

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI NIKEL TERHADAP PEMBENTUKAN BAINIT PADA BAJA A588 UNTUK APLIKASI BAJA TAHAN CUACA MELALUI PROSES *INVERTED AUSTEMPERING BAINITIC MULTI-STEP*

Gilang Ramadhan¹, Gusti Umindya Nur Tajalla, S.T., M.T.², Miftakhur Rohmah, S.T., M.T.³

^{1,2}Program Studi Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan.

³Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang.

Email: 06181031@student.itk.ac.id

Abstract

Nowadays, weathering steel has become increasingly popular in Indonesia. Because of its excellent mechanical properties and corrosion resistance, laterite steel A-588 has the potential to be used as weathering steel. To obtain those properties, some heat treatment processes have been developed. The *Inverted Austempering Bainitic Multi-Step* process was used to obtain laterite steel A-588, which has excellent strength, ductility, and corrosion resistance. This study aims to determine the correlation between nickel content and heat treatment process variations on the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of A-588 laterite steel. The laterite steel A-588 with nickel content variations of 0.41 %, 1.21 %, 1.95 %, and 2.91 % was austenized (850 °C), followed by a second heating process (350°C), and a third heating process (450 °C) using air as the cooling agent, so the final microstructure is acicular bainitic-ferrite with a small amount of residual austenite and some martensite and pearlite phases. The addition of 2.91% nickel element with a relatively slow cooling rate results in the formation of acicular bainitic-ferrite, which decreases corrosion rate due to the formation of a patina layer and increases strength without decreasing ductility. A sample containing 2.91% nickel had the best mechanical properties (strength of 1100 MPa, elongation of 19.3%, and corrosion rate of 1.25 mpy).

Keywords : Corrosion, Laterite Steel, Mechanical Properties

Abstrak

Dewasa ini penggunaan baja tahan cuaca di Indonesia semakin dibutuhkan. Baja laterit A-588 berpotensi untuk diaplikasikan sebagai baja tahan cuaca. Baja laterit A-588 dikembangkan melalui proses austemper-bainit multi langkah terbalik (*Inverted Austempering Bainitic Multi-Step*) yang bertujuan untuk mendapatkan sifat kekuatan, keuletan, dan ketahanan korosi yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui korelasi antara variasi penambahan kadar nikel dan proses perlakuan panas terhadap mikrostruktur, sifat mekanik, dan ketahanan korosi baja laterit A-588. Baja laterit A-588 dengan variasi kadar nikel 0,41 %, 1,21 %, 1,95 %, dan 2,91 % mengalami proses austenisasi (850°C) kemudian dilanjutkan dengan proses pemanasan kedua (350 °C) dan pemanasan ketiga (450°C) dengan media pendingin berupa udara, sehingga struktur mikro akhir berupa *acicular bainitic-ferrite* dengan kehadiran sedikit austenit sisa dan sejumlah fasa martensit dan perlit. Penambahan unsur nikel sebesar 2,91% dengan laju pendinginan yang cukup lambat menyebabkan pembentukan *acicular bainitic-ferrite* sehingga laju korosi semakin menurun akibat terbentuknya lapisan patina serta kekuatan meningkat tanpa menurunkan keuletan. Sifat mekanik paling optimal diperoleh sampel 2,91% nikel (kekuatan 1100 MPa, regangan 19,3%, dan laju korosi 1,25 mpy).

Kata Kunci : Baja Laterit, Sifat Mekanik, Korosi

1. Pendahuluan

Dewasa ini, penggunaan baja tahan lingkungan semakin dibutuhkan di Indonesia. Kemampuan las dan kekuatan yang sangat baik, serta sifat "perlindungan diri" dalam membentuk lapisan pelindung yang dapat melindungi baja ini dari serangan korosi saat terkena lingkungan atmosferik adalah alasan banyak peminat bahan baja tahan lingkungan (Rohmah, et al., 2021). Baja tahan lingkungan biasanya digunakan pada aplikasi struktur seperti rangka jembatan dan aplikasi struktural lainnya. Baja tahan lingkungan memiliki sifat mekanik 30% lebih baik daripada baja karbon dengan ukuran yang lebih tipis (Rohmah, et al., 2021). Baja tahan lingkungan ASTM A588 memiliki kekuatan luluh minimum 50 ksi (340 MPa) dan kekuatan tarik maksimum 70 ksi (480 MPa) (ASTM, 2004). Namun, proses produksi baja ini secara mandiri belum mampu diterapkan di Indonesia. Terbatasnya ketersediaan bijih besi berkualitas tinggi di Indonesia menjadi kendala dan tantangan utama bagi perkembangan industri baja ditanah air. Akibatnya, industri baja di beberapa negar mengimpor bahan baku untuk memenuhi kebutuhan industri baja (Adjiantoro, et al., 2016). Oleh karena itu, untuk memenuhi kebutuhan baja tahan lingkungan Indonesia, diperlukan alternatif sumber bijih besi yang berkualitas tinggi. Indonesia memiliki miliaran ton cadangan bijih laterit (nikel) yang diharapkan dapat mengatasi permasalahan dan tantangan tersebut (P2MM, 2016). Bijih laterit memiliki kandungan besi yang sangat rendah sekitar 35-45wt% dan kandungan nikel sekitar 0,8-1,5wt%. Pengolahan bijih menjadi bajamenghasilkan kandungan nikel 2-3wt% akan memberikan sifat yang sangat baik seperti kekuatan tinggi, ketahanan korosi, ketahanan cuaca dan kemampuan las yang baik (Adjiantoro, et al., 2016). Komposisi paduan baja tahan lingkungan memainkan peran penting dalam mencapai ketahanan korosi dan sifat mekanik yang diinginkan. Beberapa penelitian telah dilakukan dengan mengubah kandungan nikel dari unsur paduan utama. Seperti yang dinyatakan Baum (1974) dalam bukunya, peningkatan kandungan nikel baja tahan lingkungan efektif menekan disolusinya dalam matriks baja dan disebabkan oleh hidrolisis ion logam di atmosfer pantai dapat mengurangi pengasaman permukaan (Jia et al., 2021). Saat kandungan nikel dalam baja meningkat, lapisan karat internal yang mengandung banyak partikel FeNi_2O_4 bermuatan negatif membebaskan Cl dari permukaan lapisan karat/matriks baja, menyediakan situs nukleasi yang membantu pembentukan (FeOOH). Ini membentuk produk korosi yang lebih kecil dan lebih padat (Morcillo, et al., 2014). Y.Zhou dkk. (2013) menyimpulkan bahwa pada batas efisiensi 3,5wt% unsur nikel dapat meningkatkan ketahanan korosi (Zhou, et al., 2013). Kandungan nikel 3,5 wt% atau lebih tinggi memiliki sifat mekanik yang sangat baik dan ketahanan korosi yang sangat baik, tetapi tidak direkomendasikan untuk produksi massal karena biaya produksinya yang tinggi. Oleh karena itu, batas efektif kandungan nikel dalam baja A588 adalah 3,5wt% (Fengyi, et al., 2011). Selain itu Cano (2017) menjelaskan bahwa komposisi unsur Ni 1-3wt% pada baja tahan lingkungan akan membentuk martensit dan/atau bainit dengan ukuran butir 11-15,6 μm sehingga meningkatkan nilai kuat tarik maksimum sebesar 686 MPa (Cano, et al., 2017).

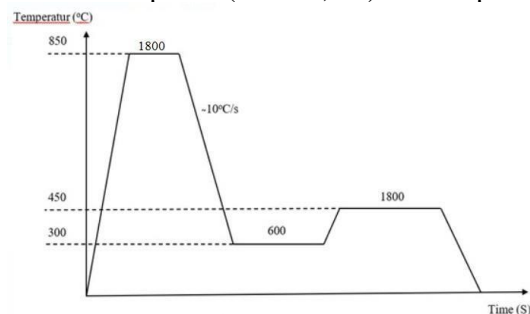
Sifat mekanik dan ketahanan korosi baja A588 dipengaruhi oleh struktur mikro yang ada pada baja itu sendiri, seperti ferit, martensit, austenit dan bainit. Salah satunya adalah fasa bainit halus. Beberapa penelitian mengatakan bahwa jenis paduan baja bainit halus adalah fasa yang cocok untuk aplikasi baja struktural. Seperti penelitian Mousalou dkk (2019) menyatakan bahwa bainit halus memiliki kekuatan tarik dan kekuatan dampak yang tinggi yang disebabkan oleh adanya mikrostruktur polifasa yang terdiri dari *filmy austenite* yang diapit di antara ferit bainitik halus. Selain itu, kekuatan tarik bainit berstruktur mikro melebihi 1428 MPa dan memiliki elongasi yang seragam pada kisaran 11-16%, yang sangat dibutuhkan untuk aplikasi baja struktural (Mousalou, et al., 2018). Sifat kombinasi yang sangat baik ini disebabkan oleh bentuk pelat ferit bainitik yang sangat halus dan film austenit yang berubah pada suhu rendah (He et al., 2015). Oleh karena itu, fasa bainit halus sangat cocok untuk aplikasi baja tahan lingkungan. Baja struktural bainit halus diproduksi dengan proses perlakuan panas seperti *single-step austempering*, *quench-temper*, salah satunya adalah proses *inverted austempering bainitic multi-step* (Gao, et al., 2018). Proses austemper bainit multi-langkah adalah perlakuan panas yang melibatkan dua atau tiga langkah transformasi isothermal bainit, di mana bainit kasar sebagian terbentuk pada suhu austemper yang lebih tinggi pada kisaran suhu 360° C, diikuti suhu yang lebih rendah dalam kisaran 260° C (Gao, et al., 2018). Menurut Avishana dkk (2017), blok austenit besar selanjutnya terurai menjadi bainit setelah proses austempering dua langkah, yang berakibat pada meningkatkan stabilitas mekanisnya dan umumnya menyempumakan mikrostruktur akhir (Avishana et al., 2017). Proses perlakuan panas ini bertujuan untuk mengurangi austenit yang menggumpal atau masif (*blocky austenite*) di antara balok-balok bainit yang tidak

sejajar (*parallel*). Blok kasar austenit ini dapat berubah menjadi fasa martensit karena stabilitas pendinginannya yang relatif rendah setelah transformasi bainit isothermal. Namun, untuk menghilangkan blok austenit umumnya membutuhkan waktu lebih lama dan menghasilkan struktur ferit bainit kasar, yang mengurangi kekuatan luluh baja (Gao, et al., 2018). Oleh karena itu, diperlukan proses perlakuan panas yang dapat menghilangkan blok austenit secara efisien.

Dari permasalahan diatas, penelitian ini menggunakan proses austemper multi-langkah terbalik dimana langkah suhu austemper lebih rendah diikuti oleh langkah suhu yang lebih tinggi. Dibandingkan dengan proses multi-langkah konvensional, total waktu pemrosesan yang diperlukan untuk proses ini telah berlipat ganda sehingga kurang efisien, dengan total perbedaan waktu pemrosesan 6600 detik. Selain itu, ukuran blok ferit bainit telah diperkecil selama proses austemper multi-langkah terbalik, menghasilkan peningkatan kekuatan luluh yang signifikan. Guhui Gao dkk (2018) menunjukkan hasil proses perlakuan panas menggunakan *inverted austempering bainitic multi-step*, menghasilkan kekuatan tarik maksimum sebesar 1772 MPa dengan mereduksi blok austenit untuk melengkapi blok bainitik ferit. Dari keberhasilan penelitian sebelumnya yaitu dengan menambahkan unsur Ni dan dengan menggunakan proses *inverted austempering bainitic multi-step* dapat menghasilkan mikrostruktur bainit halus (*fine bainite*) dimana mikrostruktur ini menjadi target utama dalam penelitian ini. Pada penelitian ini akan membahas tentang pengaruh variasi komposisi unsur nikel terhadap baja tahan cuaca berbasis baja ASTM A588. Sebuah studi oleh Clayton (1997) menemukan bahwa perubahan komposisi unsur-unsur seperti kromium, nikel, dan molibdenum akan mengontrol transformasi *austenite* ke bainit dengan menekan temperatur *bainite start* (B_s). Ketika temperatur ini diturunkan akan meningkatkan sifat kekuatan tanpa mengurangi nilai daktilitas secara signifikan dan dapat digunakan untuk mendapatkan fasa bainit halus (Clayton, 1987). Dengan menggunakan proses ini, bainit diharapkan terbentuk seragam di seluruh sampel.

2. Metodologi

Pada Penelitian ini mempelajari evolusi pembentukan bainit melalui struktur mikro, sifat mekanik dan ketahanan korosi dari pengaruh variasi komposisi nikel pada baja laterit A588 dengan proses *inverted austempering bainitic multi-step*. Secara garis besar penelitian ini dilaksanakan dalam dua tahap, yakni perlakuan panas sampel, serta tahap pengujian sampel. Sebelum memulai tahap pertama penelitian (tahap perlakuan panas) sampel dari tiap variasi dilakukan pengujian metalografi terlebih dahulu untuk memastikan fasaapayang adapada sampel sebelum diberi perlakuan panas *inverted austempering bainitic multi-step*. Pada tahap perlakuan panas sampel, proses yang dilakukan meliputi austenisasi sampel hingga 850°C selama 1800 detik, dilanjutkan dengan pendinginan hingga tahap austempering pertama pada 300 °C selama 600 detik, kemudian dinaikkan ke tahap kedua pada 450 °C dan ditahan selama 1800 detik dengan rentang *cooling rate* 10°-20°C/detik dengan media pendingin berupa udara (*normalizing*). Pada tahap pengujian sampel, proses yang dilakukan meliputi pengujian mikrostruktur melalui metalografi dan XRD, diikuti dengan pengujian mekanik berupa pengujian tarik serta pengujian korosi dilingkungan atmosferik pantai (NaCl 3,5%) melalui pendekatan polarisasi.



Gambar 1. Diagram Skematik Perlakuan Panas Baja A588 Berbasis Nikel Laterit

3. Hasil dan Pembahasan

Identifikasi Diagram CCT (continuous cooling transformation) Menggunakan Software JmatPro

Diagram *continuous cooling transformation* (CCT) yang disimulasikan untuk sampel AT-1 hingga AT-4

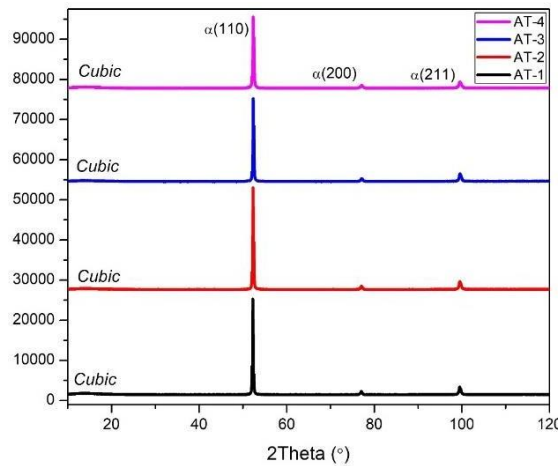
menunjukkan kemungkinan setiap paduan membentuk fasa yang berbeda, yaitu austenit, ferrit, perlit, bainit, dan martensit. Distribusi fasa dalam sampel akan tergantung pada laju pendinginan, temperatur, dan lama waktu *holding*. Adapun gambar Diagram *continuous cooling transformation* (CCT) hasil simulasi *software* JMatPro ditunjukkan pada Gambar 4.1. Laju pendinginan 1: 0,01 -0,1°C/s, laju pendinginan 2 sekitar 0,1-1°C/s, laju pendinginan 3 sekitar 1-10°C/s, dan laju pendinginan 4 sekitar 10-100°C/s. Selain itu, simulasi dilakukan untuk mencari temperatur proses serta temperatur awal martensit dan bainit ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1 Temperatur Martensit Start dan Bainit Start

Sampel	Kadar Ni (wt%)	Martensit Start (°C)	Bainit Start (°C)
AT-1	0,41	398	553
AT-2	1,21	383	539
AT-3	1,95	378	540
AT-4	2,91	355	523

Analisa XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui indeks miller, mendeteksi serta memastikan fasa yang terbentuk melalui bidang kristal pada sampel. Data XRD pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 untuk setiap sampel berdasarkan variasi unsur Ni. Umumnya, bentuk tetragonal adalah struktur kristal bainit (Hasbi,2019). Berdasarkan Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa sampel dengan variasi unsur Ni menggunakan proses *inverted austempering bainitic multi-step* membentuk puncak-puncak antara lain $\alpha(110)$, $\alpha(200)$, dan $\alpha(211)$. Intensitas dengan puncak $\alpha(110)$ mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya unsur Ni meskipun tidak signifikan. Puncak $\alpha(200)$, dan $\alpha(211)$ cenderung konstan terhadap peningkatan unsur Ni dibandingkan dengan puncak $\alpha(110)$. Selain itu, struktur kubik terdeteksi diseluruh sampel.



Gambar 2. Grafik XRD Sampel : a. AT-1 (garis hitam) 0,41% Ni, b. AT-2 (garis merah) 1,21% Ni, c. AT-3 (garis biru) 1,95% Ni, d. AT-4 (garis merah jambu) 2,91% Ni

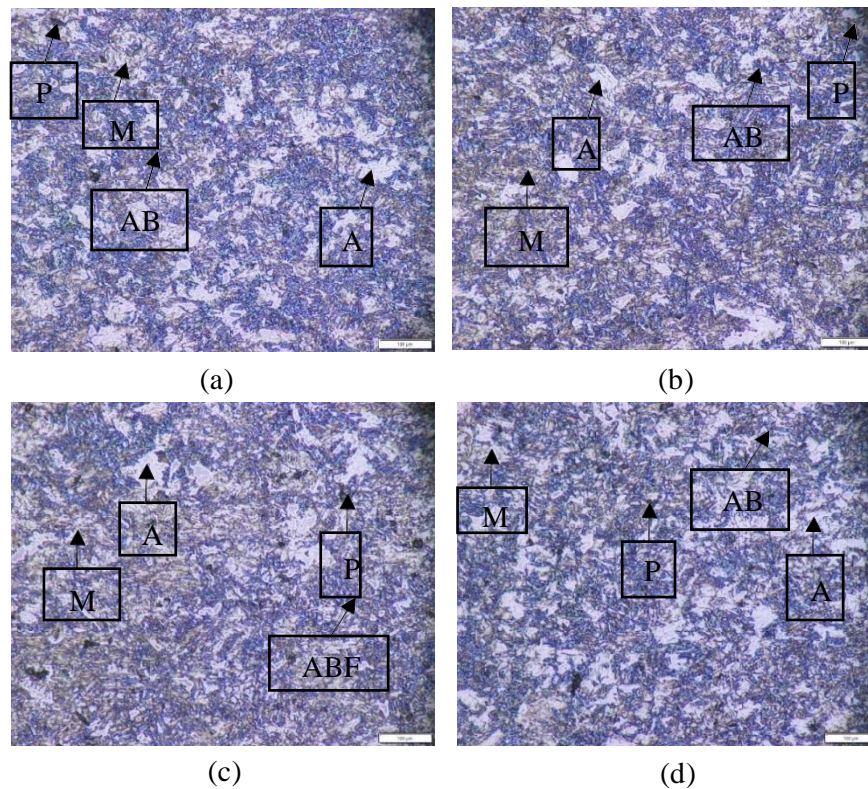
Analisa Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada tiap sampel. Teknik identifikasi fasa bainit adalah melalui etsa warna yang mengombinasikan larutan nital dengan etsa sodium metabisulfat (SMB). Kombinasi etsa tersebut akan menghasilkan warna yang mewakili masing-masing fasa. Warna yang dihasilkan ini diantaranya warna biru yang mewakili fasa bainit, warna cokelat yang mewakili fasa martensit, dan warna putih yang mewakili fasa ferrit dan austenit (Hasbi, 2019). Gambar 3 menunjukkan fasa akhir dari sampel yang telah diproses melalui *inverted austempering bainitic multi-step* dengan

fraksi fasa seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Fasa bainit pada sampel hasil akhir (Gambar 4.7) memiliki bentuk fasa *acicular bainitic ferrite* (ABF). Pembentukan *bainitic ferrite* dari paduan yang memiliki komposisi tertentu adalah hasil dari pendinginan kontinyu (*continuous cooling*). *Bainitic ferrite* umumnya terdiri dari *aggregate bainitic ferrite* dan austenit sisa (Pratomo, et al., 2015). Mikrostruktur ini sesuai dengan hasil dari karakterisasi XRD yang menunjukkan adanya eksistensi struktur kubik dan tetragonal pada hasil perhitungannya. Keberadaan struktur tersebut menunjukkan adanya fasa bainit dan ferit (Meryanalinda, 2019).

Tabel 2. Fraksi Fasa Sampel AT-C (sampel hasil akhir)

%Ni	Ferit (RA) (%)	Perlit (%)	Martensit (%)	Bainit (%)
0,41%	18	3	4	73
1,21%	7	12	13	68
1,95%	12	6	11	71
2,91%	9	5	6	80



Gambar 3. Mikrostruktur Sampel AT-C perbesaran 100x menggunakan etsa Nital 4% (immers 5 detik) dan SMB 10% (swab 5x): (a). AT-C1, (b). AT-C2, (c). AT-C3, (d). AT-C4

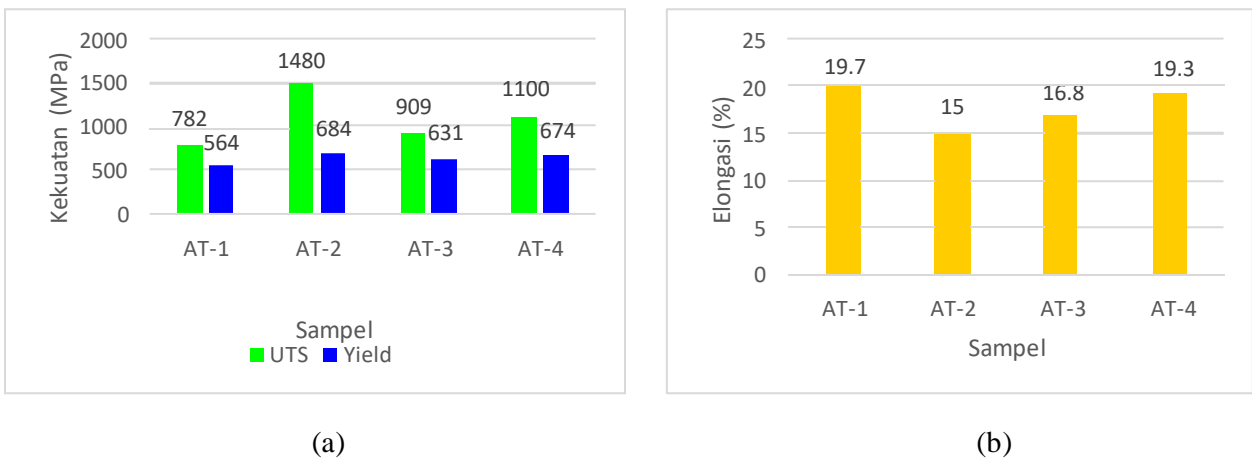
Analisa Uji tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi Ni melalui proses *inverted austempering bainitic multi-step* terhadap kekuatan dan keuletan sampel Gambar 5 (a) menunjukkan hasil pengujian tarik dari sampel AT-C (hasil akhir). Kekuatan tarik maksimum terbesar dimiliki oleh sampel AT2 (1,21%Ni) sebesar 1480 MPa, diikuti oleh sampel AT4 (2,91%Ni) sebesar 1100 MPa, selanjutnya sampel AT3 (1,95%) dan sampel AT1 (0,41%) sebesar 909 MPa dan 782 MPa. Apabila diurutkan dari nilai kekuatan tarik maksimum dari yang tertinggi hingga paling rendah yaitu: AT2>AT4>AT3>AT1. Sedangkan untuk nilai kekuatan luluh dari sampel ini adalah 564 MPa, 682 MPa, 631 MPa, dan 674 MPa untuk sampel AT1 hingga AT4.

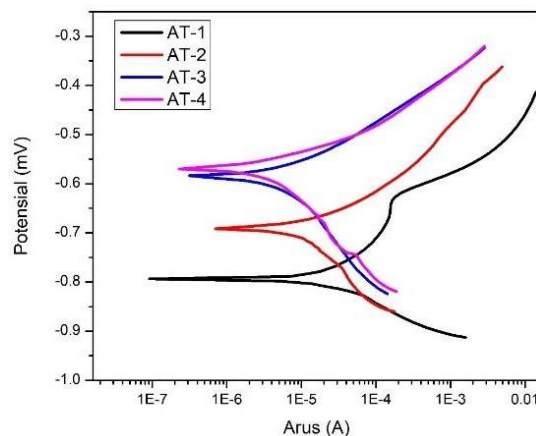
Ketidaklinearan kekuatan tarik maksimum ini diakibatkan kehadiran fasa yang bersifat kuat seperti fasa perlit pada sampel AT2. Selanjutnya nilai keuletan (elongasi) tertinggi pada sampel ini dimiliki oleh sampel AT1 (0,41%Ni) yaitu sebesar 19,7%, diikuti oleh sampel AT4 (2,91%Ni) yaitu sebesar 19,3%. Angka tersebut lebih besar daripada nilai elongasi yang dimiliki oleh sampel AT3 (1,91%Ni) dan AT2 (1,21%Ni) yaitu sebesar 16,8% dan 15,8%. Sehingga apabila diurutkan dari nilai elongasi tertinggi hingga terendah yaitu: AT1>AT4>AT3>AT2. Seperti yang dikatakan Neetu dkk (2021), keberadaan austenit sisa bersamaan dengan kehadiran fasa bainit akan meningkatkan keuletan (Neetu, et al., 2021).

Analisa Uji Korosi

Pengujian korosi dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi unsur Ni dan perlakuan panas terhadap laju korosi sampel. Kurva polarisasi menunjukkan nilai rapat arus korosi (I_{corr}) dan potensial korosi (E_{corr}). Gambar 6 menunjukkan kurva polarisasi dari variasi komposisi Ni melalui proses inverted austempering bainitic multi-step. Kurva berwarna biru menunjukkan sampel AT1 (0,41%Ni), kurva berwarna merah menunjukkan sampel AT2 (1,21%Ni), kurva berwarna hijau terang menunjukkan sampel AT3 (1,95%Ni), kurva berwarna biru muda menunjukkan sampel AT4 (2,91%Ni). Pada media korosif 3,5% NaCl, nilai E_{corr} sebesar -793,4 mV, -641,5 mV, -578,8 mV, dan -570,1 mV pada sampel AT-1 hingga AT-4. Sedangkan nilai I_{corr} pada setiap sampel adalah $19,44 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $10,45 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $6,213 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, dan $9,957 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ pada sampel AT-1 hingga AT-4. *Fitting* ekstrapolasi linear dilakukan pada Gambar 4.14 untuk memperoleh nilai rapat arus korosi (I_{corr}), potensial korosi (E_{corr}), laju korosi yang ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Tarik : (a). Kekuatan Tarik Maksimum dan kekuatan luluh, (b). Elongasi



Gambar 6. Kurva Polarisasi Tafel A588 pada Larutan 3.5% NaCl

Tabel 4.2 Nilai laju korosi, I_{corr}, dan E_{corr}

Sampel	I _{corr} (10 ⁻⁶ A/cm ²)	E _{corr} (mV)	Laju Korosi (mpy)
AT-1	19,44	-793,4	5,22
AT-2	10,45	-641,5	2,80
AT-3	6,213	-578,8	1,77
AT-4	9,957	-570,1	1,25

Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil analisa mikrostruktur menunjukkan fraksi fasa bainit dari sampel baja A588 berbasis nikel laterit menunjukkan fraksi fasa bainit sebesar 73%, 68%, 71%, 80% pada sampel AT-C1 hingga AT-C4 (sampel hasil langkah kedua). Strukturmikro bainit yang terbentuk pada hasil akhir adalah *acicular bainitic-ferrite*
2. Unsur Ni dan proses perlakuan panas memiliki pengaruh terhadap nilai kekuatan tarik maksimum tertinggi (UTS) dimiliki oleh sampel AT-2 sebesar 1480 MPa, diikuti sampel AT-4 sebesar 1100 MPa, sampel AT-3 sebesar 909 MPa, dan AT-1 sebesar 782 MPa. Sedangkan nilai kekuatan luluh tertinggi dimiliki sampel AT-2 sebesar 682 MPa, diikuti sampel AT-4 sebesar 674 MPa, sampel AT-3 sebesar 631 MPa, dan AT-1 sebesar 564 MPa. Selain itu, nilai elongasi tertinggi dimiliki sampel AT-1 sebesar 19,7%, diikuti sampel AT-4 sebesar 19,3%, sampel AT-3 sebesar 16,8 %, dan AT-2 sebesar 15.8%.
3. Unsur Ni dan proses perlakuan panas berpengaruh terhadap ketahanan korosi sampel dan didapatkan nilai E_{corr} sebesar -793,4 mV, -641,5 mV, -578,8 mV, dan -570,1 mV pada sampel AT-1 hingga AT-4. Sedangkan nilai I_{corr} pada setiap sampel adalah 19,44 x10⁻⁶ A/cm², 10,45 x10⁻⁶ A/cm², 6,213 x10⁻⁶ A/cm², dan 9,957 x10⁻⁶ A/cm² pada sampel AT-1 hingga AT-4. Penurunan nilai E_{corr} dan I_{corr} menunjukkan bahwa laju korosi akan berkurang seiring dengan penambahan unsur Ni dengan nilai laju korosi sebesar 5,22 mpy, 2,80 mpy, 1,77 mpy, dan 1,25 mpy pada sampel AT-1 hingga AT-4.

Acknowledgments

Penulis mengucapkan terima kasih kepada ibu Miftakhur Rohmah S.T., M.T yang sudah membantu penulis dalam pembiayaan penelitian, serta ibu Gusti Umindya Nur Tajalla S.T., M.T sebagai dosen pembimbing yang sudah membantu banyak penulis dalam Menyusun laporan tugas akhir, serta teman tugas akhir yang telah membantu menyelesaikan penelitian dan pembuatan artikel ilmiah ini.

Daftar Pustaka

- Adjiantoro, B., Jamali, A., Binudi, R. & Hasbi, M. Y., 2016. Characteristics Of Mechanical Properties For Steel Laterite Through Hot Working And Heat Treatment Process. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, Volume 6, pp. 75-80.
- Avishana, B., Tavakolian, M. & Yazdani, S., 2017. Two-step austempering of high performance steel with nanoscale microstructure.. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 178-185, p.693.
- Cano, H. D., 2017. Effect of Cu, Cr and Ni alloying elements on mechanical properties and atmospheric corrosion resistance of weathering steels in marine atmospheres of different aggressivities.. *Materials and Corrosion*, 1(69), pp. 8-19.
- Citrawati, F., Dwiwandono, R. & Firmansyah, L., 2019. The Effect of Ni on the Formation of Bainite in Fe -Ni Lateritic Steels through Semi-continuous Cooling Method. *International Journal of Technology* , pp. 60-70.
- Clayton, P., 1987. Wear Behaviour of Bainitic Steels. *British Rail Research*, pp. 199 - 220.
- Gao, G. et al., 2018. Inverted multi-step bainitic austempering process routes: Enhanced strength and ductility.. *Materials Science and Engineering*.
- Hasbi, M. Y., 2019. *Studi Pembentukan Fasa Dan Sifat Mekanik Baja Bainitik Fe-Ni Berbasis Laterit Hasil Canai*

- Dingin Melalui Proses Austempering Dengan Variasi Media Pendingin*. Depok: Universitas Indonesia.
- Jia, J., Liu, Z., Cheng, X. & Du, C., 2021. Development and optimization of Ni-advanced weathering steel: A review. *Corrosion Communications*.
- Meryanalinda, 2019. *Studi Pembentukan Fasa dan Kekerasan Pada Baja Bainitik Fe-Ni-Al Berbasis Baja Laterit Setelah Proses Canai Dingin*. Depok: Universitas Indonesia.
- Morcillo, M. et al., 2014. Weathering steels: from empirical development to scientific design. A review. *Corros. Sci*, Volume 83, pp. 6-31.
- Neetu, Katiyar, P. K., Sangal, S. & Mondal, K., 2021. Effect of various phase fraction of bainite, intercritical ferrite, retained austenite and pearlite on the corrosion behavior of multiphase steels. *Corros.Sci*, p. 109043.
- P2MM, P. P. M. D. M. L. I. P. I., 2016. Pengembangan Baja Laterit Jembatan Menuju Kemandirian. Tangerang: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Rohmah, M., Irawan, D. & Romijarso, T. B., 2021. Pengaruh Penempaan Dan Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik Dan Ketahanan Korosi Pada Modifikasi Baja Laterit A-588. *Majalah Ilmu dan Teknologi*, pp. 33-42.
- Zhou, Y., Chen, J., Y. Xu & Liu, Z., 2013. Effects of Cr, Ni and Cu on the corrosion behavior of low carbon microalloying steel in a Cl- containing environment. *J. Mater. Sci. Technol*, Volume 29, p. 168–174.