JURNAL LOCUS: Penelitian & Pengabdian
Volume 5 No. 9 September 2026, pp 7694-7706
E-ISSN 2829-7334
DOI: 10.58344/locus.v5i9.6368

Pengaruh Variasi Temperatur *Normalizing* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Paduan *Silicon Manganese* (SiMn)

Ferry Wahyu Ramadhan*, Margono Sugeng
Universitas Dian Nusantara, Indonesia
Email: ferrywahyu366@gmail.com*, margono.sugeng@undira.ac.id

Keywords:
Silicon Manganese (SiMn); Heat Treatment; Microstructure; Metallographic Microscopy; Material Hardness.

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Riviera Publishing

Abstract

Silicon Manganese (SiMn) alloy is important as a deoxidizer and alloying material in steelmaking; however, melting and casting can produce heterogeneous microstructures that affect its mechanical properties. This study aimed to analyze the effects of normalizing temperature variations on the microstructure, hardness, and estimated tensile strength of a SiMn alloy. A quantitative experimental study was conducted using an untreated specimen and specimens normalized at 700°C, 800°C, and 900°C with a holding time of 15 minutes followed by air cooling. Microstructures were examined using a metallographic microscope at 200× and 500× magnifications, while hardness was measured using the Micro Vickers method under a 300-gf load for 10 seconds at five indentation points. Ultimate Tensile Strength (UTS) was estimated using an empirical hardness-based equation. The observations showed that increasing the normalizing temperature produced a progressively more homogeneous microstructural distribution. Average hardness increased from 478.0 HV0.3 at 700°C to 574.8 HV0.3 at 800°C and 621.2 HV0.3 at 900°C. Estimated UTS values also increased to 1,577.4 MPa, 1,896.8 MPa, and 2,050.0 MPa, respectively. These improvements indicated that higher temperatures promoted atomic diffusion and structural homogenization more effectively. Therefore, normalizing at 900°C produced the best microstructural characteristics and mechanical properties within the investigated temperature range.

Kata Kunci:
Silicon Manganese (SiMn); Heat Treatment; Struktur Mikro; Mikroskop Metalografi; Kekerasan Material.

Abstrak

Paduan *Silicon Manganese* (SiMn) berperan penting sebagai deoksidator dan unsur paduan dalam pembuatan baja, tetapi proses peleburan dan pengecoran dapat menghasilkan struktur mikro tidak homogen yang memengaruhi sifat mekaniknya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur *normalizing* terhadap struktur mikro, kekerasan, dan estimasi kekuatan tarik paduan SiMn. Penelitian eksperimental kuantitatif dilakukan menggunakan spesimen tanpa perlakuan panas serta spesimen yang dinormalisasi pada temperatur 700°C, 800°C, dan 900°C dengan holding time 15 menit dan pendinginan udara. Struktur mikro diamati menggunakan mikroskop metalografi pada perbesaran 200× dan 500×, sedangkan kekerasan diuji menggunakan metode Micro Vickers dengan beban 300 gf selama 10 detik pada lima titik indentasi. Nilai Ultimate Tensile Strength (UTS) diestimasi melalui persamaan empiris berdasarkan kekerasan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *normalizing*

menghasilkan distribusi struktur mikro yang semakin homogen. Kekerasan rata-rata meningkat dari 478,0 HV0.3 pada 700°C menjadi 574,8 HV0.3 pada 800°C dan 621,2 HV0.3 pada 900°C. Estimasi UTS juga meningkat berturut-turut menjadi 1.577,4 MPa, 1.896,8 MPa, dan 2.050,0 MPa. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa temperatur yang lebih tinggi mendukung difusi atom dan homogenisasi struktur serta mengurangi ketidakseragaman sifat material akibat proses solidifikasi selama pengecoran. Dengan demikian, *normalizing* pada 900°C menghasilkan karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik terbaik dalam rentang temperatur yang diteliti.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang manufaktur dan metalurgi mendorong kebutuhan akan material yang memiliki sifat mekanik tinggi, seperti kekuatan, kekerasan, dan ketahanan aus. Salah satu material yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah paduan *Silicon Manganese* (SiMn). Paduan ini berperan sebagai deoxidizer dan unsur paduan pada proses pembuatan baja sehingga mampu meningkatkan kualitas material melalui perbaikan struktur mikro dan sifat mekaniknya (Callister & Rethwisch, 2018).

Karakteristik paduan SiMn tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi kimia, tetapi juga oleh proses manufaktur dan perlakuan panas (*heat treatment*). Material hasil peleburan dan pengecoran umumnya masih memiliki struktur mikro yang kurang homogen akibat proses solidifikasi, sehingga distribusi unsur paduan menjadi tidak merata dan memengaruhi sifat mekanik material (Ahmed, T., Hassan, E. A., & El-Fawakhry, 2019). Salah satu metode perlakuan panas yang banyak diterapkan pada material berbasis besi adalah *normalizing*, yaitu proses pemanasan material hingga di atas daerah kritis yang kemudian didinginkan di udara. Perlakuan tersebut bertujuan memperhalus ukuran butir, meningkatkan homogenitas struktur mikro, mengurangi tegangan sisa, serta memperbaiki sifat mekanik material (ASM International, 1991).

Sejumlah penelitian terdahulu yang terindeks dalam basis data ilmiah bereputasi telah menunjukkan pentingnya pengendalian proses produksi dan komposisi SiMn. Ghasemi (2014) melakukan penilaian termodinamika terhadap sistem biner Si–Mn dan menunjukkan bahwa stabilitas fasa sangat bergantung pada komposisi dan temperatur. Canaguier dan Tangstad (2020) meneliti reduksi terak SiMn pada temperatur antara 1.510°C dan 1.660°C serta mengidentifikasi mekanisme reduksi dua tahap, yaitu reaksi awal yang relatif lambat dan stabil yang kemudian diikuti oleh peningkatan laju reduksi secara cepat. Sementara itu, Zulhan et al. (2020) menunjukkan kelayakan teknis produksi ferro-silico-manganese dari bijih mangan dan terak peleburan tembaga dengan menekankan peran komposisi bahan baku serta kondisi reduksi. Penelitian-penelitian tersebut memberikan pengetahuan penting mengenai termodinamika, kinetika reduksi, dan proses produksi SiMn, tetapi lebih berfokus pada tahap peleburan daripada modifikasi struktur mikro dan kekerasan SiMn setelah pengecoran.

Kelompok penelitian lainnya telah membahas pengaruh perlakuan panas terhadap baja yang mengandung mangan atau silikon. Li et al. (2022) menemukan bahwa perlakuan pelarutan bertahap dapat mengubah struktur mikro, sifat mekanik, dan ketahanan aus abrasif tumbukan pada baja mangan tinggi. Penelitian terhadap baja austenitik mangan tinggi juga menunjukkan bahwa temperatur pemanasan memengaruhi pelarutan karbida, distribusi fasa, kekerasan, kekuatan, dan ketahanan aus. Selanjutnya, da Silva et al. (2026) meneliti proses *normalizing*

pada baja bantalan SAE 52100 termodifikasi Si–Mn yang mengandung sekitar 1,82% berat Si dan 1,00% berat Mn. Penelitian tersebut menghasilkan kekerasan rata-rata sekitar 496 HV setelah *normalizing*, disertai perubahan sifat tarik dan ketangguhan impak. Temuan tersebut membuktikan bahwa parameter perlakuan panas dapat mengendalikan hubungan antara struktur mikro dan sifat mekanik, tetapi penerapannya secara langsung pada paduan dengan kandungan sekitar 65% Mn dan 17% Si masih belum dapat dipastikan karena terdapat perbedaan yang sangat besar dalam komposisi kimia dan konstitusi fasa.

Kajian terdahulu memperlihatkan dua arah penelitian yang relatif terpisah. Penelitian yang secara langsung membahas SiMn umumnya berfokus pada reduksi bijih, kimia terak, kinerja tungku, kesetimbangan termodinamika, dan efisiensi produksi. Sementara itu, penelitian mengenai pengaruh perlakuan panas sebagian besar menggunakan baja dengan kandungan mangan dan silikon yang jauh lebih rendah. Penelitian yang secara sistematis mengevaluasi pengaruh perlakuan panas pascapengecoran dengan pendinginan udara pada berbagai temperatur terhadap struktur mikro dan kekerasan *Micro Vickers ferroalloy* SiMn karbon tinggi masih terbatas. Perbandingan antara SiMn tanpa perlakuan panas dan spesimen yang dipanaskan pada temperatur 700°C, 800°C, dan 900°C dengan waktu penahanan serta kondisi pendinginan yang sama juga belum banyak dilakukan. Perbedaan komposisi dan proses tersebut menjadi kesenjangan penelitian utama yang menyebabkan parameter perlakuan panas pada baja konvensional tidak dapat langsung diterapkan pada paduan SiMn hasil pengecoran.

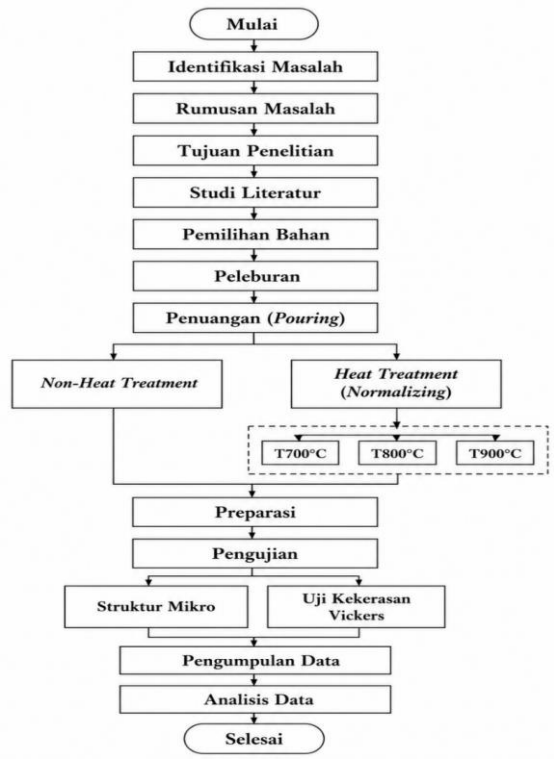
Penelitian ini penting dilakukan karena penggunaan asumsi yang tidak tepat mengenai respons perlakuan panas dapat menyebabkan penentuan parameter proses yang tidak sesuai dan interpretasi kinerja material yang kurang akurat. Temperatur yang mampu mendorong proses pemulihan, difusi, pelepasan tegangan sisa, atau transformasi fasa pada baja konvensional belum tentu memberikan respons yang sama pada *ferroalloy* dengan kandungan Mn dan Si yang tinggi. Sebaliknya, temperatur yang terlalu tinggi dapat memicu pertumbuhan butir, oksidasi, dekarburisasi, atau pembentukan fasa yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, respons aktual SiMn hasil pengecoran perlu ditentukan sebagai dasar empiris dalam pemilihan temperatur perlakuan panas. Penelitian ini juga relevan bagi industri pengecoran dan pengguna ferroalloy yang berupaya meningkatkan homogenitas material, mengendalikan variasi kekerasan, meminimalkan keretakan getas selama penanganan, dan mempertahankan konsistensi pelarutan paduan selama proses produksi baja.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian eksperimental secara langsung terhadap ferroalloy SiMn hasil pengecoran dengan kandungan sekitar 65% Mn dan 17% Si, bukan terhadap baja berbasis Fe yang hanya menggunakan SiMn sebagai unsur tambahan. Penelitian membandingkan kondisi tanpa perlakuan panas dengan tiga variasi temperatur *normalizing*, yaitu 700°C, 800°C, dan 900°C, dengan waktu penahanan selama 15 menit dan media pendinginan udara sebagai variabel yang dikendalikan. Pengamatan metalografi pada perbesaran 200× dan 500× diintegrasikan dengan pengujian kekerasan Micro Vickers pada lima titik indentasi untuk setiap kondisi. Pendekatan tersebut menghasilkan bukti komparatif mengenai perubahan struktur mikro dan kekerasan akibat perbedaan temperatur. Meskipun demikian, kekuatan tarik dalam penelitian ini diperoleh melalui konversi empiris dari nilai kekerasan sehingga harus diperlakukan sebagai estimasi dan tidak dapat sepenuhnya menggantikan hasil pengujian tarik secara langsung berdasarkan standar yang berlaku.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menjelaskan pengaruh variasi temperatur *normalizing* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik paduan SiMn hasil pengecoran. Secara khusus, penelitian ini diarahkan untuk membandingkan struktur mikro spesimen tanpa perlakuan panas dan spesimen yang telah diberi perlakuan panas; menentukan nilai kekerasan Micro Vickers setelah perlakuan pada temperatur 700°C, 800°C, dan 900°C; mengidentifikasi temperatur yang menghasilkan kombinasi homogenitas struktur mikro dan kekerasan terbaik dalam rentang pengujian; serta menjelaskan keterkaitan antara perubahan struktur mikro dan kekerasan material. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan bukti eksperimental bagi pengembangan kajian mengenai perlakuan panas pascapengecoran pada ferroalloy SiMn karbon tinggi. Secara praktis, hasilnya diharapkan menjadi acuan awal dalam menentukan parameter perlakuan panas dan meningkatkan konsistensi karakteristik material. Penelitian ini

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif yang bertujuan mengetahui pengaruh variasi temperatur *normalizing* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik paduan SiMn. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, proses peleburan, penuangan (*pouring*), perlakuan panas (*normalizing*), preparasi spesimen, hingga pengujian material, sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram Alir/Flowchart Penelitian
Sumber: Dokumentasi Peneliti (2026)

Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah temperatur *normalizing* (700°C, 800°C, dan 900°C). Variabel terikat meliputi struktur mikro dan nilai kekerasan microvickers. Variabel

kontrol meliputi komposisi paduan SiMn, suhu peleburan (±1800°C), suhu pouring (±1500°C), waktu penahanan (holding time) 15 menit, dan media pendinginan udara.

Bahan Penelitian

Bahan penelitian terdiri atas besi (Fe) sebagai unsur dasar, silikon (Si) sebagai deoksidator dan penguat, mangan (Mn) sebagai desulfurizer dan peningkat sifat mekanik, serta bahan cetakan untuk membentuk spesimen hasil pengecoran. Komposisi dasar paduan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Paduan SiMn

Unsur	Komposisi
Silikon (Si)	17%
Mangan (Mn)	65%
Karbon (C)	1,8%
Fosfor (P)	0,25%
Sulfur (S)	0,02%
Besi (Fe)	Balance

Sumber: PT Komatsu Indonesia (2025)

Prosedur Perlakuan Panas (*Normalizing*)

Spesimen hasil pengecoran diberi perlakuan panas *normalizing* pada variasi temperatur 700°C, 800°C, dan 900°C dengan holding time 15 menit dan media pendinginan udara, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Sebagai pembanding, disiapkan pula spesimen tanpa perlakuan panas (*Non Heat Treatment*/NT) untuk memperoleh data dasar mikrostruktur dan kekerasan material sebelum proses *normalizing*.

Tabel 2. Parameter *Heat Treatment (Normalizing*)

No	Kode Sampel	Temperatur Heat Treatment	Holding Time	Media Pendinginan
1	SiMn-NT	-	-	-
2	SiMn-T700	700°C	15 menit	Udara
3	SiMn-T800	800°C	15 menit	Udara
4	SiMn-T900	900°C	15 menit	Udara

Sumber: Dokumentasi Peneliti (2026)

Pengujian Material

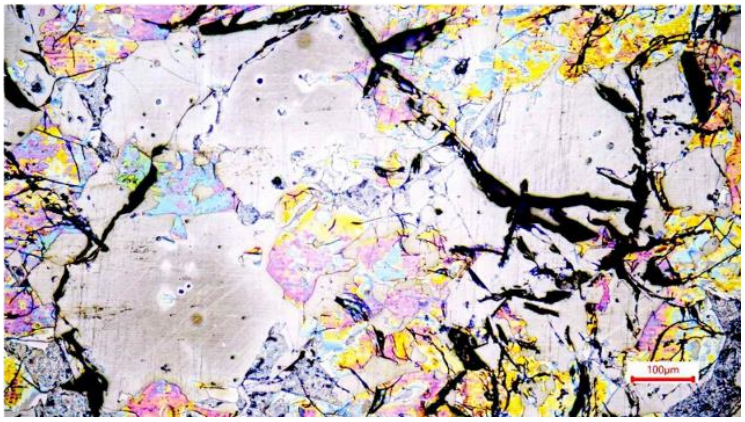
Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan Inverted Metallurgical Microscope Olympus BX41M dengan perbesaran 200× dan 500× mengacu pada standar ASTM E3-17 dan ASTM E407-20. Preparasi spesimen meliputi grinding, polishing, dan etsa menggunakan campuran asam hidrofluorat (HF) dan asam nitrat (HNO_3). Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan Matsuzawa MMT-X3B Digital Micro Hardness Tester mengacu pada standar ASTM E384-22 dengan beban 300 gf dan waktu pembebanan 10 detik pada lima titik indentasi setiap spesimen. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif untuk

mengetahui hubungan antara variasi temperatur *normalizing*, perubahan struktur mikro, dan sifat mekanik paduan SiMn. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) diestimasi berdasarkan hasil pengujian kekerasan menggunakan persamaan empiris σUTS (MPa) = 3,3 × HV.

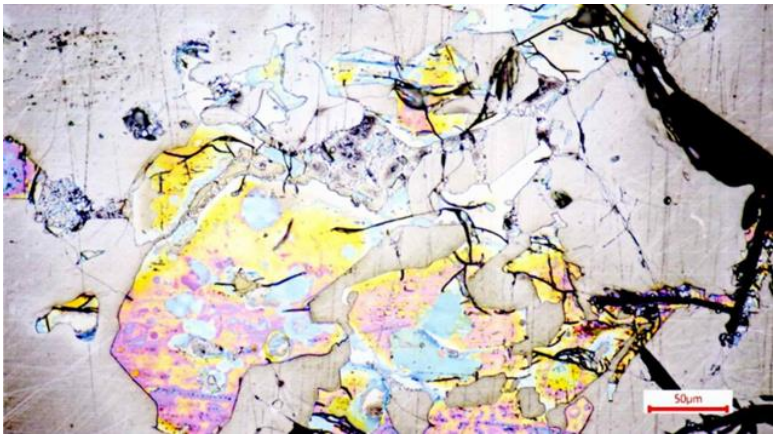
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan Struktur Mikro

Karakterisasi awal dilakukan terhadap spesimen *Non Heat Treatment* (NT), yaitu material hasil pengecoran tanpa perlakuan panas, sebagai data pembanding terhadap spesimen yang mengalami *normalizing*. Hasil pengamatan pada perbesaran 200× dan 500× (Gambar 2 dan Gambar 3) menunjukkan morfologi butir hasil solidifikasi pengecoran dengan batas-batas butir yang tersebar dan distribusi yang belum sepenuhnya homogen, disertai beberapa area gelap yang diduga merupakan batas butir, segregasi unsur paduan, atau cacat mikro akibat proses pembekuan logam cair.



Gambar 2. Struktur Mikro Spesimen *Non Heat Treatment* (NT) Perbesaran 200×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)

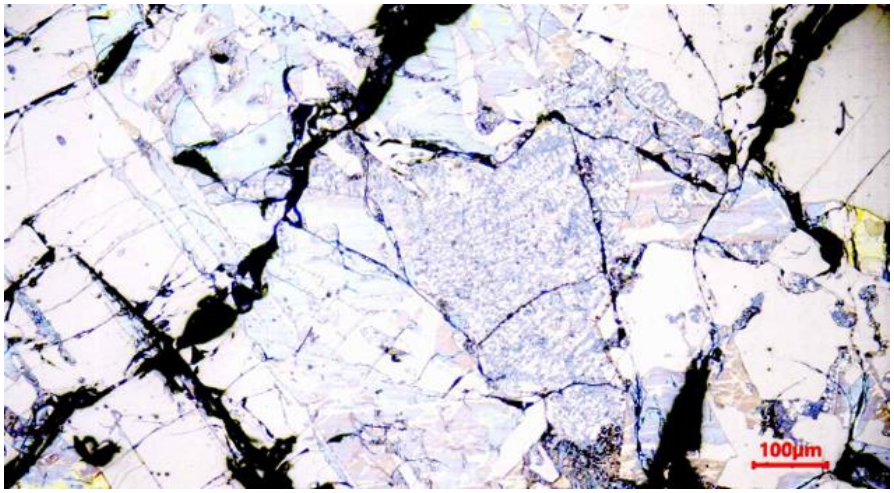


Gambar 3. Struktur Mikro Spesimen *Non Heat Treatment* (NT) Perbesaran 500×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)

Kondisi mikrostruktur awal ini sejalan dengan hasil pengujian kekerasan spesimen NT yang menunjukkan variasi cukup besar antar titik indentasi (496–971 HV), yang mengindikasikan keberadaan fasa keras seperti martensit atau bainit lokal pada daerah dengan pendinginan lebih cepat, sedangkan daerah dengan kekerasan lebih rendah didominasi oleh

ferrite dan pearlite kasar. Data ini menjadi acuan dalam menganalisis perubahan struktur mikro dan sifat mekanik akibat proses *normalizing* pada variasi temperatur 700°C, 800°C, dan 900°C.

Pada temperatur *normalizing* 700°C, struktur mikro masih memperlihatkan butiran berukuran relatif besar dengan batas butir yang jelas dan distribusi fase yang belum merata, menunjukkan bahwa proses difusi baru mulai berlangsung dan homogenisasi belum terjadi secara sempurna (Gambar 4 dan Gambar 5).



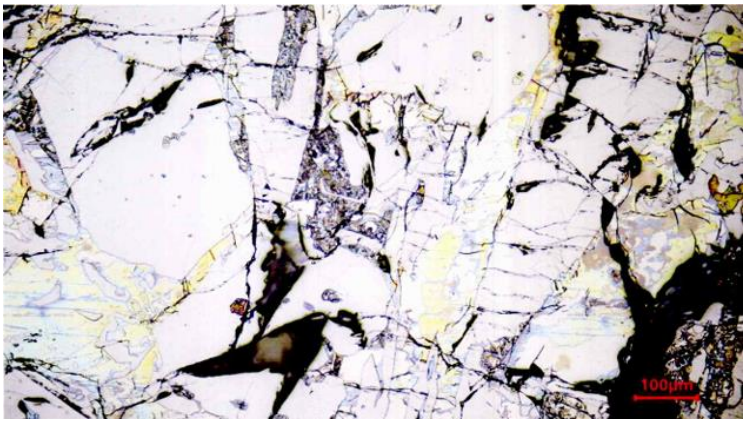
Gambar 4. Struktur Mikro Spesimen *Normalizing* 700°C Perbesaran 200×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)



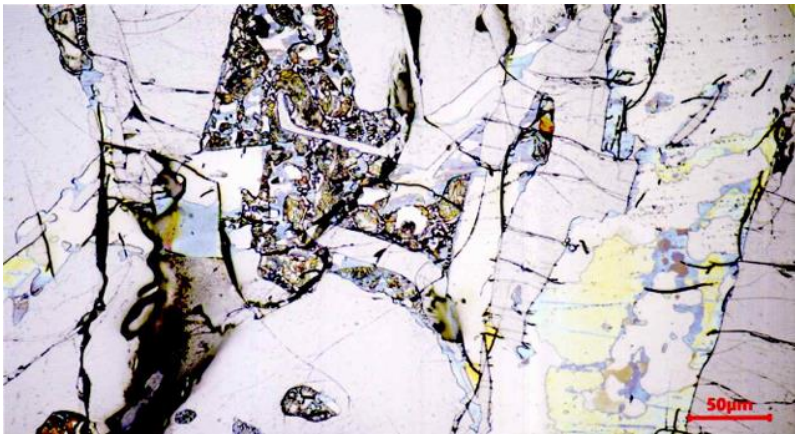
Gambar 5. Struktur Mikro Spesimen *Normalizing* 700°C Perbesaran 500×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa temperatur 700°C merupakan tahap awal terjadinya perubahan mikrostruktur akibat proses *normalizing*, sehingga struktur mikro yang masih relatif kasar diperkirakan memberikan nilai kekerasan yang belum optimal dibandingkan spesimen pada temperatur yang lebih tinggi.

Peningkatan temperatur menjadi 800°C meningkatkan mobilitas atom sehingga homogenisasi mikrostruktur berlangsung lebih baik. Distribusi butir tampak lebih seragam dengan daerah gelap yang tersebar lebih merata, menandakan proses difusi atom yang lebih efektif (Gambar 6 dan Gambar 7).



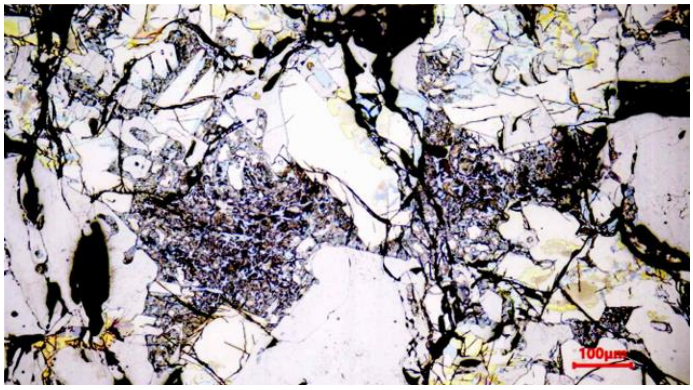
Gambar 6. Struktur Mikro Spesimen Normalizing 800°C Perbesaran 200×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)



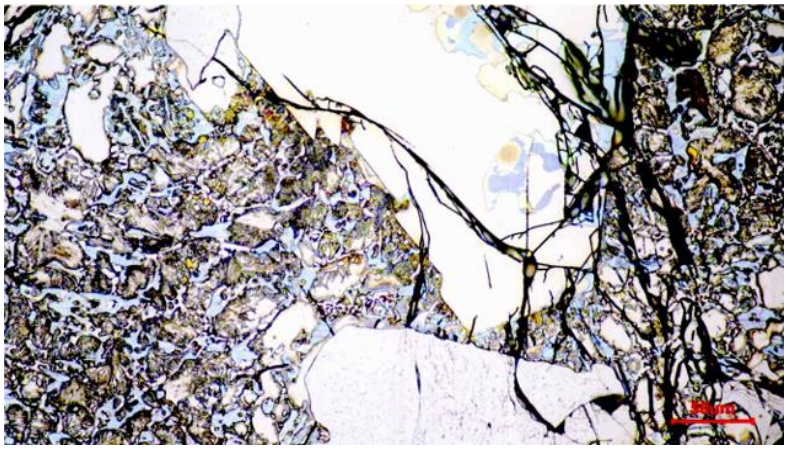
Gambar 7. Struktur Mikro Spesimen Normalizing 800°C Perbesaran 500×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)

Perubahan homogenitas struktur mikro pada temperatur ini diperkirakan meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi sehingga nilai kekerasan material cenderung mengalami peningkatan dibandingkan spesimen pada temperatur 700°C.

Pada temperatur 900°C, difusi atom berlangsung lebih intensif sehingga distribusi fase menjadi semakin homogen, meskipun temperatur yang lebih tinggi juga berpotensi meningkatkan kemungkinan pertumbuhan butir austenit (grain growth) (Gambar 8 dan Gambar 9).



Gambar 8. Struktur Mikro Spesimen Normalizing 900°C Perbesaran 200×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)



Gambar 9. Struktur Mikro Spesimen Normalizing 900°C Perbesaran 500×
Sumber: Laboratorium Uji CMPFA-UI (2026)

Struktur mikro pada temperatur 900°C menunjukkan tingkat homogenitas yang lebih baik dibandingkan temperatur 700°C, meskipun efektivitas temperatur tersebut sebagai kondisi optimum tetap perlu dievaluasi berdasarkan hasil pengujian Micro Vickers.

Secara keseluruhan, perbandingan hasil pengamatan pada seluruh variasi temperatur menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur normalizing, semakin besar energi yang diterima material sehingga proses difusi atom berlangsung lebih efektif. Kondisi tersebut menghasilkan distribusi unsur yang lebih merata dan mengurangi ketidakseragaman struktur mikro hasil pengecoran, sejalan dengan teori difusi yang menyatakan bahwa peningkatan temperatur akan meningkatkan mobilitas atom sehingga proses homogenisasi berlangsung lebih cepat. Apabila dikaitkan dengan teori Hall–Petch, perubahan ukuran butir akibat perlakuan panas akan memengaruhi kekerasan material: struktur mikro dengan ukuran butir yang lebih halus memiliki jumlah batas butir yang lebih banyak sehingga mampu menghambat pergerakan dislokasi dan meningkatkan kekerasan, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan butir yang mengurangi hambatan tersebut.

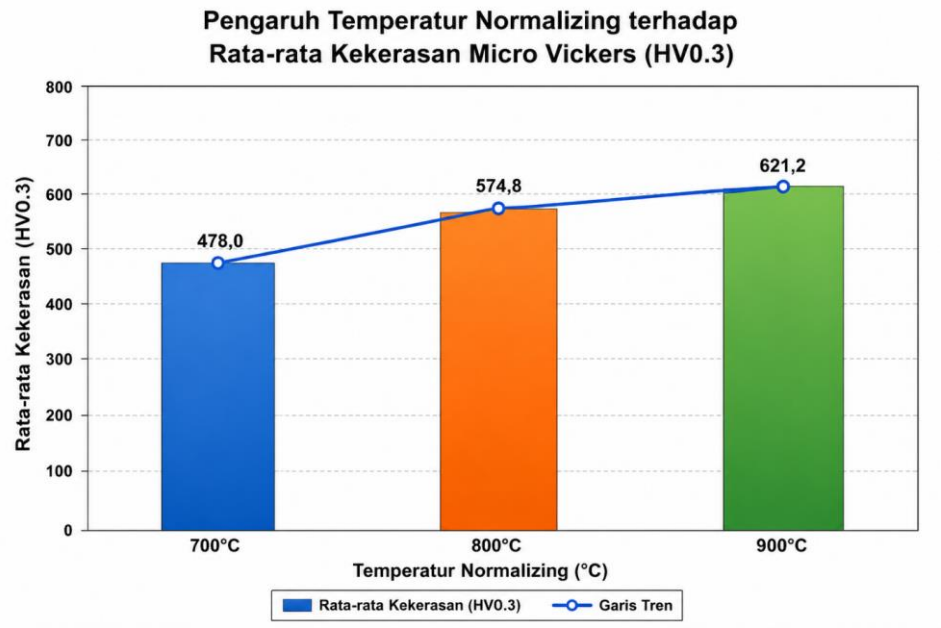
Hasil Pengujian Kekerasan Micro Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan pada lima titik indentasi untuk setiap spesimen. Hasil pengujian pada masing-masing variasi temperatur normalizing disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kekerasan Micro Vickers

Temperatur Normalizing	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Rata-rata (HV0.3)
700°C	570	380	469	473	498	478,0
800°C	530	743	533	604	464	574,8
900°C	684	651	468	633	670	621,2

Sumber: Dokumentasi Peneliti (2026)



Gambar 10. Diagram Rata-Rata Kekerasan Hardness Vickers
Sumber: Dokumentasi Peneliti (2026)

Hasil pengujian menunjukkan hubungan yang jelas antara temperatur normalizing dan nilai kekerasan paduan SiMn: nilai kekerasan rata-rata meningkat dari 478,0 HV0.3 pada 700°C, menjadi 574,8 HV0.3 pada 800°C (naik sekitar 20,25%), dan mencapai 621,2 HV0.3 pada 900°C (naik sekitar 29,96% dibanding 700°C dan 8,07% dibanding 800°C). Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur normalizing, laju difusi atom semakin besar sehingga distribusi unsur paduan menjadi lebih homogen, yang meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi sesuai mekanisme Hall–Petch.

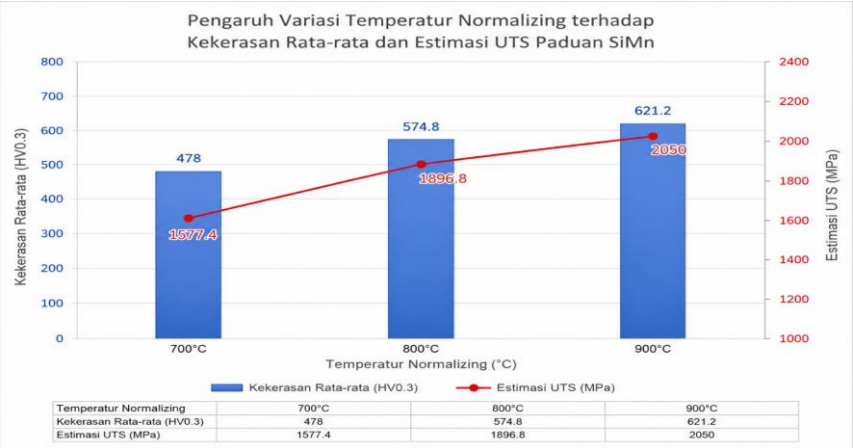
Estimasi Ultimate Tensile Strength (UTS)

Nilai UTS diestimasi berdasarkan hasil pengujian kekerasan menggunakan persamaan empiris UTS (MPa) = 3,3 × HV. Hasil estimasi UTS pada setiap variasi temperatur normalizing disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Estimasi Ultimate Tensile Strength (UTS)

Temperatur Normalizing	Kekerasan Rata-rata (HV0.3)	Estimasi UTS (MPa)
700°C	478,0	1.577,4
800°C	574,8	1.896,8
900°C	621,2	2.050,0

Sumber: Dokumentasi Peneliti (2026)



Gambar 13. Diagram Rata-Rata Estimasi *Ultimate Tensile Strength*
Sumber: Dokumentasi Peneliti (2026)

Estimasi nilai UTS menunjukkan kecenderungan meningkat seiring kenaikan temperatur normalizing, sejalan dengan hasil pengujian kekerasan Micro Vickers yang menunjukkan pola peningkatan serupa pada setiap kenaikan temperatur.

Peningkatan temperatur normalizing dari 700°C hingga 900°C menghasilkan struktur mikro yang semakin homogen dan diikuti oleh peningkatan nilai kekerasan serta estimasi kekuatan tarik material, yang menunjukkan bahwa temperatur perlakuan panas berperan penting dalam mengendalikan perubahan mikrostruktur paduan SiMn. Peningkatan temperatur memberikan energi aktivasi yang lebih besar sehingga mobilitas atom meningkat, laju difusi berlangsung lebih cepat, dan distribusi unsur silikon (Si) serta mangan (Mn) menjadi lebih merata. Selain proses difusi, transformasi fasa dari struktur awal menuju austenit selama pemanasan dan kembali menjadi struktur yang lebih stabil selama pendinginan udara turut menyempurnakan struktur mikro sehingga berdampak pada peningkatan kekerasan dan kekuatan material.

Peningkatan kekerasan yang diperoleh sejalan dengan teori Hall–Petch, yang menyatakan bahwa batas butir (*grain boundary*) berfungsi sebagai penghalang pergerakan dislokasi, sehingga struktur mikro yang lebih homogen dengan distribusi butir yang baik meningkatkan hambatan terhadap deformasi plastis. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Movahed et al. (2009) dan Sugimoto et al. (2015) yang menyatakan bahwa proses normalizing memperbaiki homogenitas struktur mikro dan meningkatkan sifat mekanik baja melalui pengendalian temperatur perlakuan panas, serta konsisten dengan He Bin et al. (2019), De Cooman et al. (2018), Calcagnotto et al. (2011), Haidemenopoulos et al. (2014), dan Koyama et al. (2018) yang menegaskan peran unsur silikon dan mangan serta ukuran butir dalam menentukan karakteristik mikrostruktur dan performa mekanik baja paduan Si–Mn. Berdasarkan seluruh parameter yang diamati, temperatur normalizing 900°C menghasilkan karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik terbaik pada penelitian ini.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur normalizing terhadap struktur mikro dan sifat mekanik paduan *Silicon Manganese* (SiMn), dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur normalizing berpengaruh terhadap karakteristik struktur mikro, di mana peningkatan temperatur dari 700°C hingga 900°C menghasilkan struktur mikro yang semakin homogen akibat meningkatnya proses difusi atom. Variasi temperatur normalizing juga memengaruhi nilai kekerasan Micro Vickers, dengan nilai rata-rata meningkat dari 478,0 HV0.3 pada 700°C, menjadi 574,8 HV0.3 pada 800°C, dan mencapai 621,2 HV0.3 pada 900°C, yang diikuti oleh peningkatan estimasi *Ultimate Tensile Strength* (UTS) secara sejalan. Hasil penelitian menunjukkan hubungan yang konsisten antara struktur mikro dan sifat mekanik material, di mana struktur mikro yang lebih homogen menghasilkan nilai kekerasan dan estimasi kekuatan tarik yang lebih tinggi, sehingga temperatur normalizing 900°C merupakan kondisi yang memberikan karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik terbaik pada penelitian ini. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan untuk menambahkan variasi temperatur normalizing yang lebih luas guna memperoleh temperatur optimum, mengkaji pengaruh holding time terhadap proses difusi dan transformasi fasa, melengkapi pengujian sifat mekanik dengan uji tarik, impak, dan ketahanan aus, mengembangkan karakterisasi mikrostruktur menggunakan metode SEM, EDS, atau XRD untuk mengidentifikasi fasa dan distribusi unsur secara lebih detail, serta membandingkan pengaruh media pendinginan yang berbeda seperti udara, oli, dan air terhadap struktur mikro dan sifat mekanik paduan SiMn.

REFERENSI

Ahmed, T., Hassan, E. A., & El-Fawakhry, A. E. (2019). Effect of Manganese and chromium on the mechanical properties of medium carbon steel. *Ain Shams Engineering Journal*, 749–756. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.002

ASM International. (1990). ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys (10th ed.). ASM International.

ASM International. (1991). ASM Handbook Volume 4: Heat Treating. ASM International.

ASM International. (2006). ASM Handbook, Volume 3: Alloy Phase Diagrams. ASM International.

ASTM International. (2017). ASTM E3-17: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International.

ASTM International. (2020). ASTM E407-20: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM International.

ASTM International. (2022). ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM International.

Azmal, A., Handoko, D., Masril, M., & Ilhamdi, E. (2021). Pengaruh variasi temperatur austenit pengujian Jominy test pada sifat hardenability baja ST 90. Vokasi: Jurnal Publikasi Ilmiah, 16(2). https://doi.org/10.31573/vokasi.v16i2.403

Basori, B., & Iswadi, A. (2021). Fenomena kekerasan, impak, dan struktur mikro baja 0,074 wt.% karbon pasca quenching coolant. Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur, 7(1). https://doi.org/10.21009/JKEM.7.1.5

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). Wiley.

Chamim, M., Margono, M., Hidayah, F. N., & Atmoko, N. T. (2022). Karakterisasi sifat mekanik dan struktur mikro pada baja paduan rendah hasil proses hardening. Jurnal Rekayasa Mesin, 14(1), 1–9. https://doi.org/10.21776/jrm.v14i1.1080

Dieter, G. E. (1986). Mechanical Metallurgy (3rd ed.). McGraw-Hill.

Ghasemi, M. (2014). Thermodynamic assessment of the Si–Mn binary system. Journal of Alloys and Compounds, 597, 170–178. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.135

He, B., Wang, H., Zhang, Y., & Liu, X. (2019). Quantitative description of external force induced phase transformation in Silicon–Manganese (Si–Mn) TRIP steels. Materials, 12(22), 3781. https://doi.org/10.3390/ma12223781

Herlingga, M. (2024). Pengaruh heat treatment setelah water cooling pada baja ST 60 terhadap sifat mekanik. Jurnal Sosial dan Sains, 5(9). https://doi.org/10.59188/jurnalsosains.v5i9.32492

Kim, J., & Park, S. (2018). Synergistic effects of Silicon and Manganese on the microstructure and mechanical properties of a high-strength low-alloy steel. Materials Science and Engineering A, 712, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.084

Koyama, M., Tsuzaki, K., & Noguchi, H. (2018). The influence of Silicon additions on the deformation behavior of austenite–ferrite duplex medium manganese steels. Acta Materialia, 143, 340–353. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.02.005

Li, Y., Li, Z., Zhang, Y., & Wang, P. (2020). Influence of Silicon content on the mechanical properties and microstructure of quenched and tempered steel. Materials, 13(5), 1134. https://doi.org/10.3390/ma13051134

Ma, Y., Wang, X., Zhuang, L., Zhang, J., & Zhang, J. (2025). Effect of Heat treatment on the interfacial element diffusion and hardness of FeCoNiCrAl high-entropy alloy coatings. Intermetallics, 176, 108581. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108581

Olsen, S. E., Tangstad, M., & Lindstad, T. (2007). Production of Manganese Ferroalloys. Trondheim: Tapir Academic Press.

Porter, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. Y. (2009). Phase Transformations in Metals and Alloys (3rd ed.). CRC Press.

PT Komatsu Indonesia. (2025). Data Komposisi Material Silicon Manganese (SiMn). Foundry Engineering Department. Dokumen Internal. Jakarta: PT Komatsu Indonesia.

Soffritti, C., Fortini, A., Sola, R., Fabbri, E., Merlin, M., & Garagnani, G. L. (2020). Influence of vacuum Heat treatments on microstructure and mechanical properties of M35 high speed steel. Metals, 10(5), 643. https://doi.org/10.3390/met10050643

Totten, G. E. (2006). Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. CRC Press.

Zhang, X., Li, Y., & Chen, H. (2025). Formation and evolution of inclusions in Q355B steel deoxidised with Silicon and Manganese. Ironmaking & Steelmaking. https://doi.org/10.1177/03019233241307463

Zhang, X., Wang, D., Zhou, Y., Chong, X., Li, X., Zhang, H., & Nagaumi, H. (2021). Exploring crystal structures, stability and mechanical properties of Fe, Mn-containing intermetallics in Al-Si alloy by experiments and first-principles calculations. Journal of Alloys and Compounds, 876, 160022. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160022

Zulhan, Z., Fauzian, I. M., & Hidayat, T. (2020). Ferro-silico-manganese production from manganese ore and copper smelting slag. Journal of Materials Research and Technology, 9(6), 13625–13634. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.079