



Analisis Pengaruh Media Pendinginan pada Proses Perlakuan Panas Baja Hadfield terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan

Rofi Nur Haryanto, Haris Wahyudi

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana

INFO ARTIKEL

Kata kunci:
Baja hadfield, quenching, struktur mikro, kekerasan.

Keywords:
Hadfield steel, quenching, microstructure, hardness.

Diterima: 10 November 2023
Direvisi : 12 Januari 2024
Diterbitkan secara online:
1 Maret 2024

ABSTRACT

Baja Hadfield merupakan baja dengan kandungan Mn 10-14% dan C 1,0-1,4%. Baja Hadfield hasil pengecoran mengandung karbida ($(Fe, Mn)_3C$) pada batas butir yang dapat menurunkan kekuatan sehingga diberikan perlakuan panas agar karbida menjadi larut. Pendinginan cepat baja Hadfield dengan media air mencegah terbentuknya karbida di batas butir. Akan tetapi, media pendingin mempengaruhi laju pendinginan yang membuat perubahan struktur mikro serta sifat mekanik baja Hadfield. Tujuan penelitian ini menganalisis pengaruh media pendingin air, air es dan oli pada proses perlakuan panas terhadap struktur mikro dan kekerasan baja Hadfield. Perlakuan panas diawali menggunakan temperatur pre-austenisasi 700°C dengan waktu tahan 60 menit, dilanjutkan hingga temperatur austenisasi 1150°C dan 1200°C dengan waktu tahan 30 menit. Setelah itu, pendinginan cepat menggunakan media air, air es dan oli kemudian dilakukan mounting, grinding, polishing serta etching. Pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM sedangkan uji kekerasan Vickers. Hasil penelitian menunjukkan perlakuan panas 1150°C diikuti pendinginan air+es hasilkan jumlah karbida yang lebih tinggi dibandingkan dengan air dan oli, sedangkan pada perlakuan panas 1200°C dengan pendinginan air+es hasilkan jumlah karbida yang lebih rendah dibandingkan dengan air dan oli. Nilai kekerasan tertinggi 185,1 HV pada perlakuan panas 1150°C diikuti dengan pendinginan air+es, sedangkan nilai kekerasan terendah sebesar 174,3 HV dihasilkan oleh perlakuan panas 1150°C dengan pendinginan oli. Nilai kekerasan tertinggi sebesar 187,6 HV dihasilkan oleh perlakuan panas 1200°C diikuti pendinginan air, sedangkan pendinginan air+es menghasilkan nilai kekerasan terendah 168,2 HV.

ABSTRACT

Hadfield steel is steel with a content of 10-14% Mn and 1.0-1.4% C. Casting Hadfield steel contains carbide $(Fe, Mn)_3C$ at grain boundaries which can reduce strength so that it is given heat treatment so that the carbide dissolves. Rapid cooling of Hadfield steel in aqueous media prevents the formation of carbides at the grain boundaries. However, the cooling medium affects the cooling rate which changes the microstructure and mechanical properties of Hadfield steel. The purpose of this study was to analyze the effect of the cooling media water, ice water and oil in the heat treatment process on the microstructure and hardness of Hadfield steel. The heat treatment was initiated using a pre-austenizing temperature of 700°C with a holding time of 60 minutes, followed by austenizing temperatures of 1150°C and 1200°C with a holding time of 30 minutes. After that, rapid cooling using the media of water, ice water and oil is then carried out mounting, grinding, polishing and etching. Testing the microstructure using an optical microscope and SEM while the Vickers hardness test. The results showed that heat treatment at 1150°C followed by water+ice cooling produced a higher amount of carbide compared to water and oil, whereas at 1200°C heat treatment with water+ice cooling produced a lower amount of carbide compared to water and oil. The highest hardness value was 185.1 HV at 1150°C heat treatment followed by water+ice cooling, while the lowest hardness value was 174.3 HV produced by 1150°C heat treatment with oil cooling. The highest hardness value of 187.6 HV was produced by heat treatment at 1200°C followed by water cooling, while water+ice cooling produced the lowest hardness value of 168.2 HV.

1. Introduction

Baja Hadfield adalah baja paduan yang mempunyai komposisi 10–14 wt% Mn dan 1,0–1,4 wt% C [1], [2]. Baja Hadfield mempunyai kekerasan yang relatif tinggi sebesar 190–300 BHN [3], [4]. Salah satu karaktersitik baja Hadfield adalah memiliki ketahanan aus yang sangat baik sehingga diperlukan kekerasan yang tinggi [5]. Baja Hadfield yang diperoleh dari hasil pengecoran mengandung karbida $(Fe, Mn)_3C$ pada batas butir yang terbentuk akibat proses pendinginan yang lambat saat dilakukan pengecoran, keberadaan karbida mempunyai pengaruh yang tidak baik terhadap baja Hadfield sehingga perlu dilarutkan sebelum digunakan untuk bidang industri [6], [7]. Struktur mikro baja Hadfield *as-cast* terdiri dari fasa austenit, karbida di batas butir dan perlit yang rendah [8]. Karbida di batas butir tidak diharapkan karena dapat menurunkan keuletan baja sehingga diberikan perlakuan panas agar karbida menjadi larut [7].

Secara umum, perlakuan panas baja Hadfield dilakukan pada temperatur austenisasi 1050°C – 1200°C [9]. Parameter yang mempengaruhi perlakuan panas diantaranya temperatur austenisasi, kecepatan pemanasan, waktu penahanan dan laju pendinginan [5], [6]. Dalam perlakuan panas, temperatur austenisasi mempengaruhi kelarutan karbida [10]. Waktu penahanan di temperatur austenisasi berpengaruh pada struktur mikro dan lama waktu pemanasan berpengaruh pada ukuran butir, semakin lama waktu austenisasi ukuran butir semakin membesar [9].

Tęcza dan Sobula [11] menggunakan temperatur austenisasi 1100°C, 1150°C dan 1200°C dengan waktu tahan 40 menit, 80 menit dan 240 menit untuk mengurangi karbida pada baja Hadfield. Tingginya temperatur pemanasan membuat jumlah karbida menurun, tetapi masih meninggalkan sisa pada batas butir. Peneliti selanjutnya



melakukan perlakuan panas di temperatur austenisasi 970°C, 1060°C dan 1150°C selama 30 menit dan 60 menit. Meningkatnya temperatur austenisasi membuat karbida berkurang, tetapi masih tersisa di batas butir [9]. Oleh karena itu, diperlukan kombinasi temperatur pemanasan dan waktu penahanan agar diperoleh fasa austenit dan jumlah karbida yang minimal.

Pendinginan cepat baja Hadfield dengan media air mencegah terbentuknya karbida di batas butir dan membentuk struktur austenitik yang sama [12], [13]. Selain air dapat digunakan oli, air es atau air garam sebagai media pendingin baja Hadfield. Media pendingin yang berbeda berpengaruh pada laju pendinginan, dimana variasi media pendingin juga mempengaruhi perubahan struktur mikro dan sifat mekanik baja. Azadi dan Pazuki [14] melakukan pendinginan cepat baja Hadfield di dalam media air es membuat kekerasan baja Hadfield menurun karena laju pendinginan yang cepat, tetapi tidak menimbulkan retak di permukaan baja. Sedangkan Nurjaman *et. al.* [3] menggunakan media pendingin air dan oli untuk pendinginan cepat baja Hadfield setelah pemanasan di temperatur austenisasi 950°C, 1000°C dan 1050°C. Kekerasan tertinggi diperoleh baja Hadfield yang diquenching menggunakan media air, sedangkan baja Hadfield yang diquenching di dalam media oli hasilkan kekerasan yang rendah. Pada proses pendinginan cepat baja Hadfield dibutuhkan laju pendinginan yang tinggi agar karbida tidak memiliki peluang terbentuk kembali dan kandungan karbida menjadi minimal [6], [15]. Semakin cepat pendinginan maka pembentukan karbida dapat dihindari. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh media pendingin air, air es dan oli pada proses perlakuan panas terhadap struktur mikro dan kekerasan baja Hadfield.

2. Experimental Procedure

1. Preparasi Spesimen

Sebelum digunakan untuk pengujian baja Hadfield dilakukan preparasi dengan memotong baja menggunakan Wire Cut EDM sebanyak 7 spesimen, setiap spesimen mempunyai ukuran 4mm×5mm×7mm. Baja Hadfield yang telah dipotong kemudian dilakukan pengamplasan menggunakan kertas amplas untuk memperoleh permukaan material yang bersih dan rata. Bentuk dari baja Hadfield dapat dilihat pada Gambar 1.

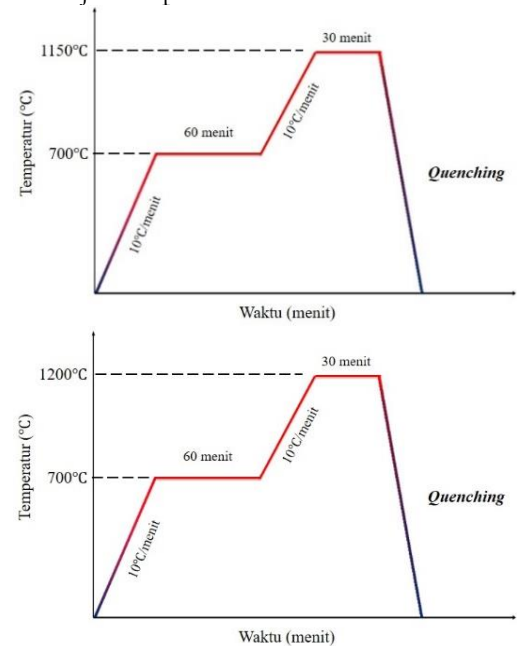


Gambar 1. Spesimen baja Hadfield

2. Perlakuan Panas *Solution Treatment* dan Pendinginan Cepat Baja Hadfield

Pada penelitian ini proses perlakuan panas dilakukan secara bertahap atau perlakuan panas dua tahap. Proses perlakuan panas diawali dari temperatur kamar hingga temperatur pre-austenisasi 700°C dengan waktu tahan 60

menit, kemudian dilanjutkan hingga mencapai temperatur austenisasi 1150°C atau 1200°C dengan waktu tahan selama 30 menit. Setelah itu, dilakukan proses pendinginan cepat (*quenching*) menggunakan variasi media pendingin seperti air, air + es dan oli SAE 20W. Perlakuan panas dilakukan di dalam *Tube Furnace* model PPF-1300 dengan merek Fisika Laboratoria (Fila). Siklus perlakuan panas dengan temperatur austenisasi 1150°C dan 1200°C dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Siklus proses *solution treatment* baja Hadfield pada temperatur 1150°C dan 1200°C

3. Proses *Mounting*

Sebelum masuk ke tahap *grinding* dan *polishing* semua spesimen dilakukan *mounting* menggunakan resin dan hardener. Proses *mounting* umum digunakan pada material yang mempunyai ukuran kecil dan bertujuan untuk mempermudah pemegangan spesimen ketika pengamplasan dan pemolesan. Gambar 3. menunjukkan spesimen yang telah dimounting.



Gambar 3. Spesimen setelah dimounting

4. Proses *Grinding* dan *Polishing*

Proses diawali dengan melakukan pengamplasan secara bertahap dan digunakan kertas amplas dari *grit* 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000 dan 5000. Pengamplasan dilakukan untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen. Setelah itu, dilakukan proses pemolesan (*polishing*) menggunakan mesin poles, kain beludru dan *diamond abrasive paste metal polishing* dengan *grit*

8000 dan 10000. Selanjutnya dilakukan proses pengetsaan (*etching*) menggunakan cairan Nital 15% selama 10 detik untuk memunculkan struktur mikro dan batas butir.

5. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro bertujuan untuk mengamati struktur mikro dari baja Hadfield setelah dilakukan perlakuan panas dan pendinginan cepat, seperti pengamatan batas butir dan fasa yang dimiliki spesimen. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik digital model Keyence VH-ZST dengan pembesaran 200x dan dilakukan pengamatan struktur mikro memakai *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan model JSM IT-100 pada pembesaran 250x.

6. Pengujian Kekerasan Spesimen

Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan dari baja Hadfield. Uji kekerasan menggunakan metode *Vickers* dan dilakukan pengambilan data sebanyak 3 kali pada permukaan spesimen. Beban pengujian sebesar 30 kgf dengan waktu pembebanan (*dwell time*) selama 10 detik dan mengacu pada standar ASTM E92. Digunakan alat uji kekerasan *Vickers* model FV-810 dengan merek Future-Tech.

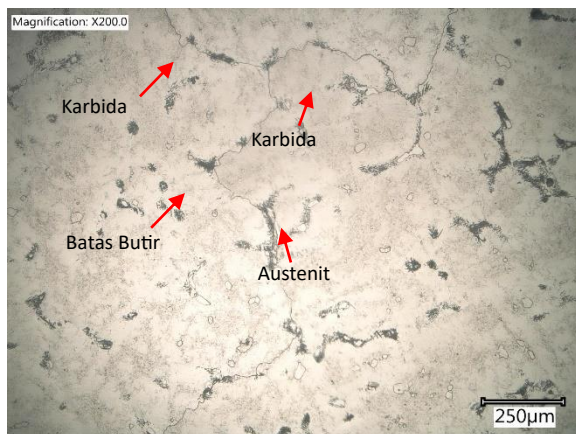
Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja Hadfield, baja dibuat melalui proses pengecoran di PT. Pindad. Komposisi kimia yang terdapat pada baja Hadfield diperoleh dari hasil uji *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Adapun komposisi kimia dari baja Hadfield dapat ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia dari baja Hadfield

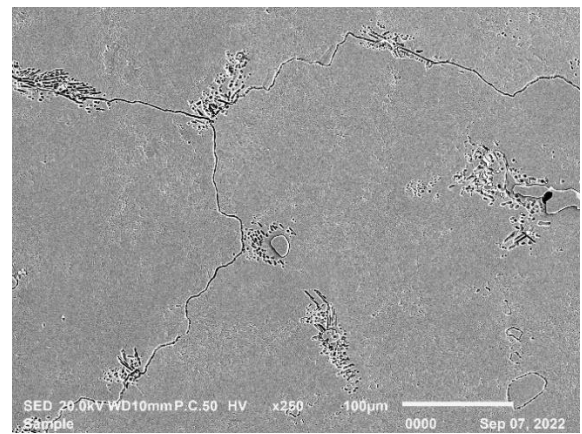
Material	Compositions (wt%)					
	C	Mn	Cr	P	Si	Fe
Baja Hadfield	1.23	10.61	2.12	0.035 max	0.4 max	Balance

3. Result And Discussion

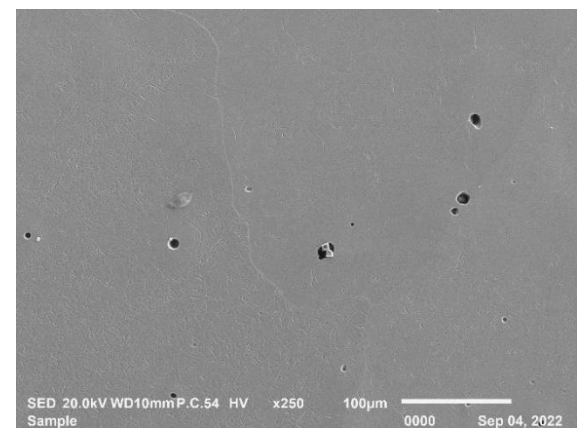
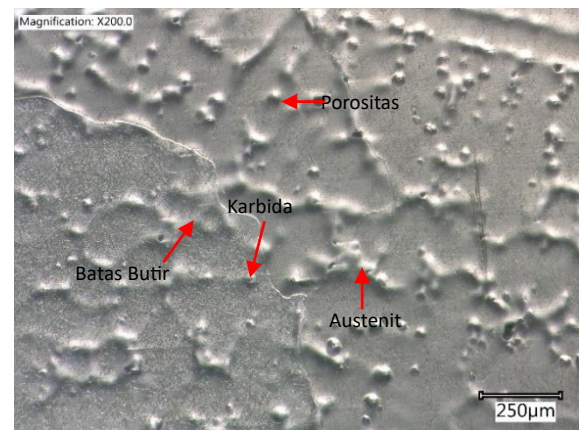
Hasil Pengujian Struktur Mikro



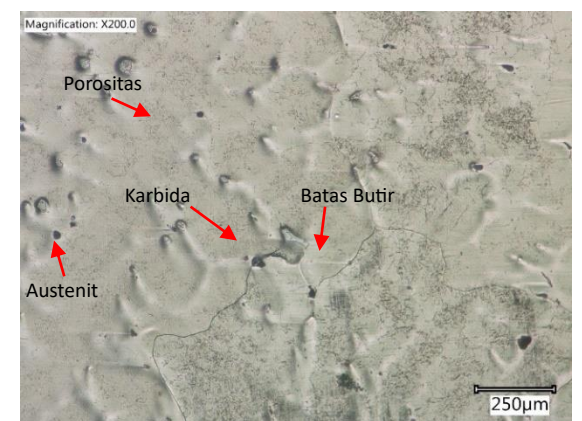
Gambar 4. Struktur mikro spesimen As-cast



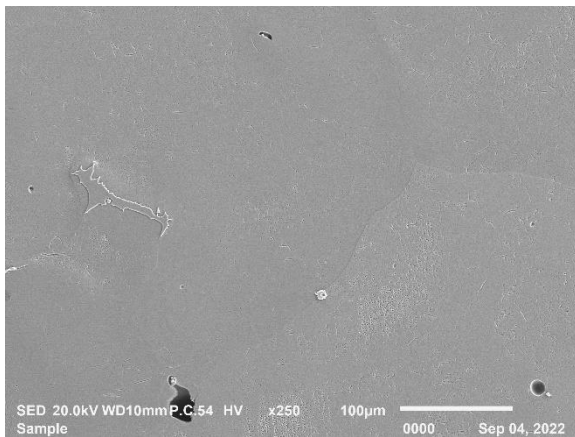
Gambar 4. lanjutan



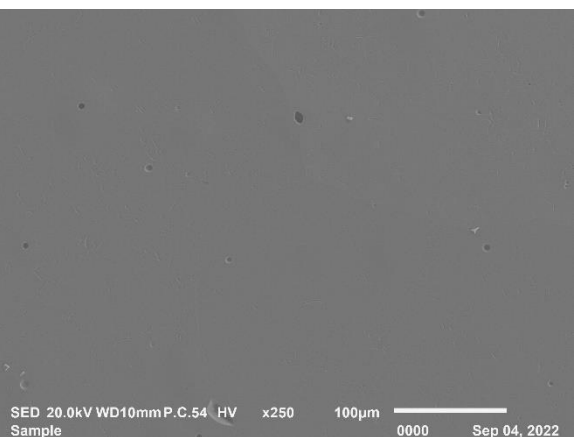
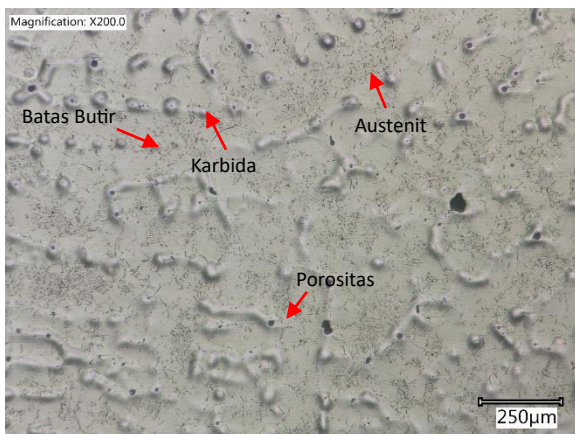
Gambar 5. Struktur mikro spesimen 1150°C - air



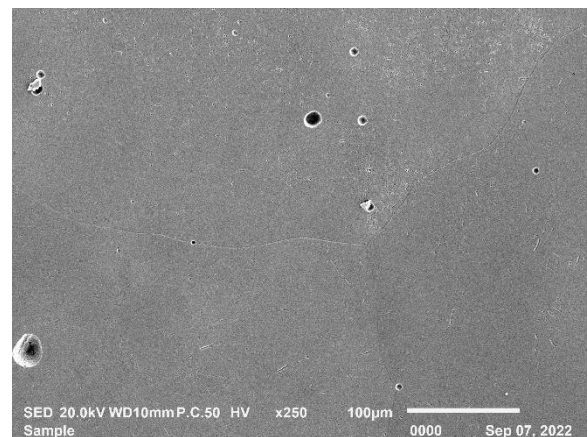
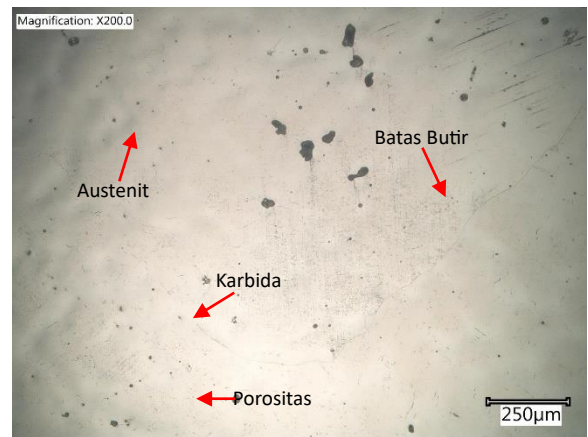
Gambar 6. Struktur mikro spesimen 1150°C - air+es



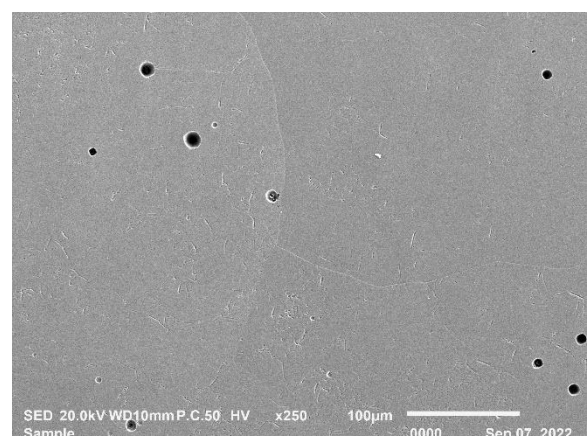
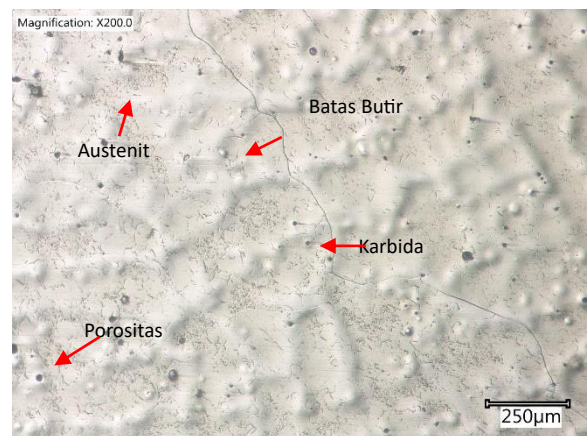
Gambar 6. lanjutan



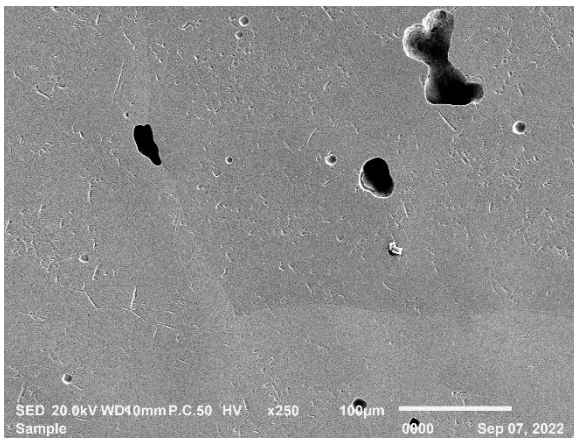
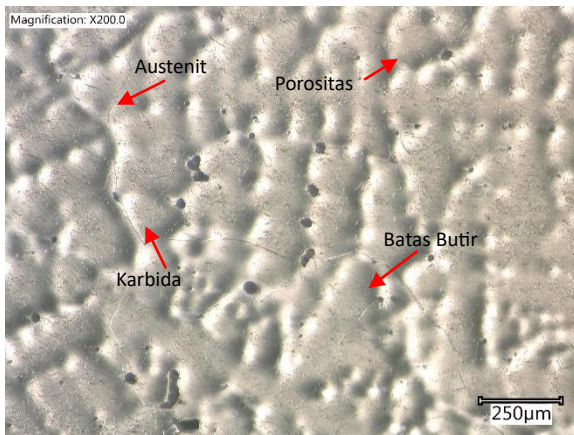
Gambar 7. Struktur mikro spesimen 1150°C – oli



Gambar 8. Struktur mikro spesimen 1200°C – air



Gambar 9. Struktur mikro spesimen 1200°C – air+es



Gambar 10. Struktur mikro spesimen 1200°C – oli

Gambar 4. menunjukkan struktur mikro dari baja Hadfield yang tidak mengalami perlakuan panas terdiri dari presipitat karbida di batas butir, porositas dan matriks austenit. Terbentuknya karbida pada baja Hadfield akibat proses pendinginan yang lambat saat dilakukan pengecoran [3]. Pada Gambar 5. struktur mikro dari spesimen perlakuan panas 1150°C dan pendinginan cepat di dalam media air memperlihatkan masih adanya karbida yang tidak larut pada batas butir. Struktur mikro pada Gambar 6. menunjukkan masih terdapat sejumlah karbida yang tidak larut dan mengendap di batas butir. Hasil SEM pada Gambar 7. terlihat bahwa keberadaan karbida di batas butir sudah berkurang, tetapi masih terdapat karbida yang tidak larut. Selain itu, adanya porositas pada struktur mikro spesimen pendinginan media oli.

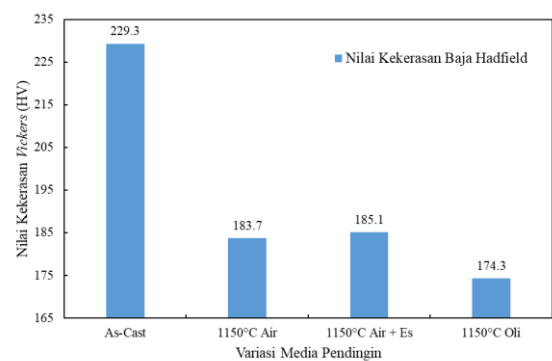
Hasil pengujian struktur mikro pada Gambar 8. menunjukkan terjadi pengurangan karbida dari batas butir setelah proses pemanasan dan pendinginan cepat, tetapi masih terdapat karbida tidak larut dan sejumlah porositas pada permukaan spesimen. Hasil pengamatan pada Gambar 9. menunjukkan masih adanya karbida yang tidak larut dalam struktur mikro. Gambar 10. menunjukkan struktur mikro dari spesimen perlakuan panas 1200°C dan pendinginan di dalam media oli terlihat karbida telah berkurang, tetapi masih meninggalkan sisa karbida yang tidak larut.

Pada permukaan spesimen setelah dilakukan pemolesan terdapat porositas yang disebabkan karena cacat saat pengecoran. Gambar 5, 6 dan 7 menunjukkan spesimen yang didinginkan di dalam media air+es memiliki jumlah karbida

yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen pendinginan air dan oli. Sementara itu, jumlah karbida pada spesimen pendinginan media oli lebih rendah dibandingkan dengan spesimen pendinginan air dan air+es.

Pada Gambar 8, 9 dan 10 tampak memperlihatkan jumlah karbida pada spesimen pendinginan media air+es lebih rendah dibandingkan dengan spesimen pendinginan media air dan oli. Hal ini terjadi karena media air+es memiliki laju pendinginan yang lebih tinggi dibandingkan dengan media air dan oli. Akibatnya, spesimen yang didinginkan di dalam media air+es melewati proses pembentukan karbida dengan kecepatan yang relatif cepat sehingga hanya sedikit waktu yang dimiliki C untuk bereaksi dengan unsur Mn dan Fe [16]. Hal ini menyebabkan karbida tidak sempat untuk terbentuk kembali pada batas butir sehingga diperoleh jumlah karbida yang lebih rendah pada spesimen pendinginan media air+es.

Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

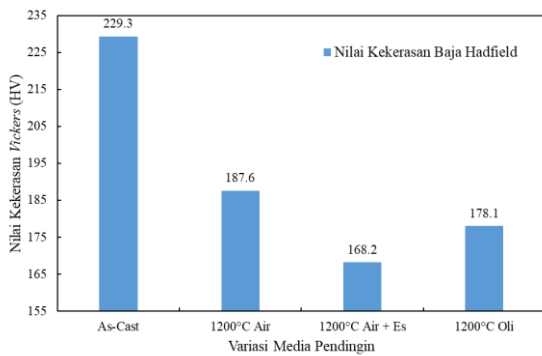


Gambar 11. Nilai kekerasan Vickers spesimen temperatur austenitasi 1150°C

Baja Hadfield yang tidak mengalami perlakuan panas (*as-cast*) memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 229,3 HV. Pada baja Hadfield yang dilakukan perlakuan panas dengan temperatur austenitasi 1150°C dan pendinginan cepat di dalam media air memiliki nilai kekerasan sebesar 183,7 HV, sedangkan baja Hadfield pendinginan media air+es memiliki nilai kekerasan sebesar 185,1 HV. Sementara itu, baja pendinginan dengan media oli memiliki nilai kekerasan terendah sebesar 174,3 HV.

Dari hasil uji kekerasan Vickers menunjukkan baja Hadfield yang tidak mengalami perlakuan panas memiliki nilai kekerasan tertinggi. Tingginya kekerasan disebabkan karena terdapat banyak karbida yang mengendap di dalam struktur mikro, karbida adalah senyawa yang relatif keras [16]. Semakin tinggi jumlah karbida menyebabkan kekerasan baja Hadfield semakin tinggi juga.

Gambar 11. menunjukkan baja Hadfield yang dilakukan pendinginan di dalam media air+es memiliki nilai kekerasan tertinggi dibandingkan dengan baja pendinginan air dan oli. Hal ini disebabkan karena ukuran karbida yang relatif lebih besar serta jumlah karbida yang lebih tinggi sehingga menyebabkan tingginya nilai kekerasan. Sementara itu, spesimen yang didinginkan di dalam media oli memiliki nilai kekerasan terendah. Hal ini disebabkan karena jumlah karbida yang lebih rendah dibandingkan dengan baja Hadfield pendinginan air dan air+es.



Gambar 12. Nilai kekerasan Vickers spesimen temperatur austenisasi 1200°C

Baja Hadfield yang dilakukan perlakuan panas dengan temperatur austenisasi 1200°C dan pendinginan cepat di dalam media air memiliki nilai kekerasan sebesar 187,6 HV, sedangkan baja Hadfield yang didinginkan menggunakan media air+es memiliki nilai kekerasan terendah yaitu 168,2 HV. Sementara itu, spesimen yang dilakukan pendinginan memakai media oli memiliki nilai kekerasan sebesar 178,1 HV.

Gambar 12. menunjukkan baja Hadfield pendinginan air+es memiliki nilai kekerasan terendah dibandingkan dengan baja yang didinginkan menggunakan media air dan oli. Rendahnya nilai kekerasan disebabkan karena spesimen pendinginan air+es memiliki jumlah karbida yang lebih sedikit dibandingkan dengan spesimen pendinginan air dan oli. Selain itu, ukuran karbida yang lebih kecil juga menyebabkan kekerasan baja menjadi rendah. Maka rendahnya jumlah karbida menyebabkan baja Hadfield pendinginan air+es mengalami penurunan kekerasan [8]. Sementara itu, spesimen pendinginan media air memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen pendinginan air+es dan oli. Hal ini disebabkan karena spesimen pendinginan air memiliki jumlah karbida yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen lainnya, hal ini sesuai dengan hasil pengamatan struktur mikro.

4. Conclusion

Spesimen yang diberikan perlakuan panas di temperatur austenisasi 1150°C dan pendinginan oleh media air+es menghasilkan jumlah karbida yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen pendinginan media air dan oli, sedangkan hasil pendinginan menggunakan media oli menghasilkan jumlah karbida yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen pendinginan air dan air+es. Pada baja Hadfield yang dilakukan perlakuan panas di temperatur austenisasi 1200°C dan pendinginan oleh media air+es menghasilkan jumlah karbida yang lebih rendah dibandingkan dengan baja yang didinginkan memakai media air dan oli.

Kekerasan hasil perlakuan panas di temperatur austenisasi 1150°C dan pendinginan menggunakan media air sebesar 183,7 HV, sedangkan hasil pendinginan dengan media air+es sebesar 185,1 HV dan kekerasan spesimen hasil pendinginan menggunakan media oli sebesar 174,3 HV. Baja Hadfield hasil perlakuan panas di temperatur 1200°C dan pendinginan cepat menggunakan media air memiliki nilai kekerasan sebesar 187,6 HV, sedangkan kekerasan hasil pendinginan menggunakan media air+es sebesar 168,2 HV.

Pada spesimen pendinginan media oli menghasilkan nilai kekerasan sebesar 178,1 HV.

Acknowledgement

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pembimbing yang telah memberikan arahan dan bantuan hingga proses penelitian ini selesai dilaksanakan. Penulis juga ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu proses penelitian ini sehingga dapat terlaksana dengan lancar dan sesuai rencana. Terimakasih kepada kedua orang tua yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan bagi penulis.

References

- [1] S. Ayadi and A. Hadji, "Effect of Heat Treatments on the Microstructure and Wear Resistance of a Modified Hadfield Steel," *Met. Adv. Technol.*, vol. 41, no. 5, pp. 607–620, 2019, doi: 10.15407/mfint.41.05.0607.
- [2] Y. N. Dastur and W. C. Leslie, "Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel," *Metall. Trans. A, Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 12A, pp. 749–759, 1981, doi: 10.1007/BF02648339.
- [3] F. Nurjaman, F. Bahfie, W. Astuti, and A. Shofi, "The Effect of Solid Solution Treatment On the Hardness and Microstructure of 0.6%wt C-10.8%wt Mn-1.44%wt Cr Austenitic Manganese Steel," *J. Phys. Conf. Ser.*, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/755/1/011001.
- [4] M. I. Syahputra and Y. Setyorini, "Pengaruh Media Pendingin pada Proses Hardening terhadap Struktur mikro Baja Mangan Hadfield AISI 3401 PT Semen Gresik," *J. Tek. Pomits*, vol. 2, no. 2, pp. 224–227, 2013.
- [5] A. K. Srivastava and K. Das, "Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel," *J. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 16, pp. 5654–5658, 2008, doi: 10.1007/s10853-008-2759-y.
- [6] E. Hidayat and B. Bandanadjaja, "Peningkatan Nilai Impak Baja Hadfield Mn 12 Melalui Proses Perlakuan Panas Homogenisasi Bertahap," *J. Energi dan Teknol. Manufaktur*, vol. 1, no. 2, pp. 09–14, 2018, doi: 10.33795/jetm.v1i02.20.
- [7] S. Mishra and R. Dalai, "A Comparative Study On the Different Heat-Treatment Techniques Applied to High Manganese Steel," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 2517–2520, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.602.
- [8] S. Hosseini and M. B. Limooei, "Optimization of Heat Treatment to Obtain Desired Mechanical Properties of High Carbon Hadfield Steels," *World Appl. Sci. J.*, vol. 15, no. 10, pp. 1421–1424, 2011.

- [9] M. Beheshti, M. Zabihiazadboni, M. C. Ismail, S. Kakooei, and S. Shahrestani, "Investigation on Simultaneous Effects of Shot Peen and Austenitizing Time and Temperature on Grain Size and Microstructure of Austenitic Manganese Steel (Hadfield)," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/328/1/012006.
- [10] S. Hosseini, M. B. Limooei, M. H. Zade, E. Askarnia, and Z. Asadi, "Optimization of Heat Treatment Due to Austenising Temperature, Time and Quenching Solution in Hadfield Steels," *Int. J. Mater. Metall. Eng.*, vol. 7, no. 7, pp. 582–585, 2013.
- [11] G. Tęcza and S. Sobula, "Effect of Heat Treatment on Change Microstructure of Cast High-manganese Hadfield Steel with Elevated Chromium Content," *Arch. Foundry Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 67–70, 2014.
- [12] J. O. Agunsoye, T. S. Isaac, and A. A. Abiona, "On the Comparison of Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of High Chromium White Iron with the Hadfield Austenitic Manganese Steel," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 1, pp. 24–28, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2011.10.089.
- [13] S. B. Sant and R. W. Smith, "A study in the work-hardening behaviour of austenitic manganese steels," *J. Mater. Sci.*, vol. 22, pp. 1808–1814, 1987, doi: 10.1007/BF01132410.
- [14] M. Azadi, A. M. Pazuki, and M. J. Olya, "The Effect of New Double Solution Heat Treatment on the High Manganese Hadfield Steel Properties," *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 7, pp. 618–626, 2018, doi: 10.1007/s13632-018-0471-0.
- [15] H. R. Jafarian, M. Sabzi, S. H. M. Anijdan, A. R. Eivani, and N. Park, "The influence of austenitization temperature on microstructural developments, mechanical properties, fracture mode and wear mechanism of Hadfield high manganese steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 10, pp. 819–831, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.12.003.
- [16] S. H. M. Anijdan and M. Sabzi, "The Effect of Heat Treatment Process Parameters on Mechanical Properties, Precipitation, Fatigue Life, and Fracture Mode of an Austenitic Mn Hadfield Steel," *J. Mater. Eng. Perform.*, 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3625-y.