

# Pengembangan Baja Laterit Modifikasi A588 Menggunakan Proses Termomekanikal Diikuti dengan Proses Temper Temperatur Rendah untuk Aplikasi Baja Tahan Cuaca

Miftakhur Rohmah<sup>\*</sup>, Dedi Irawan, Dedi P. Utama, Toni B. Romijarso

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia  
Kawasan Puspiptek, Gedung 470, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia 15314

## Abstrak

Baja laterit A-588 berpotensi dirujuk sebagai baja paduan rendah-berkekuatan tinggi untuk aplikasi baja tahan cuaca. Baja Laterit A-588 dikembangkan melalui proses termomekanikal yang diikuti proses penemperan guna mendapatkan kekuatan dan ketahanan korosi tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui korelasi antara penambahan kadar nikel, variasi laju pendinginan pada saat perlakuan panas terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi baja laterit A-588. Baja laterit dengan variasi kadar nikel 0,42%; 1%, 2%, dan 3%, mengalami proses homogenisasi, pengerolan panas, perlakuan panas dengan tiga variasi pendinginan yaitu media air, oli, dan udara, yang kemudian diproses temper pada temperatur 150 °C. Temper temperatur rendah menyebabkan pengendapan karbida halus dan transisi fasa martensit menjadi bainit, sehingga struktur mikro akhir berupa bainit, lath martensit temper, karbida, dan ferrite. Kadar nikel 3% dengan laju pendinginan cepat akan meningkatkan pembentukan fasa lath martensit temper dan bainit, sehingga kekuatan dan kekerasan cenderung meningkat serta regangan dan ketahanan korosi semakin menurun akibat reaksi galvanic. Sifat mekanik paling optimal diperoleh pada sampel 2% nikel dengan media air (kekuatan 1203 MPa, regangan 10%, kekerasan 404 BHN, laju korosi 1,306 mpy).

**Kata kunci:** baja laterit a-588; martensit temper; media pendinginan; temper temperatur rendah; termomekanikal

## Abstract

**[Title: The development of a588 modified laterite steel using thermomechanical and low-temperature tempering process for weather resistant steel]** Laterite Steel A-588 has the potential to be a high strength low alloy for Corten steel application. Laterite steel A-588 is developed through a thermomechanical process followed by a tempering process to obtain high strength and corrosion resistance. This study aims to determine the correlation between the addition of nickel content, the variation of the cooling rate during heat treatment to the mechanical properties, and the corrosion resistance of A-588 laterite steel. The Cu, Cr, Ni, P, and Si elements significantly impact microstructure transformation. Laterite Steel A-588 with nickel and thermo-mechanical process variation has been focused on in this research. Laterite steel with 0,42%, 1%, 2%, and 3% nickel varied was homogenized, hot rolled, and heat treated with three cooling variations by water, oil, and air. They are processed with 150 C tempering. Low tempering temperature caused fine carbide precipitation and phase transition of martensite to bainite. This resulted in bainite as the final microstructure, lath tempered martensite, carbide, and ferrite. 3% Ni with a fast cooling rate increased the tempered martensite and bainite phase formation. It allowed the strength and hardness to increase relatively, followed by decreased elongation and corrosion resistance caused by the galvanic reaction. Most optimal of mechanical properties determined at a sample with 2% nickel in a water medium (strength 1203 MPa, elongation 10%, hardness 404 BHN, corrosion rate 1,306 mpy).

**Keywords:** lateritic steel a-588; martensite tempered; low temperature temper; thermomechanical

---

<sup>\*)</sup> Penulis Korespondensi.

E-mail: [mift007@lipi.go.id](mailto:mift007@lipi.go.id)/ [miftakhur.its@gmail.com](mailto:miftakhur.its@gmail.com)

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan baja tahan cuaca (baja Cor-Ten), khususnya untuk daerah pantai dan struktur kelautan mulai meningkat seiring dengan percepatan pembangunan infrastruktur berupa konstruksi jembatan. Karakteristik dominan dari baja tahan cuaca adalah kekuatan tinggi dan ketahanan korosi tinggi, yang secara substantial lebih baik daripada baja karbon. Hal ini dipengaruhi kandungan unsur paduan Cu, Cr, Ni, P, dan Si (tidak lebih dari 5%) dalam baja Cor-Ten yang mendorong pembentukan lapisan karat pelindung setelah terpapar cuaca beberapa tahun, atau yang dikenal dengan patina (Morcillo, 2019). Oksidasi permukaan baja tahan cuaca membutuhkan waktu enam bulan, tetapi proses perlakuan permukaan dapat mempercepat oksidasi hingga hanya dua jam.

Baja Corten diklaim mempunyai 30% sifat mekanik yang lebih baik daripada baja karbon dengan ketebalan yang lebih tipis. Baja Cor-Ten pada dasarnya mempunyai dua jenis yang berbeda, yakni ASTM A 242 dan ASTM A588. Material A588 memiliki kekuatan luluh minimal 50 ksi (340 MPa) dan kekuatan tarik maksimum 70 ksi (480 MPa) untuk semua bentuk gulungan dan ketebalan pelat hingga ketebalan 4 in (100 mm) (ASTM, 2004). Kombinasi sifat mekanik dan ketahanan korosi A-588 merupakan target utama dalam penelitian ini. Bijih nikel laterit akan menghasilkan baja dengan kandungan nikel antara 2-3% setelah melalui proses *converting* dan metalurgi sekunder lainnya sehingga dihasilkan sifat unggul kekuatan tinggi, ketahanan korosi tinggi, dan sifat mampu las yang baik. Baja laterit telah diaplikasikan sebagai baja kekuatan tinggi, baja tahan peluru, dan baja tahan cuaca (Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, 2017). Namun, informasi mengenai karakteristik baja laterit untuk baja tahan cuaca sangat minimal sehingga diperlukan sebuah kegiatan penelitian lebih lanjut guna memperoleh formula yang tepat mengenai penambahan kadar nikel dan proses termomekanikalnya pada saat proses manufaktur.

Komposisi paduan, proses termomekanikal, dan perlakuan panas memainkan peranan penting dalam transformasi fasa sehingga menentukan mikrostruktur akhir yang berasosiasi dengan sifat mekanik dan ketahanan korosi. Penelitian terdahulu menyimpulkan bahwa nikel mempunyai peranan yang sama seperti Cr dalam Baja Cor-Ten. Cano (2017) menyatakan 1-3% nikel dalam Baja Cor-Ten menyebabkan pembentukan martensit dan atau bainit dengan ukuran butiran halus (11-15,6  $\mu\text{m}$ ), penurunan kadar lepidokrokrit dan peningkatan kadar goethite (Cano, 2017). Selain itu,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  terbentuk pada tahap awal reaksi sebagai tempat nukleasi jaringan nano  $\text{Fe}(\text{O},\text{OH})_6$ . Kehadiran  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  mengubah mekanisme pertukaran ion film produk korosi sehingga efektif menghambat penetrasi

ion klorida dan meningkatkan ketahanan korosi pada semua atmosferik (Fan dkk., 2020; Jia, 2020; Diaz, 2018). Penambahan nikel bertujuan untuk meminimalkan terjadinya penggetasan (*embrittlement*) panas selama proses pengerolan. Proporsi nikel dalam komposisi baja Corten harus jauh lebih tinggi daripada tembaga.

Selain itu, mikrostruktur, terutama pada kandungan fasa dan ukuran butir juga berpengaruh terhadap ketahanan korosi atmosferik, (Morcillo, 2019 dan Chen dkk., 2012). Pada media 0.1 mol/liter NaCl, urutan nilai potensial korosi  $E_{\text{corr}}(\text{ferrit}) > E_{\text{corr}}(\text{bainit}) > E_{\text{corr}}(\text{perlit})$ , dan nilai densitas arus korosi  $i_{\text{corr}}(\text{ferrit}) < i_{\text{corr}}(\text{bainit}) < i_{\text{corr}}(\text{perlit})$  (Zhang dkk, 2020). Selain itu, adanya stuktur mikro-galvanik antara martensit-sisa austenit dan fasa bainit-ferrit dalam baja karbon rendah, akan mempercepat disolusi anodik. Mikro-galvanik antara fase sementit lamelar dan fase ferrit, juga meningkatkan laju korosi baja ferrit-perlit dalam larutan asam klorida. Pelarutan anodik fasa ferrit diatur oleh proses transfer muatan, sedangkan reaksi katodik fasa sementit diatur oleh proses difusi (Wang dkk, 2020). Struktur mikro yang terbentuk dipengaruhi oleh proses termomekanikal dan proses perlakuan panas, seperti proses pengerolan, perlakuan panas dengan berbagai variasi laju pendingin, dan proses penemperan.

Baja setelah proses rol dan perlakuan panas memiliki kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang tinggi. Kekuatan telah ditingkatkan karena rekristalisasi dinamis pada temperatur tinggi selama pemrosesan termomekanis 700 – 1250°C akibat penghalusan butir sehingga kekuatan dan keuletan meningkat (Fierro dkk, 2014). Penguatan utama baja HSLA berasal dari pengendapan paduan karbida terdispersi halus dan penghalusan butir diperoleh dari proses perlakuan panas dan proses termomekanikal (TMCP) (Yue dkk., 2015). Laju pendinginan memiliki pengaruh besar pada cara karbon didistribusikan, sedangkan elemen paduan memodifikasi transformasi fasa selama normalisasi dan meningkatkan kemampuan pendinginan dengan menurunkan laju pendinginan kritis. Unsur-unsur paduan seperti Cu dan Cr dapat bekerja bersama untuk memberikan efek pengerasan pada martensit, dan Cr dapat mendorong pembentukan lebih banyak karbida, sehingga meningkatkan kedalaman pengerasan (Cano, 2017). Martensit adalah struktur mikro dengan sifat mekanis paling keras dan terkuat, tetapi juga paling rapuh dan tidak ulet. Temperatur rendah temper (LTT) diterapkan antara 150-200°C untuk menghasilkan kekuatan sangat tinggi berdasarkan penghalusan struktur.

Pada penelitian ini, modifikasi baja laterit A-588 dikembangkan melalui proses termomekanikal yang diikuti proses penemperan pada temperatur rendah, sebagai alternatif baja Cor-Ten komersial. Hubungan



Gambar 1. Baja laterit A-588 (a) sebelum dan (b) sesudah proses pengerolan panas

antara komposisi kimia, laju pendinginan pada saat proses termomekanikal, struktur mikro, dan perilaku korosi pada baja laterit A-588 termodifikasi akan dibahas detail. Baja laterit A-588 dengan variasi kadar nikel dan perlakuan panas tertentu menjadi objek penelitian ini guna mendapatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi yang tinggi di lingkungan air laut.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan dan Preparasi Penelitian

Baja Laterit yang telah diolah dari bijih laterit menjadi alternatif sumber nikel yang ditambahkan kedalam komposisi paduan. Baja Laterit Fe-Ni dilakukan proses peleburan didalam tungku induksi *Inductotherm* tipe *butterfly* dengan memperhatikan keseimbangan massa. Bahan baku proses pengecoran berupa baja laterit, skrap baja, paduan tembaga, ferokrom, feromangan, ferosilikon yang dihitung sesuai neraca massa. Komposisi A-588 menjadi target utama proses peleburan (*investment casting*) yang kemudian dimodifikasi kandungan nikel

sebesar 1, 2, dan 3%, seperti pada Tabel 1. Komposisi kimia dianalisis menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

Sampel hasil pengecoran (*ingot*) dihomogenisasi dengan cara pemanasan pada temperatur 900 °C (temperatur austenit) selama 30 menit didalam *muffle furnace* (merk Carbolite CWS 1300 kecepatan pemanasan 5°C/menit) dan dilanjutkan dengan pendinginan udara untuk menghilangkan struktur dendritik. Kemudian, ingot dipotong dengan mesin *cutting* dan dihaluskan permukaan dengan mesin *surface grinding* GLINT untuk mensekagamkan ukuran menjadi 5x10x1 cm sebagai sampel rol. proses pengerolan panas dengan cara memanaskan hingga temperatur kristalisasi (750 °C) selama ditahan 1 jam. Pengerolan panas dilakukan dilakukan dalam 2 siklus sehingga diperoleh reduksi ketebalan sebesar 70% dan ketebalan akhir plat sebesar 0,3 cm. Perubahan ukuran dimensi ditunjukkan pada Gambar 1.

2.2 Proses Perlakuan Panas dan Temper

Hasil pengerolan panas kemudian diteliti lebih lanjut mengenai pengaruh perlakuan panas pada baja laterit A-588 modifikasi. Proses pemanasan menggunakan *muffle furnace* yang memiliki kecepatan pemanasan 5°C/menit. Spesimen dipanaskan pada temperatur austenisasi di 850°C selama 1 jam dan dilanjutkan pendinginan menggunakan beberapa jenis media. Perbedaan media pendingin diilustrasikan sebagai laju kecepatan. Media pendingin yang digunakan berupa udara, oli, dan air. Setelah mencapai kondisi ekuilibrium pada temperatur ruang, sampel kemudian diproses penemperan dengan memanaskan ulang spesimen pada temperatur temper 150°C. Mekanisme proses pengerolan panas yang dilanjutkan proses perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Komposisi Kimia Modifikasi Baja Laterit A-588

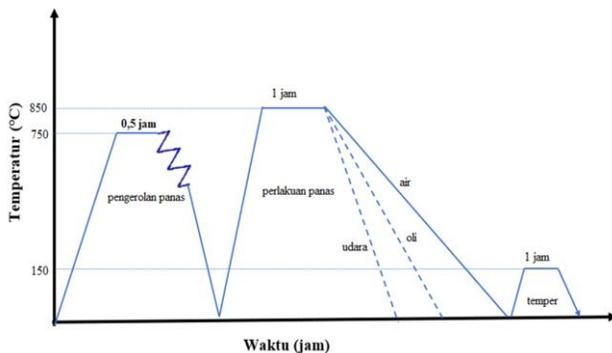
Komposisi Kimia (%berat)	#1	#2	#3	#4
C	0,177	0,1777	0,161	0,161
Al	0,02	0,05	0,19	0,16
S	0,0026	0,0024	0,0030	0,0024
Cr	0,49	0,49	0,50	0,51
Mn	1,08	1,06	1,01	0,97
Ni	0,41	1,21	1,95	2,91
P	0,011	0,004	0,014	0,001
Cu	0,32	0,34	0,32	0,32
Si	0,43	0,41	0,32	0,27
V	0,064	0,064	0,062	0,062
Fe	balance	balance	balance	balance

**2.3 Pengujian Metalografi, Mekanik dan Korosi**

Karakterisasi sifat mekanik dilakukan melalui pengujian metalografi, tarik dan kekerasan. Sedangkan, karakterisasi sifat ketahanan korosi dilakukan melalui pengujian polarisasi (uji Tafel). Preparasi sampel uji metalografi meliputi proses pemotongan hingga dimensi 1x1, proses *mounting* menggunakan epoksi resin, proses *grinding* menggunakan kertas ampelas SiC (grade 80 hingga 2000), proses *polishing* menggunakan pasta alumina dan proses etsa. Larutan etsa digunakan berupa larutan nital 2% (2 ml asam nitrat + 98 ml alkohol). Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mesin mikroskop optik merk OLYMPUS.

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui sifat kekuatan dan keuletan dengan menggunakan mesin Tinius Olsen 300 SL. Baja laterit A-588 dipreparasi menjadi spesimen uji tarik dengan dimensi yang mengacu pada standar ASTM E8. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dari sampel, yang diperoleh dari rata-rata nilai 3 titik. Pengujian kekerasan menggunakan mesin Mitutoyo HM-200 dengan metode Brinell. Sampel uji dikenai beban indentasi 1000 kgf selama 30 detik menggunakan indenter bola baja, kemudian diameter hasil indentasi diukur melalui mikroskop.

Pengujian polarisasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik sampel dengan media korosif berupa larutan NaCl 3,5% pada temperatur kamar. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan tiga elektroda yaitu sampel uji sebagai elektroda kerja, *Saturated Calomel Electrode* (SCE) sebagai elektroda referensi, dan platina sebagai elektroda pembantu. Sampel dicelupkan selama 1 jam sebelum memulai uji polarisasi. Uji polarisasi dilakukan pada rentang potensial -200mV sampai +200 mV dengan kecepatan *scan* 1mV/s. Pada prosedur *fitting* Tafel didapatkan nilai rapat arus korosi ( $I_{corr}$ ) dan potensial korosi ( $E_{corr}$ )



**Gambar 2.** Mekanisme proses termomekanikal baja laterit A-588

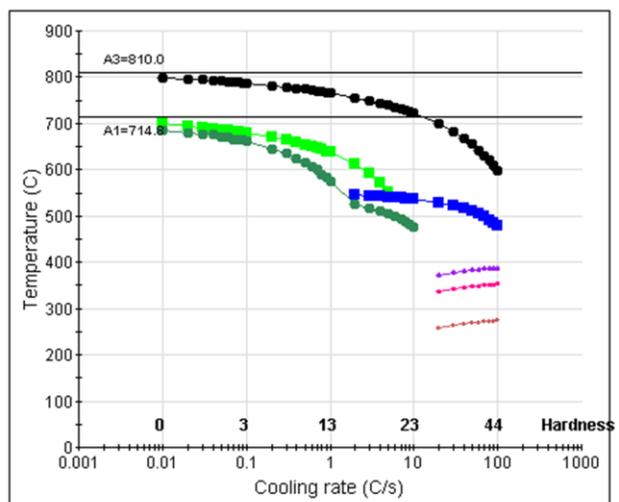
**3. Hasil dan Pembahasan**

**3.1 Penentuan CCT Diagram**

Diagram *Continuous Cooling Transformation* (CCT) berfungsi untuk mengetahui hubungan antara laju pendinginan kontinyu dengan struktur mikro yang terbentuk pada proses dekomposisi austenit. Kalkulasi simulasi diagram CCT dilakukan menggunakan *software* JmatPro® version 12.

Gambar 3 menunjukkan diagram CCT yang dikonstruksi pada kisaran laju pendinginan 0,01–100 °C/s dan nilai kekerasan yang dicapai dengan tingkat pendinginan yang berbeda juga ditambahkan pada diagram. Untuk paduan Baja Laterit A-588, temperatur pembentukan austenit Ac1 dan Ac3 sebesar 714 °C dan 810 °C, yang diperoleh dari kurva pemanasan menggunakan laju pemanasan 5 °C/s. Dekomposisi austenit menjadi ferrit, perlit, dan martensit dikalkulasikan pada temperatur 810 °C (laju pendinginan 0,01-100 °C/s); 714,8 °C (laju pendinginan 0,01-10 °C/s) dan 389,7 °C (laju pendinginan 11-100 °C/s). Penambahan Mn, Cu, Cr, dan Ni (Tabel 1) dalam Baja Laterit A-588 menurunkan temperatur transformasi efektif untuk laju pendinginan tertentu yang memperluas jangkauan transformasi bainit (Mandal, Ghosh, & Mukherjee, 2016).

Pembentukan bainit ( $\alpha+Fe_3C$ ) pada Baja Laterit A-588 terjadi dengan kisaran laju pendinginan 2-100 °C/s pada temperatur awal 583,7 °C. Adanya nikel menggeser kurva CCT ke arah kanan sehingga menunda reaksi ferrit, perlit, dan bainit. Selain itu, penambahan Ni sebanyak 4,5% dapat menggeser daerah ferrit menuju garis laju pendinginan yang lebih lambat pada kurva CCT. Laju pendinginan udara di luar *furnace* sekitar 13



**Gambar 3.** Kalkulasi Diagram CCT Baja Laterit A-588 dari hasil *software* JMatPro (Warna hitam = ferrit, hijau muda = perlit, hijau tua = austenit, biru = bainit) dengan temperatur austenisasi 850 °C selama 1 jam

C/s sehingga media oli dan air memiliki laju pendinginan lebih besar daripada 13 °C/s (Citrawati, Dwiwandono, & Firmansyah, 2020). Nikel merupakan unsur penstabil austenit dan mengurangi laju pendinginan kritis pembentukan bainit (Martin, dkk., 2021). Bainit biasanya terbentuk pada temperatur antara transformasi perlit dan martensit displasif (Singh, 2012). Oleh karena itu, laju pendinginan dengan media oli dan air memungkinkan membentuk bainit ketika pendinginan mencapai temperatur sekitar 583,7 °C.

### 3.2 Pengamatan Struktur Mikro

Berdasarkan pada Tabel 1, Baja Laterit A-588 didominasi oleh unsur Cu, Cr, Ni, P, dan Si sehingga berpeluang untuk aplikasi baja tahan cuaca. Kandungan karbon berkisar 0,16-0,17% dan jumlah unsur paduan kurang dari 10% menjadikan baja laterit A-588 termasuk kategori baja paduan rendah (*low-alloy steel*). Untuk menjadi kelompok baja paduan rendah-berkekuatan tinggi diperlukan pengamatan lebih lanjut pada struktur mikro dan sifat mekaniknya. Pengamatan struktur mikro berfungsi untuk mengetahui karakteristik fasa yang terbentuk sehingga dapat memprediksikan sifat mekanik dan korosi dari baja laterit A-588. Perubahan mikrostruktur sangat dipengaruhi oleh waktu dan temperatur penempuran. Struktur mikro baja laterit A-588 setelah proses termomekanikal dan diikuti proses temper ditunjukkan pada Gambar 4 dan 5.

Gambar 4 menunjukkan pengaruh kadar nikel pada baja laterit A-588 setelah proses termomekanikal berupa proses pengerolan panas dilanjutkan perlakuan panas dengan media pendinginan air. Secara umum, struktur mikro yang terbentuk berupa bainit, *lath* martensit temper, karbida, dan ferrit (Gambar 4a-d). Selain itu, porositas teramati pada sampel akibat ketidaksempurnaan proses pengecoran baja laterit. Pertumbuhan bainit dikendalikan oleh difusi atom karbon dan dapat terjadi dalam fenomena transformasi tidak lengkap (transformasi statis) akibat pembentukan martensit kembar pada saat pendinginan kontinyu mencapai pembentukan bainit (An, dkk., 2020). Austenit bertransformasi secara isothermal menjadi ferrit dan karbida diatas temperatur Ms dengan laju pendinginan agak cepat (Caballero, 2012; Singh, 2012).

Meskipun mengalami pendinginan cepat, sampel tidak menunjukkan tanda-tanda *quench-cracking* (Gambar 4 a-d). Struktur mikro akhir Baja Laterit pada Gambar 4a-d ini konsisten seperti pada penelitian (Haiko, dkk., 2019), yang menyebutkan bahwa penempuran 150 °C merupakan tahap pertama proses temper yang menyebabkan pengendapan halus, kemungkinan transisi fasa martensit menjadi bainit, dan terbentuknya karbida.

Pada Gambar 4 dan 5, fasa martensit temper diindikasikan dengan bentuk bilah (*lath*) dan berwarna

hitam sedikit pudar sebagai dampak dari kandungan karbon rendah, sekitar 0,17% pada baja laterit A-588. Fasa ferrit diindikasikan dengan bentuk pulau memanjang (*elongated*) berwarna putih. Bainit diindikasikan dengan bentuk blok berwarna terang dan berbintik hitam, dan karbida diindikasikan dengan bentuk tak beraturan berwarna hitam.

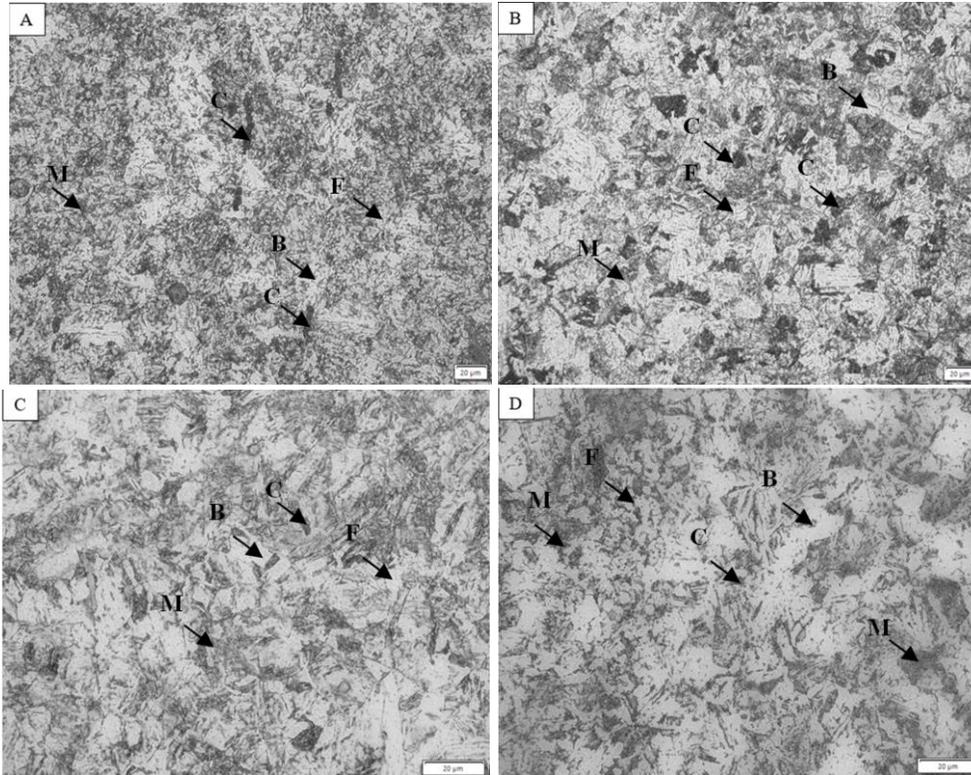
Seiring dengan kadar nikel semakin tinggi, ukuran butir menjadi semakin besar (Gambar 3b-d), dan terlihat blok-blok fasa bainit atau daerah terang yang semakin besar (Gambar 3c-d) dan berbentuk relatif bulat menyerupai pulau. Proses penempuran dengan temperatur rendah (< 200 °C tidak signifikan mempengaruhi perubahan mikrostruktur martensit (Jena dkk., 2014). Pengasaran butiran adalah fenomena metalurgi khas yang terjadi selama proses termomekanik seperti pengerolan panas diikuti perlakuan panas.

Pada saat pengerolan panas, struktur mikro baja laterit berupa ferrit-perlit terpit/terelongasi, yang kemudian bertransformasi menjadi austenit seluruhnya ketika dipanaskan pada temperatur austenisasi. Seiring dengan pendinginan cepat dengan media air, austenit bertransformasi menjadi martensit pada temperatur dibawah temperatur kritis Ms dan berakhir pada garis Mf. Temperatur transformasi martensit awal dan akhir (Ms dan Mf) bergantung pada komposisi kimianya. Prediksi temperatur awal (Ms) diformulasikan oleh K.E. Thelning seperti persamaan 1 (Canale, 2014).

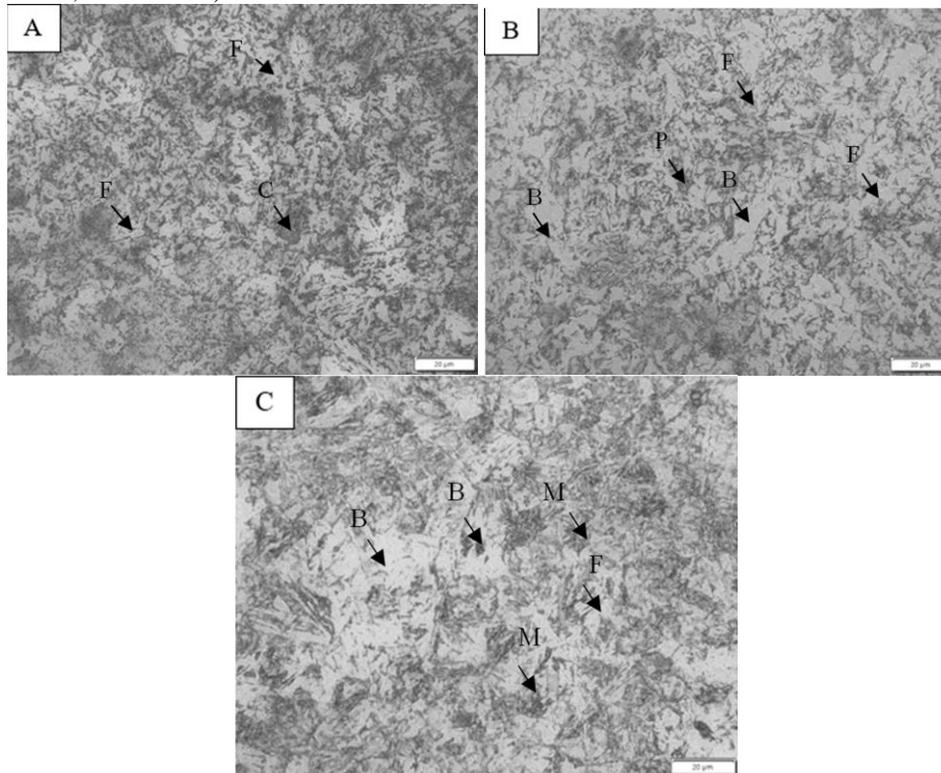
$$Ms(\text{Celsius}) = 561 - 474 (\%C) - 33 (\%Mn) - 17 (\%Ni) - 17 (\%Cr) - 21 (\%Mo) \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan 1, perkiraan temperatur awal transformasi martensit pada sampel 1, 2, 3, dan 4 adalah 426,16°C; 413,22°C; 409,71°C ; dan 309,54°C. Oleh karena itu, kadar nikel secara tidak langsung mempengaruhi jumlah martensit yang terbentuk dan jumlah fraksi martensit temper. Selama temper, reaksi *solid-state* terjadi dan martensit *as-quench* berubah menjadi martensit temper. Proses tahap 1 (kisaran temperatur temper 100-200°C) melibatkan pemisahan karbon, presipitasi ε-karbida (Fe<sub>2,4</sub>C) dengan struktur heksagonal atau h-carbide (Fe<sub>2</sub>C) dengan struktur kristal ortorombik pada temperatur 50 °C, dekomposisi austenit yang tertahan, dan rekristalisasi struktur martensitik (Canale, 2014).

Selain itu, proses pendinginan pada saat perlakuan panas sangat menentukan transformasi fasa Baja Laterit A-588. Perbedaan media pendingin ditujukan sebagai perbedaan laju pendinginan. Pengaruh laju pendinginan terhadap struktur mikro akhir Baja Laterit A-588 ditunjukkan pada Gambar 5.



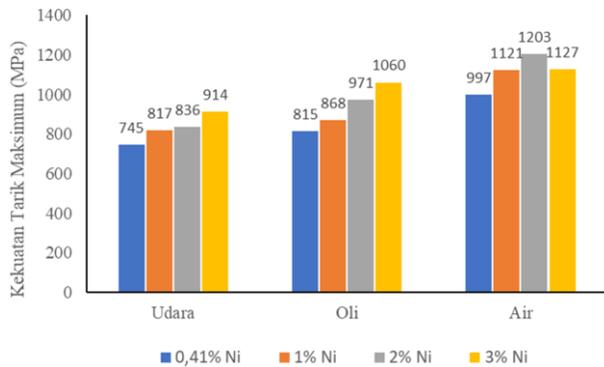
**Gambar 4.** Pengaruh kadar nikel (a) 0,41% (b) 1%, (c) 2%, dan (d) 3% pada baja laterit setelah proses termomekanikal dengan media pendinginan air diikuti proses temper 100 °C - etsa nital 2%. (C=karbida, M= martensit, B=bainit, dan F=ferrit)



**Gambar 5.** Pengaruh media pendinginan (a) udara, (b) oli, (c) air pada baja laterit A588 – etsa nital 2% (C= karbida, M=martensit, B=bainit, dan F=ferrit)

Gambar 5(a) mengindikasikan laju pendinginan udara (*normalizing*) membentuk fasa akhir ferrit, perlit, karbida. Ini adalah struktur mikro tipikal untuk baja karbon rendah saat *quenching* belum diterapkan. Seiring laju pendinginan semakin cepat, fasa bainit mulai terbentuk dengan pendinginan oli (Gambar 5b), dan martensit bilah sangat halus mulai terbentuk dengan pendinginan air (Gambar 5c). Pendinginan cepat menyebabkan transformasi austenite (FCC) menjadi ferrit (BCC) tidak cukup waktu, sehingga karbon tidak cukup berdifusi dan membentuk kristal BCT (Prasetyo, dkk., 2020). Pendinginan lebih lambat mempengaruhi waktu transformasi austenite menjadi martensit, sehingga martensit yang dihasilkan menjadi lebih besar dan cenderung membentuk blok.

Struktur mikro yang terbentuk memiliki korelasi dengan diagram CCT (Gambar 3). Struktur mikro pada Gambar 5 mengungkapkan bahwa fasa bainit dan martensit terbentuk dengan meningkatnya laju pendinginan, sebagai akibat kesulitan nukleasi difusi ferrit. Laju pendinginan media air dan oli diperkirakan menyentuh kurva transformasi bainit pada diagram CCT (Gambar 3). Namun, akibat tidak adanya proses isothermal pada saat pembentukan bainit, maka struktur mikro akhir berupa campuran antara bainit, perlit, dan ferrit.



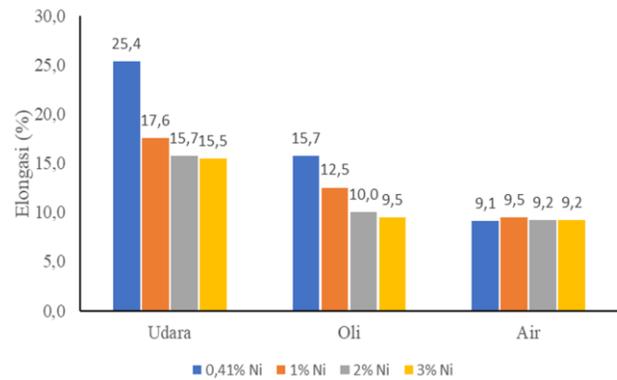
**Gambar 6.** Kekuatan tarik baja laterit A-588 setelah proses termomekanikal dan penempuran pada 150 °C

### 3.2 Sifat Mekanik

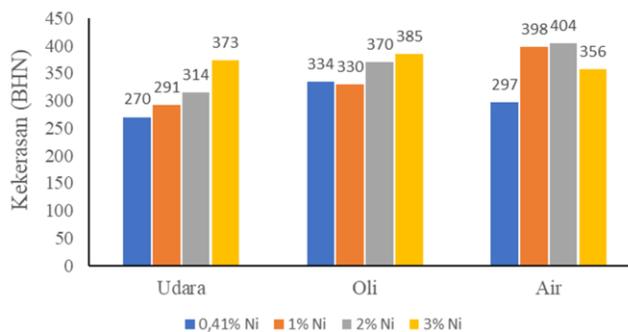
Baja laterit dapat dirujuk sebagai baja paduan rendah berkekuatan tinggi, jika kekuatan yang dihasilkan dari proses termomekanikal ini bisa mencapai standar tertentu. Temper temperatur rendah pada kisaran 150-200 °C diterapkan pada baja karbon berkekuatan tinggi karena memberikan peningkatan signifikan untuk ketangguhan impak tanpa mengurangi kekerasan dan kekuatan tarik secara drastis. Karakteristik mekanik berupa kekuatan tarik, keuletan, dan kekerasan ditunjukkan pada Gambar 6-8.

Gambar 6 menunjukkan kekuatan tarik baja laterit A-588 setelah proses termomekanikal diikuti penempuran dengan variasi kadar nikel dan media pendinginan. Secara umum, laju pendinginan udara menghasilkan kekuatan Tarik sebesar 745-914 MPa, laju pendinginan oli menghasilkan kekuatan Tarik sebesar 815-1060 MPa, dan laju pendinginan air menghasilkan kekuatan Tarik sebesar 997-1127 MPa. Urutan kekuatan Tarik sebagai berikut: laju pendinginan udara < laju pendinginan oli < laju pendinginan udara pada semua kadar nikel.

Nilai kekuatan yang dihasilkan jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan standar baja tahan cuaca komersial, yakni 485 MPa (ASTM A-588 komersil), 559



**Gambar 7.** Nilai regangan baja laterit A-588 setelah proses termomekanikal dan penempuran pada 150 °C



**Gambar 8.** Kekerasan baja laterit A-588 setelah proses termomekanikal dan penempuran pada 150 °C

MPa (JIS G3125), 830-1017 MPa (ASTM A325), dan 300-1200 MPa (ISO 898-1). Kekuatan tertinggi diperoleh setelah proses termomekanikal dengan pendinginan air pada sampel 2% Ni. Nilai ini tidak jauh berbeda dengan sampel 1% dan 3% Ni. Laju pendinginan cepat dengan media air signifikan berpengaruh pada kekuatan Tarik yakni melebihi 1000 MPa. Hal ini konsisten dengan struktur mikro pada Gambar 5, dimana pendinginan lambat menghasilkan struktur ferrit + perlit (Gambar 5a), pendinginan agak cepat menghasilkan ferrit + bainit + sedikit martensit (Gambar 5b), pendinginan cepat menghasilkan lebih banyak martensit (Gambar 5c).

Hal ini disebabkan oleh transformasi martensit yang dikaitkan dengan tekanan internal. Proses temper mengurangi tekanan internal dengan memungkinkan penataan ulang atom secara lokal. Di bawah temperatur temper 300°C, tekanan internal yang dihasilkan tidak dilepaskan sepenuhnya, sehingga kekuatan tarik tidak jauh berbeda seperti setelah di-*quench* (Jena dkk., 2014). Martensit yang di-*quench* memiliki tegangan internal yang sangat tinggi, yang kemudian diturunkan oleh temper. Nikel tidak mempengaruhi tegangan aliran secara drastis sehingga kekuatan tarik ultimat tidak harus menurun atau relatif sama (Krauss, 2014).

Selain itu, dengan proses pendinginan yang sama, penambahan nikel hingga 3% menyebabkan kenaikan pada nilai kekuatan Tarik Baja Laterit A-588, meskipun nilai kenaikannya tidak signifikan. Pada media pendinginan air, nilai kekuatan Tarik sebesar 997 MPa pada sampel 0,41 %Ni, 1121 MPa pada sampel 1 %Ni, 1203 MPa pada sampel 2 %Ni, dan 1127 MPa pada sampel 3 %Ni. Kecenderungan peningkatan nilai kekuatan disebabkan oleh beberapa faktor seperti elemen paduan dalam larutan padat dan strukturmikro (Gambar 4), yakni blok-blok fasa bainit semakin besar dan adanya fasa martensit. Ukuran butir efektif (block size) merupakan faktor penentu kekuatan dan ketangguhan martensit (Ali, dkk., 2019)

Kekuatan tertinggi diperoleh pada sampel dengan penambahan nikel 3%. Hal ini konsisten dengan kepadatan dislokasi menurun dan terbentuk karbida transisi menjadi kasar dengan adanya temper temperatur rendah (Krauss, 2014). Pola kenaikan kekuatan berbanding terbalik dengan pola keuletan, yang diwakilkan oleh pengukuran regangan, seperti pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7, total regangan dari media pendinginan udara (15,5-25,4%) lebih tinggi daripada pendinginan oli (9,5-15,7%) dan air (9,1-9,5%). Secara umum, nilai regangan yang diperoleh dengan variasi kadar nikel dan laju pendinginan cukup masuk kriteria standar, yakni 8-12% (ISO 898-1), dan minimal 18% (ASTM A588 komersil). Regangan paling tinggi, lebih

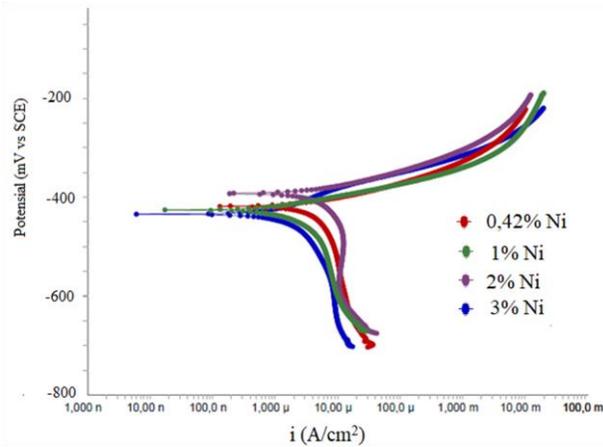
dari 15% diperoleh pada sampel dengan media pendingin udara atau dengan kata lain laju pendinginan lambat memberikan efek regangan paling besar. Sedangkan, regangan paling rendah diperoleh setelah pendinginan cepat. Hasil ini konsisten dengan strukturmikro pada Gambar 5a-c. Meningkatkan laju pendinginan menyebabkan peningkatan kekuatan, tetapi regangan ke fraktur (Elongasi) berkurang karena adanya hard martensit (Ali, dkk., 2019).

Namun, semakin tinggi kadar nikel hingga 3%, maka nilai regangan juga semakin menurun pada sampel dengan pendinginan udara dan oli. Namun, penambahan kadar nikel tidak berpengaruh ketika Baja Laterit didinginkan air. Keuletan dari baja karbon rendah mengandung bainit jauh lebih tinggi daripada martensit pada nilai kekuatan yang sama. Hal ini disebabkan adanya jarak interpartikel pada antara ferrit dan perlit dalam struktur bainit yang membentuk rongga ulet (Ali, dkk., 2019). Tingginya nilai regangan pada sampel laju pendinginan udara disebabkan oleh adanya proses penghilangan atau relaksasi tegangan internal pada saat temper 150 °C.

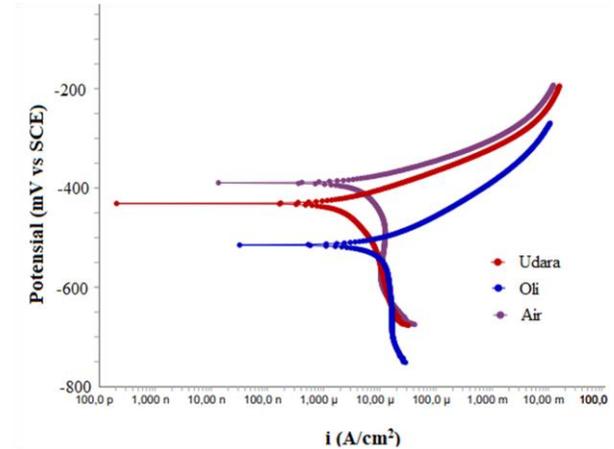
Kekerasan umumnya dianggap terkait dengan kekuatan Tarik dan strukturmikro sebagai akibat dari komposisi dan proses perlakuan panas. Nilai kekerasan Baja Laterit setelah proses termomekanikal diikuti proses temper 150 °C ditunjukkan pada Gambar 8. Secara umum, sampel yang mengalami pendinginan cepat (oli dan air) adalah paling keras karena konversi austenit menjadi struktur martensit.

Berdasarkan Gambar 8, laju pendinginan dan kadar nikel signifikan mempengaruhi kekerasan. Nilai kekerasan sebesar 270-373 BHN diperoleh setelah pendinginan udara, 330-385 BHN setelah pendinginan oli, dan 297-356 BHN setelah pendinginan air. Peningkatan kekerasan akibat kenaikan laju pendinginan disebabkan adanya fasa bainit dan martensit yang terbentuk pada saat pendinginan oli dan air (Gambar 5). Selain itu, meningkatkan kadar nikel hingga 3% juga menyebabkan peningkatan kekerasan. Hal ini konsisten dengan strukturmikro pada Gambar 4. Kecenderungan nilai kekerasan hampir sama dengan nilai kekuatan (Gambar 6). Martensit adalah larutan karbon padat jenuh dalam ferit dengan struktur tetragonal berpusat tubuh (BCT). Pendinginan cepat menyebabkan karbon terjebak dalam struktur kristal. Kekerasan tinggi sebagai akibat dari distorsi yang terjadi selama transformasi dari austenit FCC menjadi martensit BCT dan substruktur dislokasi halus yang berkembang dalam kristal martensit selama transformasi geser tanpa difusi (Canale, 2014).

Nilai kekerasan pada Baja Laterit setelah proses termomekanikal diikuti proses temper melampaui standar komersil yakni 170 HB (ASTM A588), 253-319 HB (ASTM A325), 238-414 HB (ISO 898-1).



**Gambar 8.** Pengaruh kadar nikel terhadap kurva polarisasi E versus log I pada baja laterit A-588 setelah proses termomekanikal dengan pendinginan air



**Gambar 9.** Pengaruh media pendinginan terhadap kurva polarisasi E versus log I pada baja laterit A-588 dengan 2% Nikel

### 3.3 Sifat Korosi

Pengujian korosi dilakukan untuk mengetahui pengaruh laju pendinginan dan kadar nikel terhadap nilai laju korosi dari baja laterit A-588. Nilai ini menjadi rujukan untuk pengembangan ketahanan korosi atmosferik. Kurva polarisasi menunjukkan nilai potensial korosi ( $E_{corr}$ ) dan rapat arus korosi ( $I_{corr}$ ). Setelah dilakukan *fitting* kurva Tafel pada Gambar 8 dan 9 maka didapatkan nilai laju korosi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Berdasarkan Gambar 8, penambahan kadar nikel tidak signifikan mempengaruhi perubahan kurva polarisasi anodik maupun katodik pada baja laterit setelah proses termomekanikal dengan media pendingin air. Penambahan nikel sedikit menggeser kurva ke kiri bawah yang menunjukkan bahwa  $I_{corr}$  semakin mengecil dan  $E_{corr}$  semakin negatif. Dalam media korosif NaCl 3,5%, nilai  $E_{corr}$  berada di rentang -394 mV hingga 435 mV, sedangkan nilai  $I_{corr}$  berada di rentang  $2,8 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> hingga  $6 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa laju korosi semakin mengecil. Namun, terjadi anomali saat penambahan nikel sebesar 3%, menunjukkan kurva polarisasi bergeser ke kanan atas, yang berarti laju korosi semakin besar. Hal ini konsisten dengan hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 3 dimana fasa didominasi oleh blok-blok fasa bainit dengan ukuran butir besar

**Tabel 2.** Properties korosi baja laterit A-588

Material	Potensial Korosi (mV)	Rapat Arus Korosi ( $\times 10^{-6}$ A/cm <sup>2</sup> )	Laju Korosi (mpy)
0.5% Ni (Media Air)	-418,6	6,013	2,751
1% Ni (media air)	-429,8	3,987	1,824
2% Ni media air	-394,7	2,854	1,306
3% Ni media air	-434,4	5,545	2,537
2% Ni media oli	-515,1	14,44	6,607
2% Ni media udara	-431,4	5,566	2,547

menyerupai pulau bulat. Selain itu, karbida yang menjadi kasar karena efek panas selama temper akan berkoherensi dari endapan ke matrik, dan dapat meningkatkan pembentukan korosi di sepanjang batas karbida. Penambahan unsur nikel menyebabkan penurunan reaksi anodik karena pertumbuhan film pasif serta peningkatan reaksi katodik dengan peningkatan oksigen terlarut, sehingga laju korosi menurun (Fan dkk., 2020).

Pengaruh media pendinginan pada proses termomekanikal sangat berpengaruh terhadap perilaku korosi baja laterit, seperti pada Gambar 9. Jika dibandingkan dengan pendinginan air (*quench*), kurva polarisasi pendinginan udara bergeser ke kiri bawah, dengan nilai  $E_{corr}$  semakin negatif dan  $I_{corr}$  semakin besar. Sedangkan, kurva polarisasi pendinginan oli bergeser ke kanan bawah dengan nilai  $E_{corr}$  semakin negatif dan  $I_{corr}$  semakin besar. Hal ini mengindikasikan bahwa baja dengan struktur mikro ferrit-perlit lebih terkorosi daripada baja dengan struktur mikro martensit temper, yakni laju korosi sebesar 1,306 mpy dan 2,547 mpy. Selain itu, pembentukan fasa bainit cenderung meningkatkan laju korosi, karena baja dengan multifasa cenderung membentuk korosi galvanik. Fasa ferrit yang merupakan alotrop besi dengan kekerasan lebih rendah berperan sebagai fasa anoda dan sementit ( $Fe_3C$ ) pada perlit berperan sebagai katoda secara korosif (Atapek dkk., 2013). Properties perilaku korosi dari baja laterit dirangkum pada Tabel 2.

Pada paduan logam, pelarutan anodik dimulai pada batas butir karena merupakan daerah amorf dan memiliki energi cacat yang tinggi. Dengan demikian, batas butir larut secara anodik sebagai fungsi waktu dalam media agresif ion Cl<sup>-</sup> dan korosi terjadi di sepanjang batas butir, sehingga matriks akan kehilangan berat. Setelah periode tertentu, pelarutan anodik dimulai di sepanjang lath dalam matriks martensitik (Atapek dkk., 2013).

#### 4. Kesimpulan

Pengembangan baja laterit A-588 dengan memvariasikan kadar nikel dan proses termomekanikal, berupa pengerolan panas dan perlakuan panas yang diikuti proses temper, menghasilkan baja paduan rendah-berkekuatan tinggi dengan sifat mekanik yang sebanding dengan A-588 komersil. Laju pendinginan dan kadar nikel memengaruhi pembentukan fasa dan ukuran butir sehingga berdampak pada sifat kekuatan, keuletan, kekerasan, dan ketahanan korosi. Proses temper temperatur rendah (150 °C) menyebabkan pengendapan karbida halus dan transisi fasa martensit menjadi bainit. Penambahan kadar nikel hingga 3% menyebabkan peningkatan nilai kekerasan (dari 997 MPa menjadi 1127 MPa), kekerasan (dari 297 BHN menjadi 404 BHN), namun menurunkan nilai keuletan menjadi  $\pm 9\%$  dan laju korosi (dari 2,751 mpy menjadi 1,306 mpy). Nikel mempengaruhi ukuran butir dan pembentukan pulau bainit. Laju pendinginan memiliki pola pengaruh yang sama dengan penambahan nikel. Semakin cepat laju pendinginan, kekuatan dan kekerasan cenderung meningkat (745 MPa menjadi 997 MPa kekuatan dan 270 BHN menjadi 297 BHN), serta keuletan menurun (25,4% menjadi 9,1%). Namun, laju korosi tertinggi 6,607 mpy diperoleh ketika pendinginan media oli. Penambahan kadar nikel hingga 3% pada media pendinginan air akan meningkatkan pembentukan fasa lath martensit temper dan bainit, sehingga kekuatan dan kekerasan cenderung meningkat serta regangan semakin menurun. Namun, laju korosi meningkat sebesar 2,537 mpy karena terjadi korosi galvanik antara bainit dengan lath martensit temper.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh anggota tim Baja Laterit 2019 atas bantuan teknis selama proses pengumpulan data. Penelitian ini didanai Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI.

#### Daftar Pustaka

- Ali, M., Porter, D., Komi, J., Eissa, M., Faramawy, H., & Mattar, T. (2019). Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels. *Journal of Iron and Steel Research International*, 1350-1365.
- An, F., Zhao, S., Xue, X., Wang, J., Yuan, G., & Liu, C. (2020). Incompleteness of bainite transformation in quenched and tempered steel under continuous cooling conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 8985-8996.
- Atapek, S., Polat, S., & Zor, S. (2013). Effect of Tempering Temperature and Microstructure on the Corrosion Behavior of a Tempered Steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 240–246.
- Caballero, F. G.-M. (2012). Phase transformations in advanced bainitic steels. In E. P. Edmonds, *Phase Transformations in Steels* (pp. 271–294). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Canale, L. C. (2014). Introduction to Steel Heat Treatment. *Comprehensive Materials Processing*, 3–37.
- 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*, 69(1), 8-19.
- Chen, A.-h., Xu, J.-q., Li, R., & Li, H.-l. (2012). Corrosion Resistance of High Performance Weathering Steel for Bridge Building Applications. *Journal of Iron and Steel Research International*, 19, 59-63.
- Citrawati, F., Dwiwandono, R., & Firmansyah, L. (2020). The Effect of Ni on the Formation of Bainite in Fe-Ni Lateritic Steels through Semi-continuous Cooling Method. *International Journal of Technology*, 60-70.
- Díaz, I. C. (2018). Five-year atmospheric corrosion of Cu, Cr and Ni weathering steels in a wide range of environments. *Corrosion Science*, 141, 146–157.
- Fan, Y., Liu, W., Sun, Z., Chowwanonthapunya, T., Zao, Y., Dong, B., . . . Li, X. (2020). Corrosion Behaviors of Carbon Steel and Ni-Advanced Weathering Steel Exposed to Tropical Marine Atmosphere. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29, 6417-6426.
- Haiko, O., Kaijalainen, A., Pallaspuuro, S., Hannula, J., Porter, D., Liimatainen, T., & Komi, J. (2019). The Effect of Tempering on the Microstructure and Mechanical Properties of a Novel 0.4C Press-Hardening Steel. *Applied sciences*, 4231.
- International, A. (2004). *Standard Specification for High-strength Low-alloy Structural Steel up to 50 ksi (345 MPa) Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance*. West Conshohocken: ASTM International.
- Jena, P. K., Kumar, K., & Singh, A. (2014). Effect of Tempering Temperature on Microstructure, Texture and Mechanical Properties of a High Strength Steel. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 33-49.
- Jia, J. W. (2020). Ni-advanced weathering steels in Maldives for two years: Corrosion results of

- tropical marine field test. *Construction and Building Materials*, 245, 118463.
- Krauss, G. (2014). Quench and Tempered Martensitic Steels. *Comprehensive Materials Processing*, 363–378.
- Mandal, G., Ghosh, S., & Mukherjee, S. (2016). Phase transformation and mechanical behaviour of thermo-mechanically controlled processed high strength multiphase steel. *Journal of Materials Science*, 6569-6582.
- Martin, H., Yirenyi, P., Pohjonen, A., Frempong, N., Komi, J., & Mahesh, S. (2021). Statistical Modeling for Prediction of CCT Diagrams of Steels Involving Interaction of Alloying Elements. *Metallurgical and Materials Transaction B*, 223-235.
- Morcillo, M. D. (2019). Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. *Construction and Building Materials*, 213, 723–737.
- Prasetyo, M. A., Anwar, M. S., Maburi, E., Agustiningtyas, D. T., Noviana, R. C., & Laksono, A. D. (2020). Pengaruh Perlakuan Panas Baja Tahan Karat Martensitik AISI 410 terhadap Struktur Mikro dan Ketahanan Korosi di Lingkungan Geothermal dan Larutan Artificial Brine. *Teknik*, 179-185.
- Singh, S. B. (2012). Mechanisms of bainite transformation in steels. In E. P. Edmonds, *Phase Transformations in Steels* (pp. 385–416.). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Yue, W., Zili, L., Xiqin, L., Shoudong, Z., & Qingchao, T. (2015). Corrosion performance of high strength weathering steels under different heat treatment states. *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015*. Hangzhou.