunaan material yang lebih representatif terhadap kondisi aplikasi nyata, yaitu baja perkakas untuk cetakan dan baja karbon rendah untuk material paku ladam kuda. Sistem drop hammer juga dapat digantikan dengan mesin pres yang lebih umum tersedia di industri untuk meningkatkan kontrol proses dan produktivitas. Selain itu, proses manufaktur cetakan tidak hanya mengandalkan mesin CNC, tetapi juga perlu dikombinasikan dengan teknologi presisi tinggi seperti EDM atau laser machining guna meningkatkan akurasi dimensi dan kualitas permukaan cetakan. Future research dapat difokuskan pada optimasi parameter proses pembentukan, seperti gaya tumbukan, jumlah tahapan deformasi, kecepatan pembentukan, dan karakteristik material, serta evaluasi sifat mekanik hasil produk seperti kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan terhadap keausan. Penelitian lanjutan juga dapat mencakup simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) untuk menganalisis aliran material dan distribusi tegangan selama proses pembentukan sehingga diperoleh desain cetakan dan parameter proses yang lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Prodi Teknik Mesin – Fakultas Teknik – Universitas serta seluruh sivitasnya yang memungkinkan penelitian ini bisa diselesaikan. Juga kepada para dosen yang secara aktif terlibat dalam penelitian.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama merupakan pimpinan kegiatan penelitian. Penulis kedua memulai kegiatan penelitian pembuatan paku ladam kuda melalui proses penempaan panas. Penelitian dilanjutkan dengan proses tempa dingin di lingkungan prodi Teknik Mesin, Penulis ke-3 dan ke-4 merupakan rekan peneliti yang secara aktif mendukung kegiatan penelitian serta menjadi narasumber saat penelitian mengalami hambatan. Sedangkan penulis ke-5 sampai ke-12 melakukan pengambilan data dan penelitian di lapangan sehingga hasil penelitian dapat tercapai dengan baik.

- [10] Program Leonarde de Vinci, European Farrier Handbook for the 21st Century, European Federation of Farriers Associations (EFFA), Barcelona, 10 November 2008.
- [11] M. S. Permana, G. Santoso, B. Heru, and F. Ridwan, “Pengaruh Derajat Deformasi Terhadap Evolusi Struktur Mikro Dan Nilai Kekerasan Ladam Dan Paku Kuda Akibat Proses Forging,” 2019.
- [12] Jeffrey Dudley Jones, Patent Number US5988967A: Horseshoe nail and horseshoe nail forming process, 23 November 1999, USPTO
- [13] Jeffrey Dudley Jones, Patent Number WO 97/00606: Nail and Nail Forming Process, 9 Januari 1999, WIPO7..
- [14] Jeffrey Dudley Jones, Patent Number EP0837626A: Nail and Nail Forming Process, 14 April 1999, EPO.
- [15] S. Kalpakjian and S. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology 8th Ed., 15 September 2020, Pearson Publishing, ISBN-13: 978013521142.
- [16] S. L. Semiatin, ASM Handbook, Volume 14: Forming and Forging, ASM International, 1993.