



Fabrikasi Kuku *Bucket* Ekskavator Baja Cor Ukuran 300×90×105 mm Lubang 30 mm, Kapasitas 0,25 Biji/Jam

Agung Cahyadi¹, Syamsul Hadi^{2*}, Achmad Syarifudin Annawa³, Ardita Firmansyah⁴,
Hadziq Fikri⁵, Ihza Narayana Rosyadi⁶

^{1,3,4,5,6}Program Studi Diploma IV, Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

²Program Studi Doktor Terapan Optimasi Desain Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Email: agungcahyadiks@gmail.com¹, syamsul.hadi@polinema.ac.id², aan1annawa@gmail.com³,
arditafirmansyah00@gmail.com⁴, hadziqfikri93@gmail.com⁵, ihzanarayana@gmail.com⁶

*Penulis Korespondensi: syampol2003@yahoo.com

Abstract. The problem faced lies in the excavator bucket nails that do not have standardized manufacturing procedures in the local casting industry, resulting in inconsistent product quality and high dependence on imported components. The purpose of fabrication is to obtain excavator bucket nails made of high Manganese cast steel (*hadfield steel*) measuring 300×90×105 mm with a hole diameter of 30 mm. The fabrication method includes: purchasing a 300×90×105 mm excavator bucket nail mold using one-piece casting method, preparing ASTM A128 Grade B-2 high Manganese steel, melting the steel with an induction furnace at a pouring temperature of 1480-1510°C, pouring the molten steel into a sand mold, dismantling and cutting the casting bowl and riser, drilling the dowel holes in stages up to a diameter of 30 mm, machining, finishing, solution annealing heat treatment at a temperature of 1080°C for 60 minutes, quenching in water, preparing and testing Charpy specimens, and inspecting the quality and dimensions of the product. The fabrication results are in the form of high manganese cast steel excavator bucket nails (*hadfield steel*) measuring 300×90×105 mm with a hole diameter of 30 mm, the total production cost is IDR 315,000/unit, the production process duration is 240 minutes/unit which implies that the excavator bucket nails can be used according to standards.

Keywords: Casting; Excavator Bucket Nails; *Hadfield Steel*; Heat Treatment; Manganese Steel.

Abstrak. Permasalahan yang dihadapi terletak pada kuku *bucket* ekskavator yang belum memiliki prosedur manufaktur terstandarisasi di industri pengecoran lokal, sehingga menyebabkan mutu produk yang tidak konsisten dan tingginya ketergantungan terhadap komponen impor. Tujuan fabrikasi untuk memperoleh kuku *bucket* ekskavator baja cor Mangan tinggi (*hadfield steel*) ukuran 300×90×105 mm lubang diameter 30 mm. Metode fabrikasi meliputi: pembelian cetakan kuku *bucket* ekskavator 300×90×105 mm metode *one-piece casting*, penyiapan baja Mangan tinggi ASTM A128 Grade B-2, peleburan baja dengan tungku induksi pada temperatur penuangan 1480-1510°C, penuangan baja cair ke dalam cetakan pasir, pembongkaran dan pemotongan mangkok tuang dan riser, pengeboran lubang pasak bertahap hingga diameter 30 mm, pemesinan, *finishing*, perlakuan panas *solution annealing* pada temperatur 1080°C selama 60 menit, *quenching* ke dalam air, penyiapan dan uji pukul spesimen Charpy, dan pemeriksaan mutu dan dimensi produk. Hasil fabrikasi berupa kuku *bucket* ekskavator baja cor Mangan tinggi (*hadfield steel*) ukuran 300×90×105 mm lubang diameter 30 mm, total biaya produksi Rp 315.000/unit, durasi proses produksi 240 menit/unit yang berimplikasi bahwa kuku *bucket* ekskavator dapat digunakan sesuai dengan standar.

Kata Kunci: Baja Mangan; *Hadfield Steel*; Kuku *Bucket* Ekskavator; Pengecoran; Perlakuan Panas.

1. LATAR BELAKANG

Kuku *bucket* merupakan komponen kritis pada ekskavator yang berfungsi sebagai elemen kontak utama saat proses penggalian, sehingga secara langsung mengalami beban pukul dan gesekan abrasif yang tinggi. Kondisi operasi tersebut menyebabkan laju keausan yang cepat dan risiko kerusakan berupa deformasi, retak, hingga patah, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan efisiensi kerja dan potensi *downtime* alat berat.

Tingginya frekuensi penggantian komponen tersebut menuntut ketersediaan produk yang tidak hanya tahan aus, tetapi juga ekonomis dan mudah diperoleh. Namun, ketergantungan terhadap produk impor masih mendominasi, sehingga pengembangan manufaktur lokal menjadi kebutuhan strategis dalam mendukung kemandirian industri.

Di sisi lain, industri pengecoran lokal masih menghadapi kendala berupa belum optimalnya standarisasi proses manufaktur pada setiap tahapan produksi. Penentuan parameter untuk desain pola, temperatur penuangan, komposisi bahan, dan sistem saluran masih banyak dilakukan berdasarkan pengalaman operator dan metode *trial and error*, sehingga efisiensi proses dan konsistensi mutu produk sulit dicapai (Jeziarski dkk., 2018; Prawira dkk., 2024). Kondisi tersebut tidak hanya menurunkan efisiensi proses, tetapi juga meningkatkan variabilitas mutu produk yang dihasilkan juga keterbatasan dokumentasi teknis dan prosedur operasional yang terstandarisasi menyebabkan sulitnya menjaga konsistensi mutu antar *batch* produksi yang berimplikasi pada rendahnya kapasitas produksi aktual dibandingkan dengan kapasitas yang direncanakan.

Dari aspek bahan, kuku *bucket* umumnya diproduksi menggunakan baja cor paduan rendah dengan kandungan karbon 0,25-0,45% serta penambahan unsur paduan untuk Mn, Cr, dan Mo untuk mencapai kekerasan 300-450 HB sesuai kebutuhan operasional (Ismail dkk., 2020). bahan tersebut dilaporkan memiliki umur pakai yang lebih baik dibandingkan baja Hadfield pada kondisi tertentu, tetapi pengecoran baja menghadapi tantangan signifikan terkait penyusutan solidifikasi yang dapat mencapai 3,6% dari volume bahan, sehingga berpotensi menimbulkan cacat internal jika tidak diimbangi dengan desain riser dan *gating system* yang optimal (Jeziarski dkk., 2018; Mahomed, 2021). Mengacu pada kondisi tersebut, pemilihan bahan yang tepat harus didukung oleh desain sistem pengecoran yang baik agar diperoleh kuku *bucket* dengan kekerasan tinggi, ketahanan aus yang optimal, dan mutu internal yang bebas dari cacat penyusutan. Jadi terdapat kesenjangan yang jelas antara kebutuhan industri terhadap kuku *bucket* bermutu tinggi dan keterbatasan proses manufaktur yang terstandarisasi di tingkat industri pengecoran lokal. Berdasarkan pertimbangan tersebut, fabrikasi difokuskan pada penyusunan prosedur manufaktur kuku *bucket* baja cor secara sistematis, mencakup seluruh tahapan proses mulai dari desain hingga evaluasi mutu produk. Luaran fabrikasi tidak hanya memberikan kontribusi ilmiah, tetapi juga menjadi acuan teknis yang aplikatif dalam meningkatkan efisiensi produksi dan daya saing industri manufaktur komponen alat berat dalam negeri (Jeziarski dkk., 2018; Ismail dkk., 2020; Dong dkk., 2023).

Dapat menjembatani kebutuhan industri akan komponen berkinerja tinggi melalui penerapan prosedur manufaktur yang terstruktur, terukur, dan sesuai dengan tuntutan mutu serta produktivitas industri modern.

2. KAJIAN TEORITIS

Baja cor *Hadfield* (*austenitic manganese steel*) banyak digunakan pada kuku *bucket* karena ketangguhan tinggi dan kemampuan *work hardening*-nya pada beban pukul. Bahan tersebut memiliki komposisi karbon 1,0–1,4% dan mangan 11–14% dengan struktur *austenit metastabil* (Zellagui dkk., 2022). Tetapi, kondisi *as-cast* mengandung karbida $(\text{Fe,Mn})_3\text{C}$ di batas butir yang menurunkan keuletan, sehingga diperlukan perlakuan panas untuk mengembalikan sifat mekanik. Secara kinerja, baja *Hadfield* unggul pada beban dinamis, tetapi kurang efektif pada abrasi murni tanpa pukul (Tęcza, 2022). Oleh karenanya, penggunaan baja *Hadfield* pada kuku *bucket* sangat sesuai untuk aplikasi yang mengalami kombinasi beban kejut dan gesekan, asalkan didukung oleh perlakuan panas yang tepat untuk memastikan struktur mikro homogen dan sifat mekanik yang optimal.

Keunggulan baja *Hadfield* terletak pada fenomena *work hardening* yang terjadi saat bahan mengalami deformasi plastis akibat pukul atau gesekan. Mekanisme tersebut ditandai oleh pembentukan dislokasi, *stacking faults*, dan *microtwins* yang menghambat pergerakan dislokasi sehingga meningkatkan kekerasan permukaan secara signifikan (Russakova dkk., 2023). Secara makro, terbentuk struktur nano untuk *nanotwins* dan lapisan nanokristalin yang meningkatkan ketahanan aus (Luo dkk., 2022), dan diperkuat oleh kerapatan dislokasi tinggi pada tekanan kontak besar (Dziubek dkk., 2022). Disisi lain, kinerja bergantung pada beban dinamis, sehingga pada abrasi murni tanpa pukul efektivitasnya menurun.

Peningkatan kekerasan permukaan baja *Hadfield* setelah mengalami deformasi plastis dan perlakuan panas dapat mencapai lebih dari 750 HV akibat mekanisme *twinning-induced work hardening* (Bańkowski dkk., 2024) yang menunjukkan bahwa pembentukan deformasi kembar (*deformation twins*) dan peningkatan densitas dislokasi berperan penting dalam meningkatkan ketahanan aus bahan pada kondisi beban pukul tinggi.

Proses *sand casting* digunakan untuk memproduksi komponen baja cor kompleks untuk kuku *bucket* karena fleksibel dan ekonomis. Cetakan terdiri dari *cope* dan *drag* dengan bahan pasir silika berikat bentonit, sementara mutu coran ditentukan oleh desain *gating system* dan riser yang mengontrol aliran logam dan solidifikasi (He dkk., 2022). Optimalisasi sistem saluran dapat mengarahkan pembekuan melalui efek *chill* pada ingate (Jeziński dkk., 2018)

Namun proses tersebut rentan terhadap cacat untuk *shrinkage porosity* akibat penyusutan volumetrik baja, sehingga desain *feeder* menjadi faktor kunci untuk menghasilkan coran bebas cacat (Mahomed, 2021). Keberhasilan proses sand casting dalam memproduksi kuku bucket bermutu tinggi sangat bergantung pada desain sistem pengecoran yang tepat untuk menjamin pengisian cetakan yang stabil, solidifikasi terarah, dan minimisasi cacat internal.

Selain pengecoran, proses *metal spinning* digunakan untuk memproduksi komponen simetri putar secara efisien. Parameter untuk radius *roller* dan ketebalan bahan memengaruhi mutu produk akhir. Di samping hal tersebut, ketebalan bahan juga berpengaruh terhadap sifat mekanik logam, sehingga pengendalian parameter proses menjadi hal penting dalam proses pembentukan logam dan pengecoran (Subagiyo dkk., 2023), sehingga pemahaman terhadap pengaruh parameter proses dan karakteristik bahan menjadi dasar yang penting dalam mendesain proses manufaktur yang mampu menghasilkan produk dengan dimensi akurat, sifat mekanik optimal, dan mutu yang konsisten.

Cacat pengecoran menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi efektivitas dan kapasitas produksi. Sebagian besar kegagalan produk disebabkan oleh cacat untuk *cold shut*, *shrinkage*, dan porositas yang muncul akibat ketidakkonsistenan parameter proses (Chelladurai dkk., 2020). Oleh karenanya, pengendalian parameter proses secara konsisten dan penerapan prosedur manufaktur yang tepat sangat diperlukan untuk meminimalkan terjadinya cacat, meningkatkan mutu produk, serta menjaga efisiensi dan kapasitas produksi secara optimal.

Meskipun teknologi simulasi telah berkembang, desain sistem saluran di industri masih banyak bergantung pada metode *trial and error* akibat kompleksitas parameter proses (Jeziarski dkk., 2018). Untuk mencapai kapasitas produksi 0,25 unit/jam, diperlukan pengendalian ketat pada seluruh tahapan manufaktur. Optimasi *gating system* dan *riser* terbukti meningkatkan mutu sekaligus efisiensi dengan mengurangi rework (He dkk., 2022). Secara kritis, tanpa standarisasi proses yang baik, konsistensi peningkatan kapasitas produksi sulit dicapai. Perlakuan panas merupakan tahap wajib pada baja *Hadfield* untuk menghilangkan karbida dan meningkatkan sifat mekanik. Proses *solution annealing* diikuti *quenching* efektif menghasilkan struktur *austenit homogen* (Zellagui dkk., 2022) serta meningkatkan ketahanan abrasi melalui mikrostruktur yang lebih halus (Dziubek dkk., 2022). Tanpa perlakuan panas, karbida di batas butir menyebabkan bahan menjadi getas dan tidak layak digunakan (Russakova dkk., 2023).

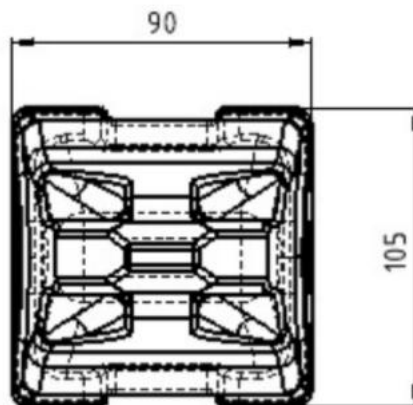
Perlakuan panas *solution treatment* pada baja mangan tinggi bertujuan melarutkan karbida pada batas butir dan menghasilkan matriks austenit homogen melalui proses quenching cepat yang terbukti mampu meningkatkan ketangguhan dan memperbaiki distribusi mikrostruktur bahan sehingga risiko retak antarbutir dapat diminimalkan (Kolekar dkk., 2021). Atas dasar ini, kontrol parameter *heat treatment* menjadi faktor kunci yang menentukan kinerja dan umur pakai bahan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

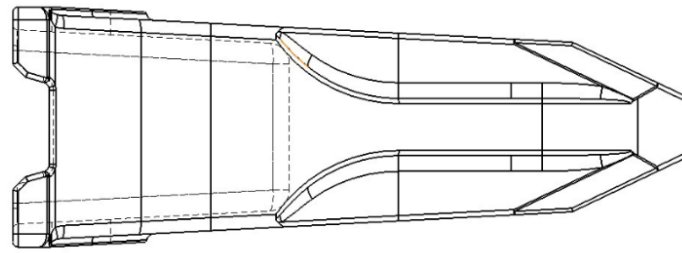
Fabrikasi kuku *bucket* ekskavator dilakukan melalui pendekatan penyempurnaan desain dan pemilihan bahan yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi *earthmoving equipment*. Kuku *bucket* diproduksi menggunakan metode *one-piece casting* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 4. Pendekatan manufaktur tersebut dipilih karena mampu menghasilkan geometri produk yang lebih sederhana, mengurangi jumlah sambungan, serta meningkatkan kekuatan struktur produk terhadap beban pukul dan abrasi selama operasi.



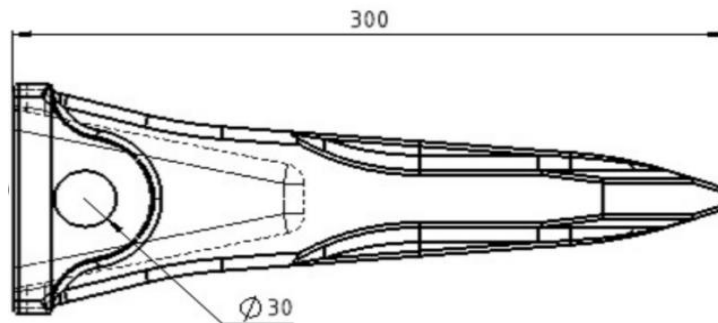
Gambar 1. Desain Kuku *Bucket* Ekskavator Isometris.



Gambar 2. Desain Kuku *Bucket* Ekskavator Tampak Depan.



Gambar 3. Desain Kuku *Bucket* Ekskavator Tampak Atas.



Gambar 4. Desain Kuku *Bucket* Ekskavator Tampak Samping.

Dimensi produk mengikuti spesifikasi umum kuku *bucket* ekskavator kelas menengah dengan panjang total 300 mm, lebar 90 mm, dan tinggi 105 mm. Lubang pasak $\varnothing 30$ mm dirancang untuk menyesuaikan sistem pemasangan terhadap *adapter bucket* sehingga proses pemasangan dan penggantian komponen dapat dilakukan dengan lebih mudah dan presisi.

Tahap awal fabrikasi diawali dengan persiapan bahan berupa cetakan kuku *bucket* dan bahan baja cor *High-Mn (Hadfield Steel)* yang telah disesuaikan dengan spesifikasi desain. Penggunaan baja mangan tinggi dipilih karena bahan tersebut memiliki kombinasi ketangguhan dan ketahanan aus yang baik pada kondisi beban pukul tinggi. Fenomena *work hardening* pada baja *Hadfield* memungkinkan permukaan bahan mengalami peningkatan kekerasan selama penggunaan sehingga umur pakai komponen menjadi lebih panjang (Luo dkk., 2023; Russakova dkk., 2023). Berdasarkan hal tersebut, pemilihan bahan *High-Mn Hadfield Steel* pada tahap awal fabrikasi merupakan langkah yang penting untuk memastikan bahwa kuku bucket memiliki kinerja mekanik yang optimal, ketahanan aus yang tinggi, serta umur layanan yang lebih panjang pada kondisi operasi yang berat.

Penggunaan cetakan komersial yang telah terstandarisasi mengurangi kebutuhan proses *pattern making* dan pembuatan cetakan pasir secara manual dari awal. Pendekatan tersebut mampu menurunkan waktu siklus produksi dan meningkatkan konsistensi dimensi produk hasil pengecoran. Selain hal tersebut, penggunaan sistem saluran dan *riser* yang tepat membantu mengurangi risiko cacat pengecoran akibat turbulensi logam cair dan penyusutan selama proses solidifikasi (He dkk., 2022).

Sehingga penerapan cetakan komersial yang terstandarisasi dan desain sistem pengecoran yang optimal merupakan strategi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi proses, menjaga akurasi dimensi, serta menghasilkan kuku *bucket* dengan mutu yang lebih konsisten dan minim cacat.

Peleburan bahan baja cor menggunakan tungku induksi untuk memperoleh komposisi kimia sesuai standar ASTM A128 Grade B-2 untuk *austenitic manganese steel castings*. Komposisi kimia dijaga pada rentang C: 1,1-1,3%, Mn: 12-14%, Si: 0,3-0,8%, P: $\leq 0,07\%$, dan S: $\leq 0,03\%$. Temperatur penuangan ditetapkan pada kisaran 1480-1510°C untuk memastikan fluiditas logam cair tetap baik selama proses pengisian rongga cetakan dan meminimalkan potensi cacat pengecoran pada baja Mangan tinggi (Gürol dkk., 2021), maka pengendalian komposisi kimia dan temperatur peleburan secara tepat merupakan faktor krusial untuk menghasilkan struktur mikro austenitik yang homogen, meningkatkan sifat mekanik bahan, dan menjamin mutu pengecoran kuku bucket yang sesuai dengan standar aplikasi alat berat.

Setelah proses penuangan selesai, logam cair mengalami pembekuan selama sekitar 30 menit sebelum dilakukan pembongkaran cetakan (*shakeout*). Tahapan tersebut dilakukan secara hati-hati untuk menghindari retak termal akibat perbedaan temperatur yang terlalu besar antara permukaan dan inti produk. Produk hasil pengecoran kemudian dibersihkan dari sisa pasir cetak dan saluran cor sebelum memasuki tahap pemesinan.

Pengeboran lubang pasak dilakukan menggunakan mesin bor secara bertahap untuk memastikan ketepatan posisi dan toleransi dimensi sesuai kebutuhan pemasangan pada *adapter bucket*. Pengeboran dimulai menggunakan *pilot drill* ϕ 12 mm, dilanjutkan pengeboran ϕ 25 mm, dan *finishing* ϕ 30 mm. Pengeboran bertingkat diperlukan karena baja Mangan tinggi memiliki tingkat ketangguhan dan kekerasan yang relatif tinggi, sehingga lebih sulit dikerjakan dibandingkan baja karbon biasa (Bleicher dkk., 2016) yang menunjukkan bahwa penerapan tahapan pengeboran secara bertingkat menjadi metode yang efektif untuk mengurangi beban pemotongan, meningkatkan akurasi dimensi, dan menghasilkan lubang pasak dengan mutu yang sesuai untuk proses perakitan kuku *bucket* pada adapter.

Setelah proses pemesinan selesai, produk menjalani proses *heat treatment* untuk meningkatkan kinerja mekanis bahan. Perlakuan panas dilakukan melalui proses *solution annealing* pada temperatur 1080°C selama 60 menit, kemudian dilanjutkan *quenching* menggunakan air pada temperatur 20-30°C yang bertujuan menghasilkan struktur austenit homogen melalui pelarutan karbida pada batas butir, sehingga ketangguhan pukul bahan dapat meningkat secara signifikan (Kolekar dkk., 2021)

Menunjukkan bahwa penerapan proses *solution annealing* dan *hardening* yang tepat sangat penting untuk mengoptimalkan struktur mikro baja Hadfield, meningkatkan ketangguhan serta ketahanan aus bahan, dan memastikan kuku bucket memiliki kinerja yang andal pada kondisi kerja dengan beban pukul tinggi.

Tahap akhir fabrikasi adalah pemeriksaan mutu (*quality control*) yang dilakukan untuk memastikan kesesuaian dimensi, kondisi visual, dan mutu hasil pengecoran. Pemeriksaan dilakukan untuk mendeteksi kemungkinan cacat permukaan untuk porositas dan retak yang dapat memengaruhi kinerja produk selama operasi. Pengendalian mutu yang baik menjadi faktor penting dalam menjaga konsistensi hasil produksi dan menekan potensi kegagalan produk (Vdovin dkk., 2017) yang mana pelaksanaan *quality control* secara menyeluruh pada tahap akhir fabrikasi merupakan langkah krusial untuk menjamin bahwa kuku *bucket* yang dihasilkan memenuhi standar dimensi, bebas dari cacat signifikan, dan memiliki keandalan yang tinggi dalam aplikasi operasional alat berat. Estimasi biaya dan waktu fabrikasi kuku *bucket* ekskavator sebagaimana Tabel 1.

Tabel 1. Estimasi Biaya dan Waktu Fabrikasi Kuku *Bucket* Ekskavator.

No.	Tahapan Proses	Biaya Produksi (Rp)	Durasi Proses (Menit)
1	Pembelian cetakan kuku <i>bucket</i> ekskavator 300×90×105 mm metode <i>one-piece casting</i>	35.000	5
2	Penyiapan baja Mangan tinggi ASTM A128 Grade B-2	25.000	10
3	Peleburan baja dengan tungku induksi pada temperatur penuangan 1480-1510°C	40.000	30
4	Penuangan baja cair ke dalam cetakan	10.000	10
5	Pembongkaran dan pemotongan mangkok tuang dan <i>riser</i>	12.000	15
6	Peleburan besi cor	15.000	20
7	Penuangan besi cor ke dalam cetakan yang telah dipanaskan	10.000	10
8	Pembongkaran cetakan dan pemotoangn mangkok tuang dan <i>riser</i>	10.000	10
9	Pengeboran lubang pasak bertahap hingga ϕ 30 mm	15.000	15
10	Pemesinan	25.000	20
11	<i>Finishing</i>	8.000	10
12	Perlakuan panas <i>solution annealing</i> pada temperatur 1080°C selama 60 menit	30.000	60
13	<i>Quenching</i> ke dalam air	5.000	5
14	Penyiapan dan uji pukul spesimen Charpy	18.000	10
15	Pemeriksaan mutu dan dimensi produk	7.000	10
	Jumlah	315.000	240
	Pajak 10%	31.500	
	Laba 15%	47.250	
	Total/Harga jual/unit	393.750	

Setelah pemesinan selesai, produk diperlakukan panas untuk meningkatkan kinerja mekanis bahan. Satu di antara perlakuan panas yaitu proses *strain hardening* pada baja Mangan tinggi mampu meningkatkan nilai microhardness permukaan hingga mencapai 510 HV akibat deformasi pukul berulang (Hai dkk., 2022).

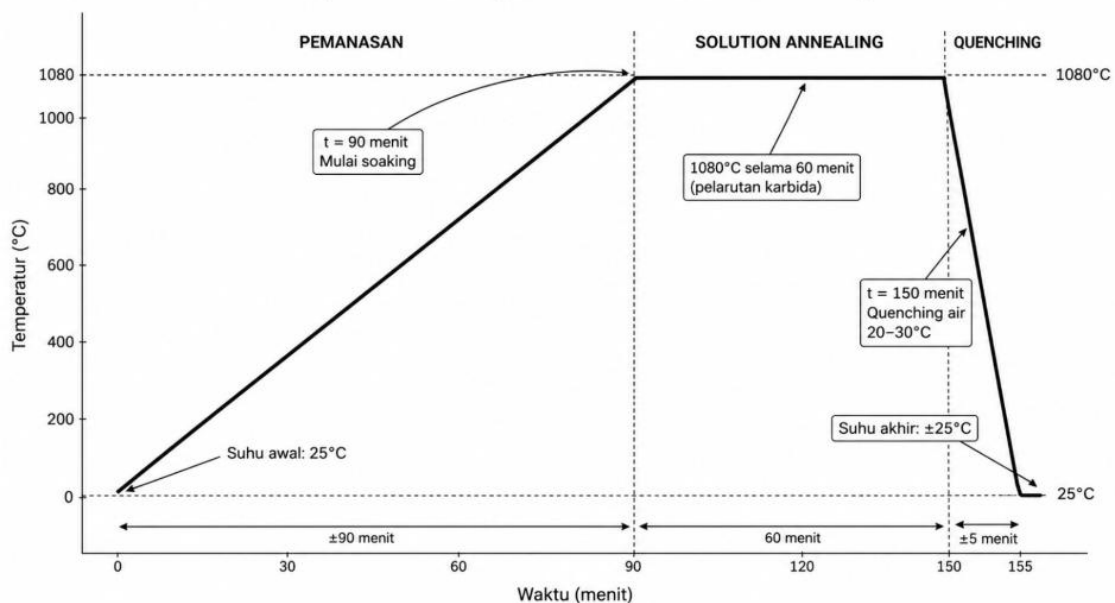
Peningkatan kekerasan tersebut menunjukkan bahwa baja Hadfield memiliki kemampuan adaptif terhadap kondisi operasi abrasif dan pukul tinggi. Perlakuan panas dilakukan melalui proses *solution annealing* pada temperatur 1080°C selama 60 menit yang dilanjutkan dengan proses *quenching* menggunakan air pada temperatur 20-30°C yang bertujuan untuk menghasilkan struktur austenit homogen melalui pelarutan karbida pada batas butir, sehingga ketangguhan pukul bahan dapat meningkat secara signifikan (Kolekar dkk., 2021). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penerapan proses *solution annealing* dan *quenching* yang tepat sangat penting untuk mengoptimalkan struktur mikro baja Hadfield, meningkatkan ketangguhan, ketahanan aus bahan, dan memastikan kuku *bucket* memiliki kinerja yang andal pada kondisi kerja dengan beban pukul tinggi.

Hasil fabrikasi menunjukkan bahwa kuku *bucket* baja cor berhasil diproduksi dengan dimensi 300×90×105 mm dan lubang pasak ϕ 30 mm sesuai rancangan awal. Metode *one-piece casting* mampu menghasilkan bentuk produk yang lebih sederhana serta mengurangi potensi kelemahan sambungan. Berdasarkan estimasi pada Tabel 1, proses fabrikasi membutuhkan biaya produksi sebesar Rp 315.000,-/buah dengan total waktu produksi 240 menit/buah.

Penggunaan baja Mangan tinggi (*Hadfield Steel*) memberikan kemampuan *work hardening*, ketahanan aus yang baik pada aplikasi beban pukul dan abrasif tinggi. Lebih lanjut, penggunaan metode pengecoran yang tepat mampu meningkatkan mutu mikrostruktur dan mengurangi potensi cacat hasil pengecoran sehingga produk layak digunakan pada aplikasi *earthmoving equipment* (Luo dkk., 2022; Gürol dkk., 2021; Vdovin dkk., 2017). Oleh karenanya, kombinasi pemilihan bahan Hadfield Steel dan penerapan proses pengecoran yang terkontrol merupakan faktor utama dalam menghasilkan kuku bucket dengan ketahanan aus tinggi, sifat mekanik unggul, serta keandalan yang sesuai untuk kondisi kerja berat pada peralatan pemindah tanah.

Proses *heat treatment* melalui *solution annealing* dan *quenching* menghasilkan struktur bahan yang lebih homogen sehingga meningkatkan ketangguhan dan ketahanan aus produk. Proses pengeboran bertahap dan pemesinan *finishing* juga menghasilkan mutu dimensi yang lebih presisi sehingga pemasangan pada sistem *adapter bucket* dapat dilakukan dengan baik (Bleicher dkk., 2016). Dari uraian tersebut, integrasi perlakuan panas dan proses pemesinan yang tepat berperan penting dalam menghasilkan kuku *bucket* dengan sifat mekanik yang optimal, akurasi dimensi yang tinggi, serta kompatibilitas pemasangan yang baik pada sistem adapter bucket.

Perlakuan panas *solution annealing* bahan *High-Mn Hadfield Steel* pada temperatur 1080°C selama 60 menit diikuti dengan *quenching* ke dalam air sebagaimana Gambar 5. Proses perlakuan panas melalui 3 fase: Fase 1, bahan baja hardfield berkadar Mangan tinggi dipanaskan hingga 90 menit dari temperatur ruang 25°C menuju 1080°C dengan laju pemanasan dijaga lambat dan merata untuk menghindari tegangan termal dan risiko retak, terutama pada komponen berpenampang tebal untuk kuku *bucket*, Fase 2, *Solution Annealing/Soaking*, berlanjut dari 90 ke 150 menit dengan temperatur dipertahankan konstan pada 1080°C selama 60 menit untuk melarutkan karbida $(Fe,Mn)_3C$ yang terbentuk di batas butir selama solidifikasi, sehingga terbentuk matriks austenit yang sepenuhnya homogen (Zellagui dkk., 2022), durasi 60 menit ditetapkan berdasarkan ketebalan penampang produk ±90-105 mm, dan Fase 3, *Quenching* dari 150 ke 155 menit sebagai pendinginan sangat cepat dari 1080°C menuju ~25°C dengan menggunakan air bertemperatur 20-30°C yang mana laju pendinginan minimal 100°C/menit diperlukan agar austenit tidak sempat berdekomposisi menjadi karbida kembali selama pendinginan. Hal tersebut yang membedakan baja Hadfield dari baja lain, karena tidak ada tahap *tempering*, struktur austenit yang diinginkan justru dipertahankan melalui *quenching* (Kolekar dkk., 2021).



Gambar 5. Perlakuan Panas *Solution Annealing* Bahan *High-Mn Hadfield Steel* pada Temperatur 1080°C selama 60 Menit diikuti dengan *Quenching* ke dalam Air.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil fabrikasi berupa kuku *bucket* ekskavator baja cor Mangan tinggi (*Hadfield Steel*) ukuran 300×90×105 mm lubang diameter 30 mm, total biaya produksi Rp 315.000/unit, durasi proses produksi 240 menit/unit yang berimplikasi bahwa kuku *bucket* ekskavator dapat digunakan sesuai dengan standar.

Saran tindak lanjut atas simpulan adalah perlu dilakukan pengujian mekanik yang lebih lengkap untuk uji tarik, uji pukul, dan uji keausan guna mengetahui kinerja bahan secara lebih detail, optimasi desain *gating system* dan parameter *heat treatment* juga perlu dikembangkan untuk meningkatkan mutu hasil pengecoran dan efisiensi proses produksi.

DAFTAR REFERENSI

- Bańkowski, D., Janik, M. & Kalandyk, B. (2024). The effect of work hardening on the structure and hardness of Hadfield steel. *Archives of Foundry Engineering*, 24(1), 9-14. https://journals.pan.pl/Content/130190/AFE%201_2024_02-Final.pdf
- Bleicher, F., Finkeldei, D. & Siller, A. (2016). Machining of Difficult-To-Cut Materials. *Proceedings of the 27th DAAAM International Symposium*, 473-479. <https://doi.org/10.2507/27th.daaam.proceedings.0>
- Chelladurai, C., Mohan, N. S., Hariharashayee, D., Manikandan, S. & Sivaperumal, P. (2020). Analyzing the Casting Defects in Small Scale Casting Industry. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.382>
- Dong, Z., Jiang, F., Tan, Y., Wang, F., Ma, R. & Liu, J. (2023). Review of the Modeling Methods of *Bucket* Tooth Wear for Construction Machinery. *Lubricants*, 11(6), 253. <https://doi.org/10.3390/lubricants11060253> (*Open Access*)
- Dziubek, M., Rutkowska-Gorczyca, M., Dudziński, W. & Grygier, D. (2022). Investigation into Changes Of Microstructure and Abrasive Wear Resistance Occurring in High Manganese Steel X120Mn12 During Isothermal Annealing and Re-Austenitisation Process. *Materials*, 15(7), 2622. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9000706/>
- Gürol, U., Karadeniz, E., Çoban, O. & Kurnaz, S. C. (2021). Casting Properties of ASTM A128 GR. E1 Steel Modified with Mn-Alloying and Titanium Ladle Treatment. *China Foundry*, 18(3), 199–206. <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1002-1>
- Hai, H. T., Nguyen, V. T. & Pham, Q. D. (2022). Strain Hardening Behavior of Hadfield High Manganese Steels under Impact-Abrasive Loading. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2211-2216. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.590>
- He, B., Lei, Y., Jiang, M. & Wang, F. (2022). Optimal Design of the Gating and Riser System for Complex Casting Using an Evolutionary Algorithm. *Materials*, 15(21), 7490. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9654928/>
- Ismail, R., Muhammad, Z., Jamari, J. & Bayuseno, A. P. (2020). Designing and Wear Testing of Ekskavator *Bucket* Teeth for the Need of Indonesian Mining. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(1), 21-27. http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0120_8062.pdf

- Jezierski, J. & Dojka, R. (2018). Optimizing the Gating System for Steel Castings. *Metals*, 8(4), 266. <https://doi.org/10.3390/met8040266>
- Kolekar, V. V. & Kulkarni, R. M. (2021). Different Heat Treatment Parameters Investigation on Microstructure, Mechanical and Wear Properties of Hadfield steel, *Master's thesis, Lund University, Faculty of Engineering. Lund University*, 14-16.
- Luo, Q. & Zhu, J. (2022). Wear Property and Wear Mechanisms of High-Manganese Austenitic Hadfield Steel in Dry Reciprocal Sliding. *Lubricants*, 10(3), 37. <https://doi.org/10.3390/lubricants10030037>
- Luo, Q., Li, X. & Zhu, J. (2023). Experimental Investigation on the Spalling Failure of Hadfield Steel under Repeated Impact Loading. *Engineering Failure Analysis*, 145, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106987>
- Mahomed, N. (2021). Shrinkage Porosity in Steel Sand Castings: Formation, Classification and Inspection. *Casting Processes and Modelling of Metallic Materials*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/73849>
- Prawira, Y., Ishak, A. ., & Anizar, A. (2024). A Review of Literature on Lean Manufacturing Tools and Implementation Based on Case Studies. *Jurnal Sistem Teknik Industri*, 26(1), 11-21. <https://doi.org/10.32734/jsti.v26i1.11489>
- Russakova, A., Zhilkashinova, A., Alontseva, D., Aibilev, M., Khozhanov, A. & Zhilkashinova, A. (2023). Effect of the Dislocation Substructure Parameters of Hadfield Steel on its Strain Hardening. *Materials*, 16(4), 1717. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9963796/>
- Subagiyo, S., Sarjiyana, S., Hadi, S., Suyanta, S. & Asrori, A. (2023). Analysis of Roller Tip Radius and Blank Thickness on the Aluminium Bowl Forming by Metal Spinning Method. *RA Journal of Applied Research*, 9(4), 194-199.
- Tęcza, G. (2022). Changes in Microstructure and Abrasion Resistance During Miller Test of Hadfield High-Manganese Cast Steel After the Formation of Vanadium Carbides in Alloy Matrix. *Materials*, 15(3), 1021. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8840690/>
- Vdovin, K. N., Feoktistov, N. A., Gorlenko, D. A. & Nikitenko, O. A. (2017). Investigation of Microstructure of High-Manganese Steel Modified by Ultra-Dispersed Powders, on the Base of Compounds of Refractory Metals. *CIS Iron and Steel Review*, 14, 34-40. <http://dx.doi.org/10.17580/cisisr.2017.02.07>
- Zellagui, R., Hemmouche, L., Ait-Sadi, H. & Chelli, A. (2022). Effect of Element Addition, Microstructure Characteristics, Mechanical Properties, Machining and Welding Processes of the Hadfield Austenitic Manganese Steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(3), 863-868. <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/139676/edition/124008/content>