

Contents list available at [Sinta](https://sinta)**ARMATUR**

: Artikel Teknik Mesin &amp; Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Analisis Penyimpangan Fasa dan Sifat Mekanik pada Baja Paduan Hasil Pengecoran Konvensional di Bengkel Tenayan Pekanbaru****Agung Laksono Yudho<sup>1\*</sup>, Farhan Anggriawan<sup>2</sup>**<sup>1\*</sup>Prodi Teknik Mesin, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No.5, Malang, Jawa Timur, Indonesia<sup>2</sup>Prodi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Riau, Jl. Tuanku Tambusai, Pekanbaru, Riau, Indonesia**ARTICLE INFO**

*Keywords:*  
*as-cast*  
*sand casting*  
*mechanical properties*  
*microstructures*

**ABSTRACT**

*This research addresses metallurgical deviations in engineering the microstructure of as-cast products caused by uncontrolled conventional melting and slow cooling rates in sand casting. This study aims to evaluate the phase deviation and mechanical properties of Fe-alloy specimens (SP1, SP2, and SP3) due to high Si content (1.970 - 2.130%). Characterization was performed via metallographic observation of dendritic morphology and flake graphite distribution, followed by Vickers hardness and tensile testing. The results reveal that high Si acts as a strong graphitizer, inducing abnormal flake graphite formation. Specimen SP2 exhibited the highest hardness ( $397.77 \pm 9.02$  HV) but lowest UTS of 149.06 MPa and 8.10 % elongation, triggering premature brittle fracture due to micro effects. Conversely, SP1 yielded the optimal mechanical performance with a UTS of 247.41 MPa and 17.30 % elongation, despite its lowest hardness ( $316.00 \pm 1.25$  HV). Conclusively, the conventional casting process led to severe phase deviations from the targeted DIN 17CrNiMo7-6 specification. This analysis demonstrates the critical impact of processing limitations on the final metallurgical characteristics of products fabricated by traditional casting methods.*

\*Corresponding author: [agung.laksono.2505168@students.um.ac.id](mailto:agung.laksono.2505168@students.um.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.11865>

Received 8 June 2026; Received in revised form 19 June 2026; Accepted 22 June 2026

Available online 1 September 2026

## Pendahuluan

Pengembangan komponen struktural berbasis besi cor dan baja dalam dunia manufaktur menuntut optimalisasi sifat mekanis yang presisi guna mengimbangi beban fisis operasional yang kompleks [1]. Karakteristik material hasil pengecoran konvensional sangat bergantung pada efisiensi formasi fasa selama proses pembekuan berlangsung di dalam cetakan [2]. Metode pengecoran cetakan pasir hingga saat ini masih menjadi pilihan utama industri komponen lokal karena efisiensi biaya dan fleksibilitas geometrisnya yang tinggi [3]. Kendati demikian, produk hasil pengecoran langsung tanpa perlakuan awal (*as-cast*) dari metode konvensional ini sering kali dihadapkan pada kendala klasika metalurgi, yaitu rendahnya homogenitas struktural akibat laju pendinginan yang lambat dan kurang seragam [4]. Fenomena pembekuan yang fluktuatif tersebut memicu pembentukan gradien mikrostruktur lokal serta memperbesar risiko munculnya cacat mikro berupa porositas maupun inklusi terak yang menurunkan performa mekanis material [5].

Untuk mengontrol perilaku fisik material, penambahan variasi unsur paduan menjadi solusi ilmiah yang paling aplikatif dalam memodifikasi karakteristik fasa yang terbentuk [6]. Kehadiran unsur pepaduan mampu mengubah morfologi serta mengontrol pertumbuhan fasa sekunder yang rigid di sekitar batas butir [7]. Namun, intervensi metalurgi ini memicu hubungan yang kontradiktif antara kekuatan mekanis permukaan dan elastisitas material secara keseluruhan [8]. Banyak industri berasumsi bahwa penambahan unsur pepaduan secara otomatis akan menghasilkan baja paduan sesuai standar, tanpa menyadari bahwa tingginya kadar pengotor seperti silikon akibat keterbatasan kontrol peleburan konvensional justru berpengaruh terhadap kekuatan dan kestabilan fasa [4]. Pada paduan besi cor dan baja paduan rendah, pembentukan fasa dendritik yang kaku berimplikasi langsung pada peningkatan ketahanan penetrasi lokal yang signifikan.

Namun di sisi lain berbanding terbalik dengan keuletannya [9]. Keberadaan fasa karbon berupa grafit serpihan (*flake graphite*) bertindak sebagai pendorong terbentuknya fasa getas yang memutus kontinuitas matriks logam, sehingga meningkatkan sensitivitas material terhadap akumulasi tegangan lokal dan memicu kegagalan patah getas dini (*brittle fracture*) [10].

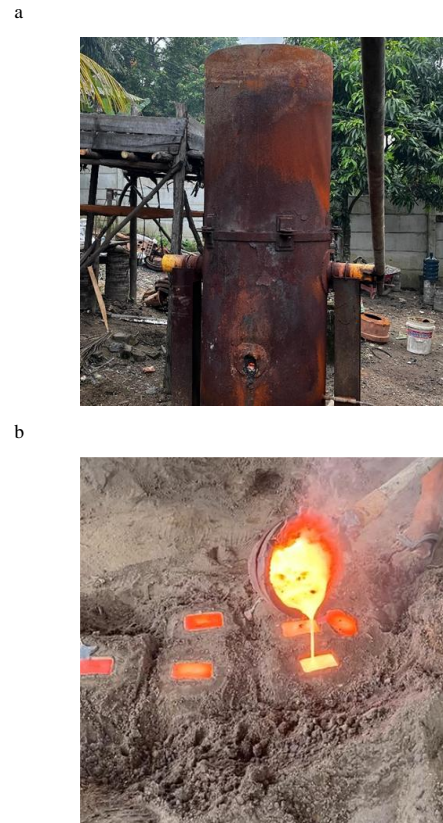
Hingga saat ini, penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada optimasi parameter pengecoran standar tanpa mengevaluasi anomali struktural akibat keterbatasan alat pada industri tradisional [11]. Modifikasi komposisi kimia tanpa disertai dengan homogenitas distribusi fasa terbukti memperlebar rentang standar deviasi nilai kekerasan permukaan akibat adanya segregasi unsur minor secara spasial [12]. Ketidakteraturan ini menjadi faktor krusial yang membatasi pergerakan dislokasi secara merata saat material menerima pembebanan tarik, sehingga menurunkan kontinuitas regangan dan mempercepat deformasi plastis kritis sebelum mencapai batas elongasi teoretisnya [13]. Pemetaan korelasi secara komprehensif antara morfologi struktur mikro, distribusi nilai kekerasan dan batas elongasi mekanis pada kondisi *as-cast* menjadi sangat penting untuk diteliti [14, 15]. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komprehensif mengenai anomali penyimpangan fasa akibat keterbatasan kontrol peleburan konvensional pada *foundry* skala UMKM, serta evaluasi kegagalan pemenuhan standar baja DIN 17CrNiMo7-6. Melalui pendekatan ini, dirumuskan masalah utama mengenai bagaimana pengaruh keterbatasan kontrol peleburan tradisional terhadap morfologi mikrostruktur dan terbentuknya fasa grafit serpih pada material *as-cast*, yang kemudian dikorelasikan secara spesifik dengan penurunan sifat mekanis berupa nilai kekerasan Vickers dan batas elongasi. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kegagalan proses pengecoran tradisional dan memberikan

implikasi praktis bagi industri pengecoran lokal terkait manajemen kualitas material.

### Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan baku utama berupa scrap besi (Fe) dengan total massa 1500 gr, di mana berdasarkan pengujian kuantitatif awal menggunakan x-ray fluorescence (XRF) diketahui memiliki kandungan karbon (C) aktual sebesar 0,20%. Total massa bahan baku tersebut dibagi ke dalam tiga siklus peleburan mandiri masing-masing sebesar 500 gr untuk menghasilkan tiga kelompok spesimen produk coran dalam kondisi tanpa perlakuan panas (*as-cast*), yaitu SP1, SP2 dan SP3. Bahan baku tersebut dilebur dan dipadukan dengan unsur kromium (Cr), nikel (Ni), molibdenum (Mo), silikon (Si), fosfor (P), mangan (Mn) dan sulfur (S). Untuk memenuhi berat *total charge* material sebesar 500 gr pada setiap siklus peleburan berdasarkan target komposisi standar DIN 17CrNiMo7-6, kuantitas massa masing-masing unsur yang dihitung dan dimasukkan terdiri dari: 9 gr (Cr); 8,5 gr (Ni); 2 gr (Si); 2 gr (Mn); 1,25 gr (Mo); 0,175 gr (S); 0,125 gr (P).

Proses peleburan material dilakukan menggunakan tungku krusibel tanpa kontrol gas pelindung yang berlokasi di Bengkel Pengecoran Logam Tenayan menggunakan metode pengecoran cetakan pasir konvensional. Proses peleburan dilakukan hingga mencapai temperatur aktual penuangan sebesar  $1500 \pm 15^\circ\text{C}$ , dilanjutkan dengan waktu penahanan selama 10 menit untuk memastikan homogenitas cairan logam sebelum dituangkan. Cairan logam kemudian dituangkan secara langsung ke dalam cetakan pasir dan dibiarkan mengalami proses pendinginan lambat secara alami di dalam cetakan hingga mencapai temperatur ruang [16]. Dokumentasi fasilitas peleburan dan proses penuangan logam di bengkel mitra ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses produksi di Bengkel Pengecoran Logam Tenayan: (a) tungku peleburan; (b) proses penuangan cairan baja ke cetakan pasir

Pengujian pertama yang dilakukan adalah uji komposisi kimia menggunakan XRF untuk mengetahui kadar aktual dari unsur pada setiap spesimen. Data aktual hasil XRF ini nantinya akan dibandingkan secara langsung untuk mengevaluasi kelayakan material hasil produksi terhadap standar acuan DIN 17CrNiMo7-6 yang ditunjukkan pada Tabel 1.

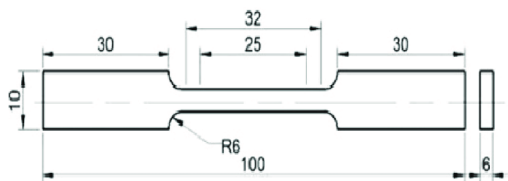
Tabel 1. Komposisi kimia unsur dengan standar acuan DIN 17CrNiMo7-6 berdasarkan parameter persentase berat (% wt)

No.	Unsur	Kandungan (%)
1	Cr	1.80
2	Ni	1.70
3	Mo	0.25
4	Fe	<i>balance</i>
5	Si	0.40
6	P	0.025
7	Mn	0.40
8	S	0.035

Setelah uji komposisi, pengujian dilanjutkan dengan uji tarik untuk mendapatkan nilai sifat mekanik berupa kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum dan persentase elongasi [17]. Untuk perhitungan nilai Modulus Elastisitas dari hasil pengujian tarik, persamaan matematika yang digunakan mengikuti hubungan linier Hukum Hooke antara tegangan dan regangan sesuai dengan Pers. 1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Di mana  $E$  adalah Modulus Elastisitas dengan satuan MPa,  $\sigma$  mewakili tegangan dalam satuan MPa dan  $\varepsilon$  menyatakan regangan tanpa satuan. Pengujian tarik dilakukan dengan jumlah replikasi sebanyak tiga kali ( $n=3$ ) untuk masing-masing kelompok spesimen (SP1, SP2 dan SP3) guna menjamin validitas data mekanis. Adapun dimensi spesimen uji tarik dapat dilihat pada Gambar 2. berikut ini.



Gambar 2. Dimensi spesimen uji tarik ASTM E8/E8M

Pengujian mekanik berikutnya adalah uji keras Vickers menggunakan mesin uji keras digital untuk mendapatkan nilai kekerasan secara langsung pada beberapa titik ukur spesimen [18]. Meskipun nilai kekerasan terbaca langsung pada monitor mesin, dasar perhitungan geometris nilai kekerasan Vickers tetap mengacu pada rasio beban uji terhadap luas permukaan bekas indentasi piramida intan bersudut siku  $\alpha$  sebesar  $136^\circ$  menggunakan rumus pada Pers. 2.

$$HV = \frac{2P \cdot \sin(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2} \quad (2)$$

Di mana  $HV$  menyatakan nilai kekerasan Vickers dalam satuan  $\text{kgf/mm}^2$ , lalu  $P$  mewakili beban tekan yang diberikan sebesar 1 kgf dan *dwelt time* selama 10 detik,  $\alpha$  merupakan sudut puncak indenter piramida intan sebesar  $136^\circ$  dan  $d$  melambangkan panjang rata-rata diagonal bekas penekanan dalam satuan milimeter (mm). Nilai  $d$  diperoleh dari rata-rata dua pengukuran diagonal belah ketupat hasil tapak tekan ( $d_1$  dan  $d_2$ ). Pengujian kekerasan dilakukan pada satu spesimen representatif dari masing-masing SP, dengan titik penekanan dilakukan secara acak sebanyak lima titik ( $n=5$ ) per spesimen untuk mendapatkan nilai rata-rata dan standar deviasi.

Tahap akhir adalah pengujian mikrostruktur menggunakan mikroskop optik untuk mengamati karakteristik fisik, batas butir, serta orientasi fasa yang terbentuk pada kondisi *as-cast* sesuai dengan panduan pengambilan gambar metalografi. Proses preparasi permukaan sampel untuk pengujian metalografi dilakukan melalui tahapan pengamplasan bertingkat dan pemolesan [19, 20]. Selanjutnya, untuk mengevaluasi secara objektif signifikansi perbedaan sifat mekanis yakni kekerasan Vickers dan kekuatan tarik antar kelompok spesimen akibat variasi distribusi fasa, analisis statistik dilakukan menggunakan metode *one-way analysis of variance* (ANOVA).

## Hasil dan Pembahasan

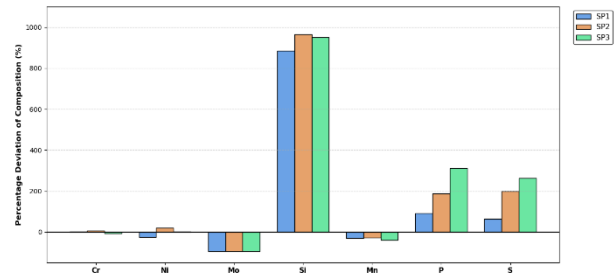
Pengujian spektrometer XRF dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur aktual SP1, SP2 dan SP3 hasil peleburan tradisional di Bengkel Pengecoran Logam Tenayan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data aktual komposisi kimia spesimen SP1, SP2 dan SP3 hasil produksi Bengkel Pengecoran Logam Tenayan berdasarkan parameter persentase berat (% wt)

No.	Unsur	SP1 (%)	SP2 (%)	SP3 (%)	Rata-rata
1	Cr	1.694	1.758	1.519	1.657
2	Ni	1.151	1.870	1.578	1.533
3	Mo	0.015	0.014	0.018	0.016
4	Fe	94.480	93.120	94.030	93.877
5	Si	1.970	2.130	2.100	2.210
6	P	0.048	0.072	0.103	0.074
7	Mn	0.495	0.507	0.421	0.474
8	S	0.041	0.075	0.091	0.069

Data pada Tabel 2 menunjukkan fluktuasi dan deviasi komposisi kimia yang signifikan pada produk akhir pengecoran. Kelompok unsur paduan utama seperti Cr (1,657 %) dan Ni (1,533 %) mampu mendekati rentang standar nominal. Meskipun demikian, deviasi lokal tetap terdeteksi pada kadar Ni spesimen SP1 (1,151 %) dan SP2 (1,870 %), mengindikasikan rendahnya homogenitas pencampuran fasa cair serta lemahnya kontrol temperatur di dalam tungku peleburan konvensional.

Namun, yang paling krusial dan menjadi hulu kegagalan proses dalam penelitian ini terletak pada ketidakstabilan akumulasi unsur Si serta menurunnya unsur Mo. Fenomena menurunnya kadar Mo ini disebabkan oleh tingginya titik lebur unsur tersebut 2623 °C, yang berada jauh di atas kapasitas termal tungku Bengkel Tenayan yakni  $\pm 1500$  °C. Akibatnya, paduan Mo gagal larut sempurna ke dalam cairan baja dan ikut terbuang bersama *slag* sebelum proses penuangan. Seluruh spesimen secara aktual memiliki kandungan Si yang sangat tinggi, yaitu berkisar antara 1,970% hingga 2,130% dengan nilai rata-rata mencapai 2,210%. Adapun deviasi komposisi unsur paduan dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.

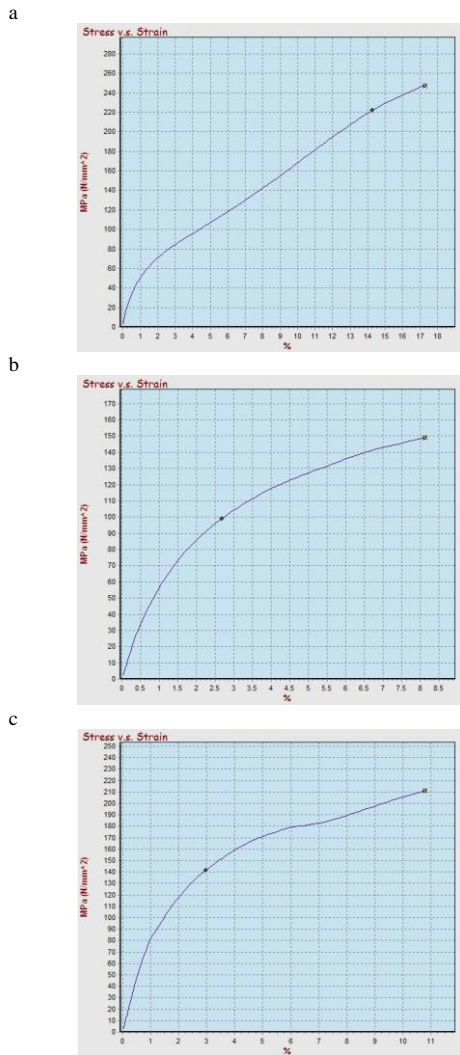


Gambar 3. Grafik deviasi komposisi unsur paduan pada SP1, SP2 dan SP3

Jika dikorelasikan dengan profil persentase deviasi relatif pada Gambar 3, kadar Si ini telah melonjak ekstrem dengan nilai rata-rata persentase pada paduan 2,210 % dan persentase deviasi menembus angka  $> +880$  %, di atas ambang batas maksimal spesifikasi baja paduan rendah yakni  $\leq 0,40$  % Si. Di saat yang bersamaan, unsur Mo selaku agen penguat utama mengalami defisit kritis dengan rata-rata kandungan aktual hanya sebesar 0,016% dengan deviasi negatif mendekati -94,03 %. Kelebihan kandungan Silikon yang masif ini mengubah termodinamika solidifikasi material di dalam cetakan pasir.

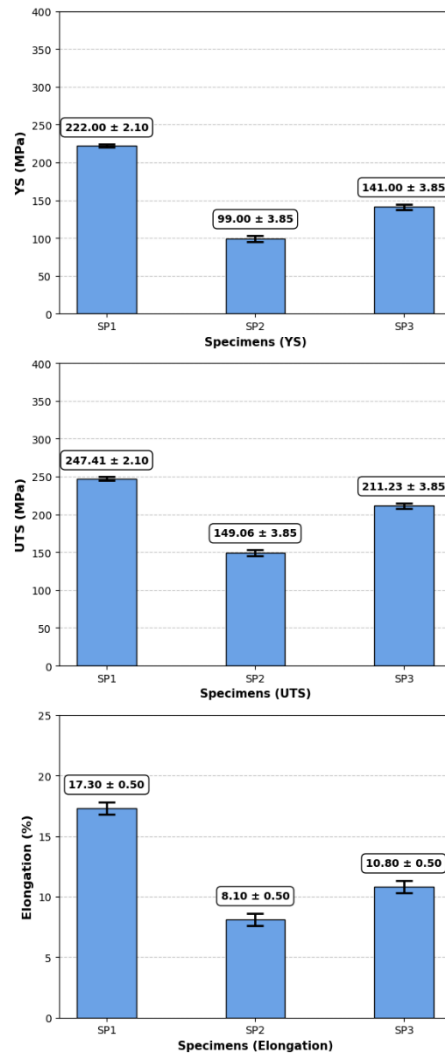
Sebaliknya, akumulasi unsur pengotor terdeteksi cukup tinggi. Kadar Si dengan rata-rata 2,210 % mengindikasikan kontaminasi silika akibat erosi refraktori dinding tungku maupun reaksi cairan logam dengan cetakan pasir. Tingginya kadar P (0,074 %) dan S (0,069 %) merefleksikan rendahnya kemurnian bahan baku *scrap* serta dampak dari paparan atmosfer luar akibat metode peleburan terbuka.

Setelah karakterisasi komposisi kimia selesai dievaluasi, analisis dilanjutkan pada karakteristik mekanik material melalui hasil pengujian tarik. Berdasarkan kurva tegangan-regangan pada Gambar 4, terlihat perbedaan profil deformasi yang cukup signifikan di antara ketiga spesimen pilihan.



Gambar 4. Kurva tegangan-regangan hasil pengujian tarik: (a) SP1; (b) SP2; (c) SP3

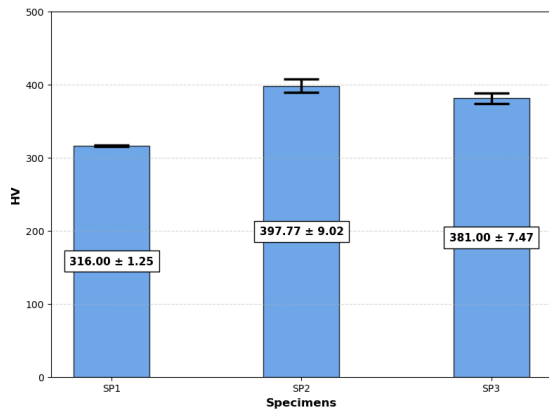
Nilai kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum dan persentase elongasi dari ketiga kelompok spesimen disajikan secara komprehensif pada Gambar 5. Transformasi penyajian data menjadi grafik batang untuk mempermudah evaluasi komparatif sifat mekanik produk coran hasil replikasi ( $n=3$ )



Gambar 5. Grafik distribusi nilai uji tarik

Spesimen SP1 menunjukkan performa mekanik paling optimal dengan kekuatan tarik maksimum (UTS) mencapai  $247,41 \pm 2,10$  MPa, batas elongasi sebesar  $17,30 \pm 0,50$  % dan titik luluh (YS) pada tegangan  $222,00 \pm 2,10$  MPa. Profil kurva kontinu pada SP1 mengindikasikan kemampuan menahan beban deformasi plastis yang seragam. Sementara itu, spesimen SP2 mengalami penurunan kekuatan mekanik drastis dengan UTS sebesar  $149,06 \pm 3,85$  MPa, elongasi hanya  $8,10 \pm 0,50$  % dan YS lebih awal pada tegangan  $99,00 \pm 3,85$  MPa, menandakan sifat material yang jauh lebih getas. Pada spesimen SP3, karakteristik penarikan berada di fase menengah dengan UTS sebesar  $211,23 \pm 3,85$  MPa, elongasi sebesar  $10,80 \pm 0,50$  % dan YS teramat pada tegangan  $141,00 \pm 3,85$  MPa.

Data distribusi nilai kekerasan pada masing-masing spesimen beserta nilai simpangan bakunya disajikan secara grafis pada Gambar 6.

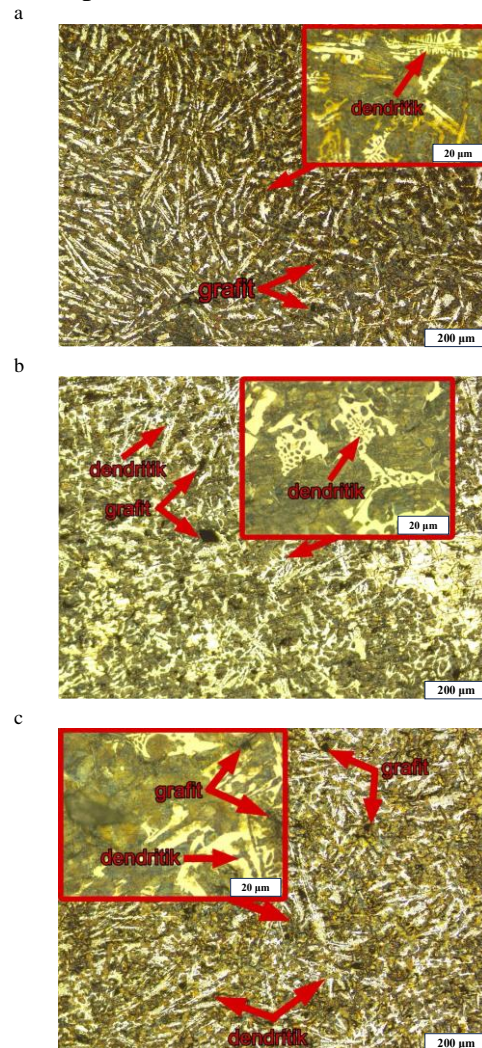


Gambar 6. Grafik distribusi nilai kekerasan Vickers

Hasil pengujian menunjukkan variasi nilai kekerasan yang signifikan di antara ketiga spesimen. Spesimen SP2 mencatatkan nilai kekerasan tertinggi sebesar  $397,77 \pm 9,02$  HV, namun berbanding terbalik dengan sifat uletnya di mana kapasitas elongasinya jatuh ke angka minimum (8,10 %). Spesimen SP3 berada pada fase intermediat dengan nilai kekerasan rata-rata  $381,00 \pm 7,47$  HV dan sebaran data yang berfluktuasi lebar akibat ketidakseragaman laju pendinginan lokal cetakan pasir. Sebaliknya, spesimen SP1 menghasilkan nilai kekerasan paling rendah yaitu  $316,00 \pm 1,25$  HV dengan tingkat homogenitas struktural terbaik dengan simpangan baku minimum.

Analisis metalografi pada Gambar 7 mengungkap adanya anomali metalurgi yang signifikan pada hasil coran spesimen SP1, SP2 dan SP3. Meskipun awalnya ditargetkan sebagai baja paduan rendah DIN 17CrNiMo7-6, struktur mikro yang terbentuk secara dominan justru menunjukkan jaringan dendritik yang disertai oleh fasa grafit serpih. Secara teoretis, fasa grafit bebas tidak dapat terbentuk pada baja paduan rendah yang berspesifikasi karbon rendah. Namun, fenomena ini terjadi akibat tingginya kandungan Si yang mencapai ~2,210 % pada produk pengecoran konvensional yang

memicu segregasi karbon dari matriks besi selama proses solidifikasi lambat di dalam cetakan pasir.

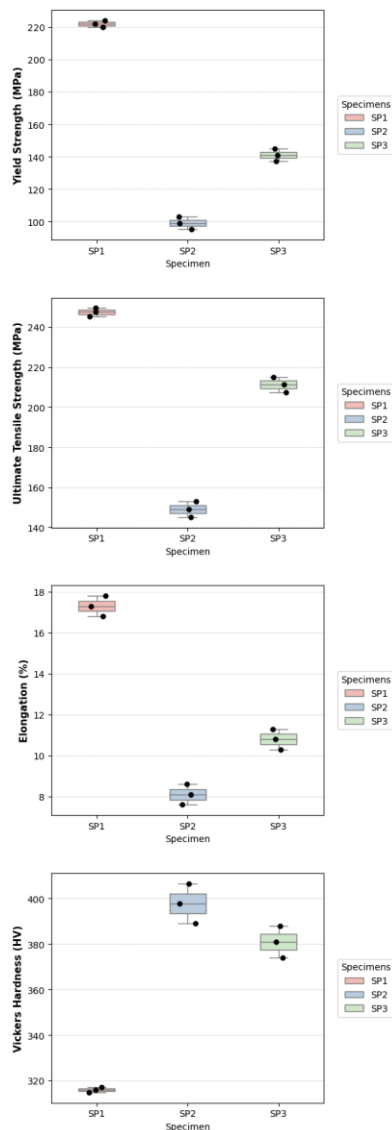


Gambar 7. Struktur mikro paduan baja: (a) SP1; (b) SP2; (c) SP3

Dalam metalurgi, morfologi dan pola distribusi grafit bertindak sebagai konzentator tegangan internal yang memicu perapuhan material. Pada spesimen SP1 jaringan dendritik yang terbentuk relatif halus dengan sebaran grafit serpihan, sehingga meminimalkan akumulasi tegangan lokal dan mempertahankan nilai elongasi tertinggi (17,30 %). Sebaliknya, pada spesimen SP2 terjadi pengerasan permukaan masif akibat jaringan dendritik tebal yang kaku di sekitar kluster grafit, mendongkrak kekerasan hingga level tertinggi ( $397,77 \pm 9,02$  HV). Namun, batas fasa rigid tersebut menjadi jalur kritis pembentukan retak mikro yang merambat

cepat tanpa hambatan deformasi, memicu patah getas dini. Sementara itu, spesimen SP3 memperlihatkan struktur transisi berupa pertumbuhan jaringan dendritik acak dengan orientasi grafit tidak beraturan, yang mendasari melebarnya rentang standar deviasi nilai kekerasannya ( $381,00 \pm 7,47$  HV).

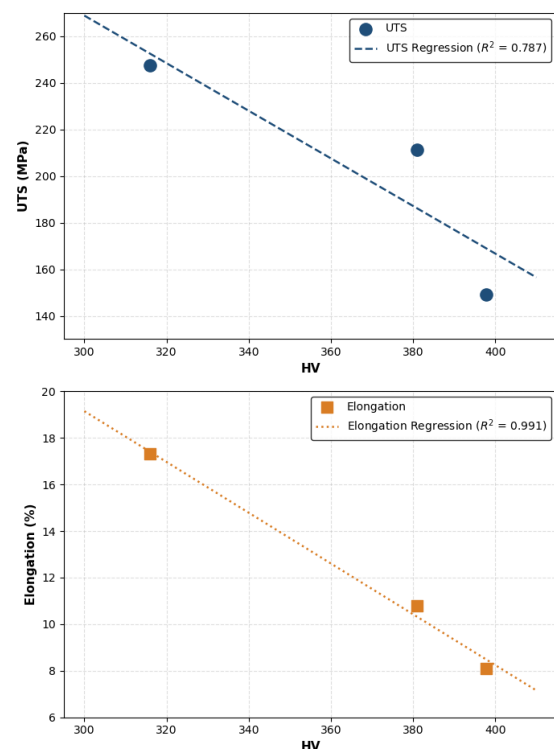
Sebelum memodelkan hubungan korelatif kuantitatif antar-parameter mekanis, validitas dan signifikansi perbedaan data fisik di antara ketiga kelompok spesimen dievaluasi menggunakan metode *one-way* ANOVA. Berdasarkan visualisasi sebaran data pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik *multi-panel* sebaran data karakteristik mekanis hasil analisis *one-way* ANOVA ( $\rho < 0,001$ )

Seluruh parameter mekanis yang diuji meliputi YS, UTS, elongasi dan kekerasan Vickers menunjukkan pemisahan kluster data distribusi antar-spesimen tanpa adanya tumpang tindih. Hasil uji ANOVA mengonfirmasi bahwa seluruh variasi performa ini signifikan secara nyata pada *confidence interval* ( $\rho < 0,001$ ). Temuan ini membuktikan secara ilmiah bahwa perbedaan nilai mekanis antar-produk bukan merupakan fluktuasi acak akibat error pengukuran, melainkan representasi valid dari dampak keragaman fasa mikrostruktur akibat variasi kandungan unsur Si sebagai pelopor terbentuknya fasa getas dan rapuh.

Untuk memetakan hubungan korelatif kuantitatif fisis di antara parameter mekanis material hasil coran konvensional, dilakukan analisis regresi linear berdasarkan data valid yang telah diverifikasi oleh uji statistik sebelumnya yang dapat dilihat pada Gambar 10 di bawah ini.



Gambar 9. Grafik analisis regresi linear korelasi sifat mekanis spesimen: *Vickers Hardness* vs UTS dan *Vickers Hardness* vs *Elongation*.

Berdasarkan hasil pemodelan linear, hubungan antara kekerasan fisik dengan ambang UTS menghasilkan tren korelasi negatif (*inverse proportionality*) dengan

koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,787. Pola penurunan yang jauh lebih linear terlihat pada hubungan elongasi terhadap kekerasan dengan nilai  $R^2$  mencapai 0,991. Secara fenomena metalurgi, kedua grafik regresi ini membuktikan secara statistik bahwa peningkatan kekerasan fisik spesimen dari 316,00 HV (SP1) hingga memuncak pada 397,77 HV (SP2) dikompensasi secara langsung dan linear oleh turunnya performa tarik serta elastisitas material. Pola regresi ini secara mutlak mengonfirmasi perilaku mekanis spesifik dari struktur material kaku dan getas yang mendekati besi cor kelabu kelas rendah, di mana fasa matriks yang mengeras mempercepat akumulasi konsentrasi tegangan internal pada ujung fasa grafit serpih dan memicu kegagalan patah getas dini secara linear.

### Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan adanya hubungan terbalik yang kuat antara sifat mekanik spesimen, yang dikendalikan oleh pertumbuhan fasa dendritik dan pola sebaran grafit sebagai konsentrator tegangan internal. Spesimen SP2 mencatatkan kekerasan tertinggi ( $397,77 \pm 9,02$  HV) namun memiliki elongasi minimum ( $8,10 \pm 0,50$  %). Sebaliknya, spesimen SP1 menghasilkan kekerasan terendah ( $316,00 \pm 1,25$  HV) dengan kapasitas elongasi tertinggi ( $17,30 \pm 0,50$  %), sementara SP3 berada pada fase intermediet. Berdasarkan evaluasi tersebut, produk pengecoran Bengkel Tenayan tidak layak dan gagal memenuhi spesifikasi baja paduan rendah kekuatan tinggi DIN 17CrNiMo7-6. Suhu tungku ( $1500$  °C) gagal melarutkan unsur Mo, serta kontaminasi masif unsur Si akibat kualitas cetakan pasir yang buruk hingga mencapai rata-rata  $2,210$  %. Akibatnya, terjadi pergeseran fasa metalurgi total dari kategori baja paduan menjadi karakteristik fisik besi cor kelabu.

Implikasi praktis bagi industri pengecoran lokal Tenayan menunjukkan bahwa metode peleburan tradisional memiliki limitasi kritis dalam mereplikasi

baja paduan standar internasional. Sebagai langkah solutif, industri lokal wajib beralih ke teknologi tungku induksi serta kualitas cetakan pasir yang lebih baik. Untuk menjamin stabilitas temperatur, homogenitas unsur paduan, serta menjaga kemurnian hasil. Untuk penelitian lanjutan disarankan melakukan kontrol ketat serta menerapkan perlakuan panas guna mengeliminasi porositas, menghomogenkan matriks dan merekayasa grafit untuk meningkatkan ketangguhan material.

### Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Farhan Anggriawan yang telah membantu secara teknis saat melakukan penelitian di lapangan.

### Referensi

- [1] G. Mahesh, K. M. M. Kumar, S. B. Raja, N. Baskar, and M. Ganesan, "Experimental Investigation and Optimization of Hardness in Sand Casting Process by Using the Design of Experiments Approach," *Appl. Math. Inf. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 931–938, 2017, doi: 10.18576/amis/110334.
- [2] J. Sunte, A. Kolekar, and V. Waghmare, "The Fracture Mechanics in Engineering Materials," *Int. J. Sci. Res. Mech. Mater. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 123–129, 2022.
- [3] V. A. Khorami, "Interfacial Heat Transfer Coefficient Between Sand Molds and Cast Steel: Recent Advances in Identification, Modeling, and Control," *Eng. Arch.*, pp. 1–10, 2025, doi: 10.31224/6186.
- [4] A. Yulianto, R. Soenoko, and W. Suprpto, "Effect of cooling rate on microstructure and hardness in grey cast iron casting process," *Acta Metall. Slovaca*, vol. 27, no. 3, pp. 127–132, 2021, doi: 10.36547/ams.27.3.996.
- [5] C. E. Hontong, J. M. Mawa, and W. S. Slat, "Analisis Pengaruh Unsur Paduan Terhadap Kekerasan dan Ketangguhan

- Baja AISI 4340,” *J. Mesin Wawasan Nusant.*, vol. 1, no. 1, pp. 130–134, 2025.
- [6] A. Basso, A. Eres-castellanos, D. Sanmartin, A. Jimenez, and F. G. Caballero, “Effect of Microsegregation and Bainitic Reaction Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a High-Carbon and High-Silicon Cast Steel,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 11, no. 220, 2021, doi: 10.3390/met11020220.
- [7] Z. Chen *et al.*, “Overcoming strength-toughness trade-off in a eutectic high entropy alloy by optimizing chemical and microstructural heterogeneities,” *Commun. Mater.*, vol. 5, no. 12, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1038/s43246-024-00450-2.
- [8] M. Peng, H. Liu, Y. Xuan, X. Liu, and L. Xu, “Evaluation of the microstructural and mechanical properties of ductile cast iron and alloy steel dissimilar materials welded by magnetically impelled arc butt,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 4623–4635, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.10.059.
- [9] X. Ding, X. Luo, X. Kong, Z. Gu, and X. Hou, “Micromechanical investigation of fracture behaviour in compacted graphite iron using the discrete element method,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 41, no. July 2025, pp. 511–522, 2026, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.12.047.
- [10] Y. Han, C. Li, J. Ren, C. Qiu, Y. Zhang, and J. Wang, “Dendrite Segregation Changes in High Temperature Homogenization Process of As-cast H13 Steel,” *ISIJ Int. J.*, vol. 59, no. 10, pp. 1893–1900, 2019, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-148.
- [11] S. Caprili *et al.*, “ScienceDirect ScienceDirect Evaluation of mechanical characteristics of steel bars by non-destructive Vickers micro-hardness tests,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 44, no. 2022, pp. 886–893, 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.01.115.
- [12] C. Slater, B. Bandi, P. Dastur, and C. Davis, “Segregation Neutralised Steels: Microstructural Banding Elimination from Dual-Phase Steel Through Alloy Design Accounting for Inherent Segregation,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 53, no. 6, pp. 2286–2299, 2022, doi: 10.1007/s11661-022-06674-6.
- [13] D. M. Stefanescu, *Science and Engineering of Casting Solidification*. Alabama: Springer Science+Business Media New York, 2002.
- [14] W. Yang, “Solidification and Casting of Metals and Alloys,” *Metals (Basel)*, 2025, doi: 10.3390/met15010087.
- [15] E. Widiyanto, A. Santosa, V. Nabunome, P. Studi, T. Mesin, and U. S. Karawang, “Sintesis dan Karakterisasi Sifat Mekanik Cetakan Pasir Pengecoran Logam Berbasis Pasir Recycle dengan Penambahan Resin,” *LONTAR J. Tek. Mesin UNDANA*, vol. 04, no. 02, 2017.
- [16] V. Naubnome, A. Santosa, and E. Widiyanto, “Synthesis and Characterization of Mechanical Properties of Sand Mold Metal Casting Based on Recycle Sand with Addition of Resin,” *Pros. SNTTM*, pp. 78–81, 2018.
- [17] ASTM, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,” 2013.
- [18] ASTM, “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials,” 2017.
- [19] ASTM, “Standard Guide for Reflected-Light Photomicrography,” 2017.
- [20] ASTM, “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys,” 2015.