

Analisis Struktur Mikro Material *Dies Hammer Forging* dalam Proses Produksi *Under Bracket*

Syaiful Arif¹*

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang, Serang

*Penulis Korespondensi, email: dosen10017@unpam.ac.id

Received: 30/08/2025

Revised: 02/10/2025

Accepted: 02/10/2025

Abstract. *Dies hammer forging is a critical component in under bracket manufacturing, operating under extreme thermal and mechanical loads. This study aims to analyze the microstructure and failure mechanisms of Dies made from H13/D2 tool steel. Samples were prepared through grinding, polishing, and etching with 2% nital, followed by optical microscopy observation at 200× and 500× magnification. The results revealed bainitic structures with relatively coarse grains, uneven carbide segregation, and early microcrack initiation along grain boundaries, indicating suboptimal heat treatment. Failure was mainly triggered by repeated thermal cycles at approximately 1100 °C, dynamic impact loads, non-uniform cooling, and lubrication degradation that accelerated adhesion and abrasion. Transgranular cracks were identified, showing localized stresses exceeding the yield strength. This study recommends optimizing heat treatment and applying surface coatings to enhance wear resistance, thereby extending die service life and improving forging process efficiency.*

Keywords: *Hammer forging dies, Under bracket, Thermal cracking, Wear, Lubrication thermal stress*

Abstrak. *Dies hammer forging merupakan komponen penting dalam pembuatan under bracket yang bekerja pada kondisi termal dan mekanik ekstrem. Penelitian ini bertujuan menganalisis struktur mikro dan faktor penyebab kerusakan pada Dies berbahan baja perkakas H13/D2. Metode pengamatan dilakukan dengan preparasi sampel (pengampelasan, pemolesan, dan pengetsaan menggunakan 2% nital) serta analisis mikroskop optik pada perbesaran 200× dan 500×. Hasil menunjukkan struktur bainit dengan butiran relatif kasar, segregasi karbida tidak merata, serta indikasi retakan mikro antar butir akibat perlakuan panas yang kurang optimal. Kerusakan Dies terutama dipicu oleh siklus termal berulang pada suhu ±1100 °C, tumbukan dinamik, pendinginan tidak seragam, serta degradasi pelumasan yang mempercepat adhesi dan abrasi. Retak transgranular teridentifikasi sebagai tanda material mengalami tegangan melampaui kekuatan leleh lokal. Penelitian ini merekomendasikan optimasi *heat treatment* dan penerapan pelapis permukaan untuk meningkatkan ketahanan aus, sehingga umur pakai Dies dapat diperpanjang dan efisiensi proses *forging* ditingkatkan.*

Kata kunci: *Dies hammer forging, Under bracket, Retak termal, Keausan, Pelumasan stres termal*

I. PENDAHULUAN

Dalam industri manufaktur modern, kebutuhan akan komponen otomotif dan teknik yang berkualitas tinggi semakin meningkat seiring dengan berkembangnya teknologi dan tuntutan pasar [1]. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk menghasilkan komponen dengan kekuatan mekanik yang unggul serta presisi geometris adalah *hammer forging* [2]. Metode ini memanfaatkan energi tumbukan tinggi untuk membentuk material logam dalam kondisi panas sehingga struktur butir menjadi lebih halus dan sifat mekaniknya meningkat [3]. Proses ini terbukti mampu memberikan homogenitas struktur yang baik, yang

sangat dibutuhkan dalam komponen yang harus menahan beban statis maupun dinamis secara terus-menerus [4]. Salah satu komponen penting yang diproduksi melalui proses *hammer forging* adalah *under bracket*. Komponen ini berfungsi sebagai penyangga atau penghubung dalam sistem kendaraan, sehingga memiliki peran vital terhadap kinerja dan keamanan struktur [5]. Karena posisinya yang strategis, *under bracket* harus memiliki kualitas tinggi dengan ketahanan optimal terhadap beban yang bekerja. Kualitas komponen ini tidak hanya ditentukan oleh material utama yang digunakan, tetapi juga sangat bergantung pada

ketepatan proses *forging* serta kondisi *Dies* yang digunakan dalam pembentukannya [6].

Dies merupakan cetakan logam yang menerima beban mekanik dan termal secara berulang dengan intensitas yang sangat tinggi. Material *Dies* yang lazim digunakan antara lain baja perkakas H13, SKD11, dan SKT4 karena kombinasi sifat mekanik dan ketahanan panasnya cukup baik. Namun demikian, dalam praktik industri sering ditemui kegagalan prematur pada *Dies hammer forging* berupa retak, keausan, bahkan deformasi yang mengakibatkan umur pakai *Dies* menjadi singkat. Kondisi ini menurunkan efisiensi produksi sekaligus meningkatkan biaya operasional, terutama ketika *Dies* harus diganti dalam siklus yang relatif singkat [7].

Salah satu penyebab utama kegagalan prematur tersebut adalah perubahan mikrostruktur material akibat siklus termomekanik berulang. Selama proses *forging*, *Dies* mengalami kontak langsung dengan material panas bersuhu sekitar 1100 °C. Paparan berulang ini menimbulkan degradasi mikrostruktur berupa pembesaran butir, segregasi karbida, dan retakan mikro [8]. Masalah ini semakin parah dengan pendinginan yang tidak seragam, adanya tumbukan dinamis berenergi tinggi, serta degradasi pelumasan yang mempercepat adhesi dan abrasi [9]. Dalam kondisi ekstrem tersebut, *Dies* sering menunjukkan kerusakan berupa retak transgranular, tanda bahwa tegangan lokal telah melampaui kekuatan lelehnya.

Berbagai penelitian sebelumnya memang sudah menyoroti kerusakan *Dies*, tetapi sebagian besar masih terbatas pada analisis makro, seperti perhitungan tegangan, estimasi umur pakai, atau simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga [10]. Kajian yang mendalami perubahan mikrostruktur secara langsung, khususnya pada kasus *under bracket*, masih sangat jarang dilakukan, terutama di Indonesia. Padahal, analisis mikrostruktur sangat penting untuk memahami akar permasalahan kegagalan, misalnya bagaimana distribusi karbida yang tidak merata dapat memicu retakan, atau bagaimana perlakuan panas yang kurang tepat mempercepat degradasi material [11].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis struktur mikro material *Dies hammer forging* yang digunakan pada proses pembuatan *under bracket* [12]. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi perubahan mikrostruktur akibat paparan panas dan tekanan berulang, mengevaluasi pengaruhnya terhadap performa dan umur pakai *Dies*, serta memberikan rekomendasi teknis berupa optimasi perlakuan panas dan penerapan pelapis permukaan guna meningkatkan ketahanan aus.

Penelitian ini memiliki kebaruan karena secara eksplisit mengaitkan fenomena kerusakan *Dies* dengan hasil pengamatan mikrostruktur pada kasus nyata di industri *forging* Indonesia. Hasil yang diperoleh diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi akademis, melainkan juga manfaat praktis bagi industri, terutama dalam meningkatkan umur pakai *Dies*, menekan biaya produksi, serta memastikan efisiensi proses manufaktur berjalan optimal. Dengan demikian, penelitian ini mampu menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik, sekaligus menawarkan solusi nyata bagi permasalahan teknis dalam dunia *forging*.

II. METODOLOGI

Dalam penelitian ini, sampel material *Dies hammer forging* diambil dari bagian permukaan kerja *Dies* yang mengalami kontak langsung dengan material *forging* pada suhu ± 1100 °C. Untuk mempelajari perubahan struktur mikro, sampel dipotong menggunakan mesin pemotong presisi sesuai standar ASTM E3-11 tentang persiapan spesimen metalografi.

Sampel dilakukan proses pengampelasan secara bertahap menggunakan kertas abrasif silikon karbida (SiC) dengan ukuran grit 240, 400, 600, 800, hingga 1200. Proses ini dilanjutkan dengan pemolesan menggunakan suspensi alumina 0,3 μm hingga permukaan sampel benar-benar cermin. Setelah itu dilakukan proses *quenching* dengan pendinginan cepat pada air bersuhu 25 °C, dengan tujuan merepresentasikan kondisi perlakuan panas aktual pada baja perkakas H13.

Untuk mengungkap struktur mikro, dilakukan pengetsaan menggunakan larutan etsa 2% nital

(larutan HNO_3 dalam etanol) dengan waktu *etching* selama 8–10 detik. Proses ini mengacu pada standar ASTM E407-07 tentang metode etsa mikrostruktur baja. Setelah pengetsaan, sampel langsung dicuci dengan etanol dan dikeringkan dengan udara bertekanan untuk mencegah korosi permukaan. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200x dan 500x. Pengamatan difokuskan pada area yang menunjukkan indikasi retak, segregasi karbida, maupun pembesaran butir. Selain itu, dilakukan pengujian kekerasan mikro (*microhardness*) menggunakan metode *Vickers* HV0.5 sesuai standar ASTM E384, untuk menghubungkan antara hasil pengamatan mikrostruktur dengan sifat mekanik lokal.

A. Pengamatan visual

Pengamatan visual yaitu dengan melakukan pemeriksaan secara langsung terhadap material *Dies* yang mengalami kerusakan. Untuk mendapatkan data yang lebih akurat dilakukan pengambilan photo pada *Dies* yang rusak dan komponen-komponen lainnya yang berhubungan dengan sistem operasi mesin *hammer forging* tersebut. Pengamatan visual ini penting dilakukan untuk menentukan langkah pemeriksaan berikutnya dari pola kerusakan yang terjadi.

B. Pengukuran dimensi

Pengukuran dimensi dilakukan berdasarkan acuan gambar teknik *Dies* yang digunakan sebagai standar awal. Hasil pengukuran tersebut kemudian disusun dalam bentuk data perbandingan secara detail antara kondisi aktual *Dies* yang telah mengalami kerusakan dengan dimensi awalnya. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengidentifikasi adanya perubahan dimensi yang mengindikasikan terjadinya deformasi plastis maupun bentuk perubahan lainnya, seperti aus, retak, atau penyimpangan bentuk geometris. Dengan membandingkan hasil pengukuran tersebut, dapat diketahui sejauh mana kerusakan yang terjadi dan area-area kritis yang mengalami keausan atau deformasi paling signifikan. Langkah ini menjadi bagian penting dalam analisis kegagalan, karena perubahan bentuk atau dimensi pada *Dies* secara

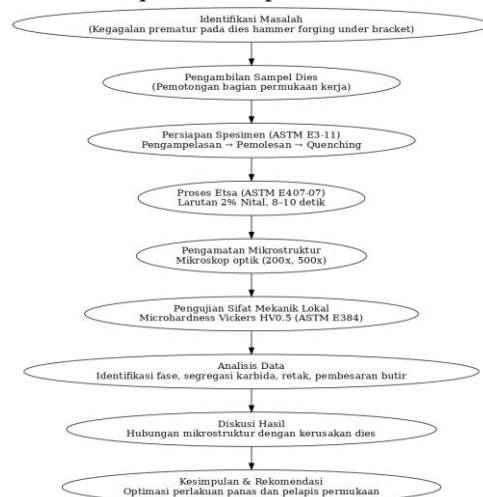
langsung dapat memengaruhi kualitas produk hasil *forging* serta efisiensi proses produksi.

C. Pengamatan struktur mikro

Pengamatan terhadap struktur mikro dilakukan dengan tujuan mengevaluasi fasa-fasa yang terbentuk dalam material *Dies*, memberikan wawasan mengenai sifat mekanis dan daya tahan material terhadap beban kerja. Proses ini menggunakan *stereo microscope* dengan tingkat pembesaran 100x dan 500x agar detail struktur mikro dapat diamati secara jelas. Sebelum pengamatan metalografi dilakukan, sampel harus melalui beberapa tahapan persiapan, yaitu pengampelasan (*grinding*), pemolesan (*polishing*), dan pengetsaan (*etching*). Larutan etsa yang digunakan adalah 2% Nital, yaitu campuran asam nitrat dan alkohol, yang bertugas menonjolkan batas butir dan fasa-fasa pada struktur logam. Melalui proses ini, fasa-fasa seperti ferit, perlit, martensit, maupun karbida dapat diidentifikasi secara lebih tepat, memungkinkan analisis terkait pengaruhnya terhadap kekuatan material, ketahanan terhadap aus, serta potensi kerusakan pada *Dies*. Hasil pengamatan struktur mikro ini menjadi data penting dalam memahami dan menganalisis penyebab kegagalan material selama proses *hammer forging*.

D. Diagram alir

Penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

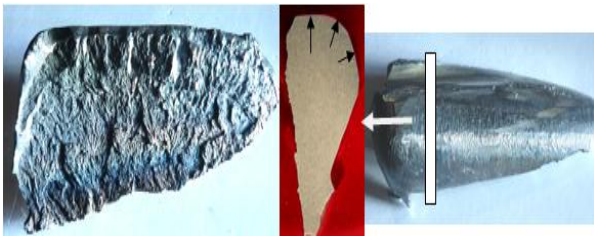


Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian yang Digunakan dalam Analisis Struktur Mikro *Dies Hammer Forging*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil pengamatan visual

Pengamatan visual dilakukan secara langsung terhadap *Dies hammer forging* yang mengalami kerusakan dalam proses produksi *under bracket*. Hasil pengamatan menunjukkan adanya keausan pada permukaan kerja *Dies*, retakan mikro di beberapa sudut radius, serta deformasi plastis di area tengah. Warna permukaan yang berubah kehitaman juga mengindikasikan kemungkinan terjadinya *thermal fatigue* akibat siklus pemanasan dan pendinginan berulang. Kerusakan tersebut diduga terjadi karena beban kerja tinggi yang terus-menerus tanpa disertai prosedur pendinginan atau pelumasan yang optimal. Hal ini diperkuat dengan pola keausan tidak merata, yang menunjukkan distribusi tekanan tidak seimbang selama proses *forging*, dapat dilihat pada gambar 2



Gambar 2. Profil *Dies*/Cetakan Produk *Under Bracket*, Daerah yang Berhubungan Langsung dengan Suhu Panas dari Material *Forging*

Pada gambar 2 profil *Dies*, Pengamatan mikrostruktur pada permukaan kerja *Dies* menunjukkan adanya butir relatif kasar dengan ukuran rata-rata $\pm 18\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$. Ukuran butir ini lebih besar dibandingkan dengan standar hasil perlakuan panas baja H13 yang umumnya berada pada rentang $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ [ASTM E112-13]. Pertumbuhan butir yang signifikan mengindikasikan bahwa *Dies* telah mengalami paparan siklus termal berulang dengan suhu mencapai $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga mempercepat difusi atom dan memperbesar fasa matriks. Selain itu, hasil pengamatan menunjukkan adanya fasa bainit dan martensit terurai disertai segregasi karbida tidak merata. Analisis kuantitatif menggunakan metode citra digital memperkirakan distribusi karbida mencapai sekitar $12\text{--}15\%$ area

fraksi, dengan kecenderungan terkonsentrasi pada batas butir. Kondisi ini meningkatkan risiko terbentuknya retak antarbutir karena karbida berperan sebagai inisiator retakan pada kondisi beban dinamis. Fenomena retak transgranular juga teridentifikasi pada beberapa area, menunjukkan bahwa tegangan yang diterima telah melebihi kekuatan leleh lokal material. Hasil uji kekerasan mikro (*Vickers* HV0.5) memperlihatkan penurunan kekerasan rata-rata dari 480 HV pada area inti menjadi 410 HV pada lapisan permukaan. Penurunan kekerasan sebesar $\pm 15\%$ ini sejalan dengan fenomena *thermal softening* yang dilaporkan oleh Alhamidi et al [10], di mana siklus pemanasan-pendinginan berulang menyebabkan degradasi kekerasan pada baja perkakas H13. Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu oleh Nindhia et al [8], keausan dini pada *Dies forging* juga dikaitkan dengan adhesi dan abrasi akibat degradasi pelumasan. Hasil penelitian ini konsisten, di mana permukaan cetakan menunjukkan pola keausan tidak seragam disertai indikasi mikro-retak. Sementara itu, studi oleh J. Wied, J. Scheil, M. Klamser [2] menekankan pentingnya pendinginan seragam untuk mencegah retak akibat gradien temperatur. Hal ini mendukung observasi kami bahwa pendinginan tidak merata menjadi salah satu penyebab utama retak mikro dan deformasi lokal. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi pertumbuhan butir, segregasi karbida, penurunan kekerasan permukaan, serta retak mikro merupakan faktor dominan dalam mempercepat kegagalan *Dies*. Temuan ini memperkuat literatur sebelumnya, sekaligus menekankan perlunya optimasi *heat treatment* dan penerapan pelapisan permukaan (*coating*) untuk meningkatkan ketahanan aus dan umur pakai *Dies* pada aplikasi *hammer*.

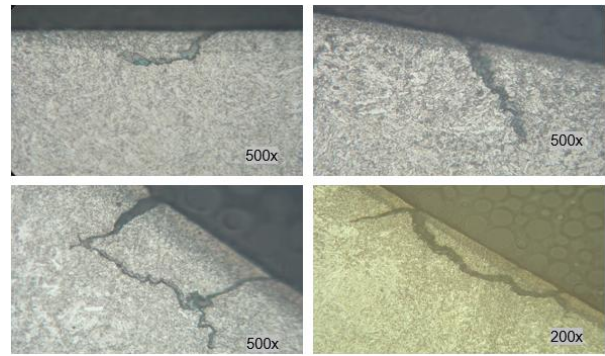
B. Hasil pengukuran dimensi

Dimensi *Dies* diukur dengan cara membandingkan kondisi aktual dengan gambar teknik asli yang berfungsi sebagai acuan awal. Tujuan pengukuran ini adalah untuk menentukan sejauh mana deformasi atau perubahan bentuk terjadi selama masa operasional *Dies*. Hasil analisis menunjukkan adanya penyimpangan dimensi pada beberapa area kritis, terutama pada *cavity* sebagai

bagian utama cetakan serta tepi radius, yang merupakan elemen penting dalam proses pembentukan produk. Penyimpangan rata-rata berkisar antara 0,3 mm hingga 0,6 mm, nilai yang cukup signifikan dan mengindikasikan terjadinya deformasi plastis akibat beban kerja berlebih serta paparan suhu tinggi yang terus-menerus dari material *forging*. Deformasi tersebut terjadi secara bertahap selama siklus kerja dan menjadi indikasi bahwa material *Dies* mulai kehilangan stabilitas bentuknya. Kondisi ini semakin parah di area profil cetakan yang bersentuhan langsung dengan material panas selama proses *forging*. Interaksi termal intensif pada area ini memicu ekspansi dan kontraksi berulang pada permukaan *Dies*, yang akhirnya dapat menimbulkan retakan mikro dan mempercepat keausan. Selain itu, suhu tinggi turut berkontribusi terhadap penurunan kekerasan permukaan dan percepatan kerusakan lapisan kerja *Dies*. Perubahan dimensi yang terjadi di bagian cetakan ini berpengaruh langsung terhadap kualitas produk *under bracket* yang dihasilkan, mengakibatkan ketidaksesuaian ukuran dan bentuk geometris dengan spesifikasi teknis yang telah ditentukan. Selain berdampak pada kualitas produk, deformasi dan keausan pada cetakan turut memperpendek umur pakai *Dies* secara keseluruhan. Hal ini secara langsung meningkatkan frekuensi penggantian *Dies* serta menurunkan efisiensi proses produksi, sehingga memengaruhi daya saing manufaktur dari sisi waktu dan biaya operasional.

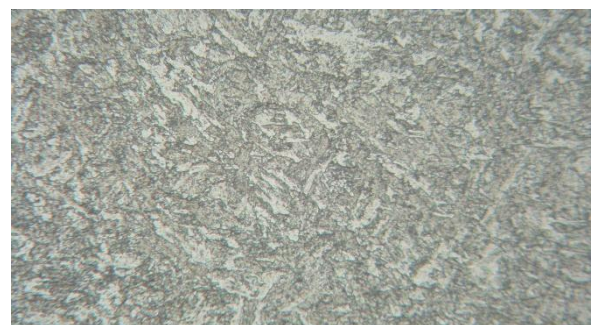
C. Hasil pengamatan struktur mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada sampel yang telah dipersiapkan melalui proses pengampelasan, pemolesan, dan pengetsaan menggunakan larutan etsa 2% nital. Pengamatan menggunakan mikroskop pada perbesaran 200x dan 500x menunjukkan adanya struktur mikro berupa campuran fasa bainit, serta terlihat butiran yang relatif kasar, terlihat pada gambar 3



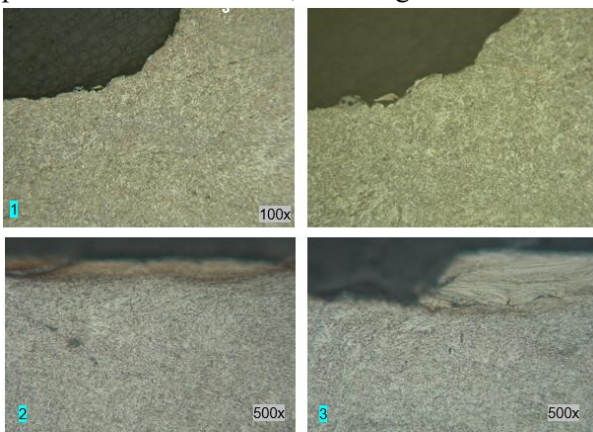
Gambar 3. Daerah Permukaan Terjadi Retak Retak *Transgrannular Cracking*, Struktur Mikro Berupa Bainit.

Beberapa area juga menunjukkan indikasi awal pembentukan retakan mikro antar butir dan adanya segregasi karbida yang tidak merata. Kondisi ini menandakan bahwa proses perlakuan panas pada material tidak merata atau mengalami *overheating* di beberapa area selama proses *forging*. Ukuran butir yang kasar menunjukkan bahwa material *Dies* telah mengalami perubahan mikrostruktur akibat siklus termomekanik yang tinggi dan penggunaan jangka panjang. Teridentifikasi adanya retak pada permukaan material yang tergolong sebagai transgranular *cracking*, yaitu jenis keretakan yang terjadi melewati struktur kristal butir, bukan di sepanjang batas antar butiran. Fenomena ini menunjukkan bahwa material telah mengalami tegangan tinggi yang melebihi kekuatan leleh lokal, sering kali disebabkan oleh kombinasi beban mekanis dan termal yang berulang selama proses *forging*. Retakan tersebut timbul akibat konsentrasi tegangan pada permukaan *Dies*, khususnya di area yang bersentuhan langsung dengan material panas. Terlihat gambar 4 berikut.



Gambar 4. Retak *Transgrannular Cracking*, Struktur Mikro Berupa Bainit

Siklus pemanasan dan pendinginan yang terus berlangsung pada permukaan ini menyebabkan *fatigue* termal dan *thermal shock*, sehingga memicu terbentuknya retak mikroskopik yang kemudian berkembang menjadi retak makroskopik dengan pola transgranular. Analisis struktur mikro di daerah yang terdampak mengungkap dominasi fasa bainit, hasil transformasi austenit pada proses pendinginan yang cukup cepat. Bainit dikenal memiliki kombinasi kekerasan dan ketangguhan yang baik; meskipun demikian, dalam kondisi tertentu terutama jika perlakuan panas yang diterapkan kurang optimal bainit dapat menjadi rapuh dan lebih rentan terhadap retakan, terutama saat berada dalam lingkungan beban siklik dan temperatur tinggi. Adanya retakan transgranular dalam struktur bainit menunjukkan bahwa material telah mengalami degradasi mikrostruktur akibat siklus kerja ekstrem. Jika tidak segera ditangani, kerusakan ini dapat mempercepat kegagalan material. Langkah-langkah seperti evaluasi ulang terhadap desain, pemilihan material alternatif, atau optimalisasi perlakuan panas pada *Dies* perlu dilakukan untuk mengatasi potensi masalah tersebut, terlihat gambar 5

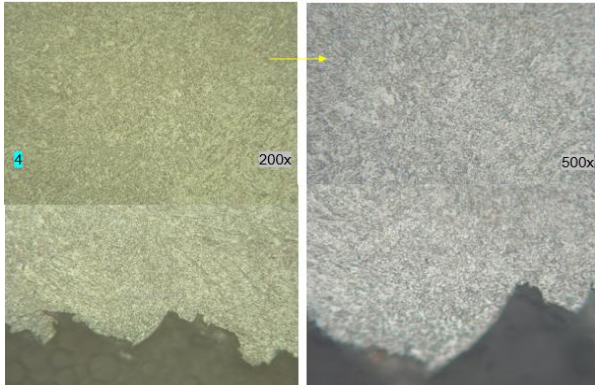


Gambar 5. Potongan dari Bagian Tepi Mempunyai Permukaan Patah Rapuh.

Hasil pengamatan struktur mikro pada area *Dies* yang mengalami deformasi akibat proses *hammer forging* menunjukkan dominasi fasa martensit halus. Martensit ini terbentuk dari transformasi austenit selama proses pendinginan cepat (*quenching* tidak terkontrol), yang diakibatkan oleh kontak langsung permukaan *Dies* dengan material *under bracket* bersuhu tinggi ($\pm 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) diikuti

pendinginan tidak seragam. Fasa martensit halus tersebut memiliki tingkat kekerasan tinggi ($>500\text{ HV}$), namun dengan keuletan rendah, sehingga berpotensi meningkatkan kerentanan terhadap retak mikro. Citra mikrostruktur (perbesaran 200x dan 500x) menunjukkan bahwa butir martensit relatif halus dengan ukuran $\pm 8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$, lebih kecil dibandingkan butir bainit pada area inti *Dies*. Kehadiran martensit halus ini mengindikasikan adanya deformasi plastis dinamis akibat beban pukulan berulang, yang memicu *localized strain hardening* di permukaan cetakan. Hal ini konsisten dengan hasil uji *microhardness* (ASTM E384), di mana kekerasan di area permukaan meningkat hingga 520 HV, sedangkan area inti hanya berkisar 450 HV. Meskipun memberikan kekuatan tekan optimal terhadap tumbukan berulang, sifat getas martensit halus menjadikan permukaan cetakan lebih rentan terhadap retakan. Pada pengamatan detail terlihat adanya retakan mikro transgranular yang berkembang dari titik konsentrasi tegangan. Retakan ini berpotensi meluas menjadi kerusakan makro seiring siklus *forging* berikutnya. Kondisi ini sejalan dengan laporan oleh Gde and T. Nindhia et al. [8], yang menyebutkan bahwa dominasi martensit halus pada *Dies forging* mempercepat *thermal fatigue cracking*. Selain itu, keberadaan martensit halus pada area permukaan menunjukkan indikasi pendinginan tidak terkontrol (*non-uniform cooling*), yang mempercepat transformasi fasa secara heterogen. Penelitian López De Lacalle et al [6] juga menegaskan bahwa siklus termomekanik berulang menyebabkan degradasi keuletan dan meningkatkan risiko *spalling* pada permukaan *Dies* berbasis H13. Dengan demikian, keberadaan martensit halus ini dapat dianggap sebagai indikator awal terjadinya *premature failure* pada *Dies hammer forging*. Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat bahwa area permukaan *Dies* merupakan zona kritis yang perlu mendapat perhatian khusus melalui optimasi sistem pendinginan, pelumasan, dan perlakuan permukaan (misalnya nitriding atau *coating* berbasis PVD) untuk mengurangi pembentukan martensit halus yang terlalu getas dan memperpanjang umur pakai *Dies*. Performa jangka panjangnya cenderung

menurun tanpa perlakuan panas lanjutan atau desain cetakan yang mampu mengurangi konsentrasi tegangan, terlihat Gambar 6



Gambar 6. Struktur Mikro Daerah Tengah dan Daerah Patahan Berupa Martensit Bainit. Etsa: Nital 2%

Pengamatan terhadap struktur mikro pada area *Dies* yang mengalami deformasi akibat proses *forging* mengungkapkan hadirnya martensit halus sebagai fasa dominan. Pembentukan martensit halus ini terjadi karena pendinginan cepat di zona yang bersentuhan langsung dengan material panas selama proses *hammer forging*. Transformasi dari austenit ke martensit berlangsung secara tiba-tiba, sebagai respons material terhadap kondisi termal dan mekanik yang ekstrem. Karakteristik martensit halus mencerminkan perubahan mikrostruktur akibat tingginya beban tumbukan. Beban ini berasal dari gaya pukulan berulang antara material kerja dan permukaan *Dies*, yang memicu deformasi plastis lokal sekaligus peningkatan kekerasan pada permukaan. Fenomena ini dikenal sebagai *strain hardening*, di mana pembentukan martensit menghasilkan struktur yang sangat keras namun cenderung getas. Perubahan dalam struktur mikro ini menunjukkan bahwa material pada area tersebut telah mengalami kerja dingin lokal serta akumulasi tegangan secara terus-menerus, yang dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko munculnya retakan mikro dan keausan dini. Meski martensit halus mampu memberikan kekuatan tekan tinggi, sifatnya kurang tahan terhadap tegangan tarik atau gesekan berulang, terutama pada kondisi suhu tinggi. Keberadaan martensit halus di area deformasi mengisyaratkan adanya tekanan kerja berlebih pada permukaan cetakan *Dies*, yang dapat

menjadi tanda awal potensi kegagalan material. Untuk mencegah kerusakan lebih lanjut, diperlukan evaluasi terhadap parameter proses *forging*, perlakuan panas, serta penggunaan material atau pelapisan permukaan yang lebih sesuai.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Dies hammer forging pada produksi *under bracket* mengalami kerusakan akibat kombinasi beban mekanis tinggi dan suhu ekstrem. Analisis mikrostruktur menunjukkan adanya martensit halus di permukaan serta martensit-bainit yang lebih rapuh di bagian dalam, menyebabkan penurunan ketangguhan material. Untuk meningkatkan umur pakai *Dies*, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada material alternatif seperti baja perkakas H13 yang dimodifikasi dengan paduan Nb/V, atau baja berbasis *Powder Metallurgy* (PM) seperti ASP® 2030. Pendekatan ini diharapkan mampu mengurangi keausan, retak termal, dan kegagalan dini, sekaligus mendukung efisiensi serta daya saing industri manufaktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Akademik dan tantangan penelitian, kami menyadari sepenuhnya bahwa capaian ini tidak mungkin terwujud tanpa dukungan penuh dari Program Studi Teknik Mesin Universitas Pamulang Kampus Serang. Oleh karena itu, dengan penuh hormat, kami ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam. Selama proses penelitian ini, kami merasakan langsung bagaimana atmosfer akademik yang dibangun oleh Prodi Teknik Mesin Universitas Pamulang Serang benar-benar mendorong tumbuhnya karya inovatif

REFERENSI

- [1] N. Wagner, R. Tehel, C. Naumann, J. Regel, and M. Dix, "Thermal and mechanical load on the die clamping system in the *forging hammer*," in *Materials Research Proceedings*, Association of American Publishers, 2025, pp. 878–888. doi: 10.21741/9781644903599-94.
- [2] M. Oechsner, J. Wied, and J. Stock, "Influence of machine hammer peening on the tribology of sheet forming," in *Advanced Materials*

- Research*, Trans Tech Publications Ltd, Aug. 2014, pp. 397–405. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.966-967.397.
- [3] L. Achim Buchholz, “Hammer,” Aug. 2003.
- [4] Adin, “Analisa Kerusakan Dies Hammer *Forging* Material Skt4 Untuk Proses Produksi Under Bracket,” vol. 3, no. 1, Apr. 2020.
- [5] T. G. dos Santos, A. Rosiak, D. P. Wermuth, and L. Schaeffer, “Image Analysis Applied to Monitoring the Hot Open Die *Forging* Process with Drop Hammer,” *Advances in Materials Science*, vol. 25, no. 1, pp. 37–50, Mar. 2025, doi: 10.2478/adms-2025-0002.
- [6] L. N. López De Lacalle, A. Lamikiz, J. A. Sánchez, and J. L. Arana, “Improving the surface finish in high speed milling of stamping Dies,” Aug. 2002.
- [7] Hans W. Haller, “The Force in a Die *Forging* Hammer,” Nov. 1983.
- [8] T. Gde and T. Nindhia, “Studi Struktur mikro Silikon dalam Paduan Aluminium-Silikon pada Piston dari Berbagai Merek Sepeda Motor,” 2010.
- [9] Bleicher, “Hammer Drill,” Jan. 1988.
- [10] A. Alhamidi, M. Fitrullah, and M. Dewi, “Evolusi Mikrostruktur Paduan Al 6061 Hasil Proses Canai Dingin Terhadap Sifat Mekanik,” Jun. 2016.
- [11] J. Wied, J. Scheil, M. Klamser, and C. Berger, “Impact experiments and finite element simulation of surface roughness reduction by machine hammer peening,” *Materwiss Werksttech*, vol. 42, no. 9, pp. 827–832, Sep. 2011, doi: 10.1002/mawe.201100768.
- [12] E. W. Setyowati, “Pengaruh Perubahan Mikrostruktur Beton Akibat Suhu Tinggi Terhadap Lebar Retak Balok Beton Bertulang,” May 2016.