Baja Tahan Karat Entropi Tinggi: Inovasi Logam Alternatif untuk Era Baru Pabrik Kelapa Sawit

Fadlin Qisthi Nasution[1]
Pusat Penelitian Kelapa Sawit[1]

e-mail: fadlin.qisthi@gmail.com

ABSTRACT

Ferritic stainless steel can replace mild steel in palm oil mills. However, the high chromium content can trigger the formation of a brittle sigma phase, reducing mechanical properties. A stable high entropy alloy with a single-phase bcc structure, free from the sigma phase, has been discovered in the Fe-Cr-X-Y alloy system. This study aims to investigate the mechanical properties of this alloy system further. This study is designed to investigate the influence of X-Y elements in the Fe-Cr-X-Y alloy system. Mechanical strength analysis has been conducted on three alloy types, namely alloy 1, 2, and 3, with compositions in atomic percentage units as follows: $(Fe_{65}Cr_{25}X_5Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$; $(Fe_{65}Cr_{20}X_{10}Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$; dan $(Fe_{65}Cr_{15}X_{15}Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$, respectively. The results indicate Alloy 3 excels in tensile strength, hardness, and elongation percentage, followed by Alloy 2 in the second position and Alloy 1 in the third. Based on the data, it can be observed that the concentration of element X is directly proportional to the mechanical properties of the alloy. Compared to the mechanical properties of ASTM A36 (mild steel), all alloys produced in this study show promising results as their mechanical properties are similar to those of ASTM A36 steel. Overall, the development of ferritic stainless steel in this study indicates the potential for replacing mild steel in the palm oil mill industry. Nevertheless, further studies are necessary concerning these alloys' corrosion and wear resistance to deepen the understanding of the newly developed material characteristics.

Keywords: *High Entropy Alloy, Palm Oil Mill, Stainless Steel*

ABSTRAK

Baja tahan karat ferritik berpotensi menggantikan penggunaan mild steel di pabrik kelapa sawit. Namun, kandungan kromium yang tinggi dapat memicu pembentukan fasa sigma yang bersifat getas, yang dapat menurunkan sifat mekanik. Telah ditemukan *high entropy alloy* yang stabil dengan struktur tunggal *body-centered cubic* dalam sistem paduan Fe-Cr-X-Y yang bebas dari fasa sigma. Studi ini bertujuan untuk menelaah lebih lanjut sifat mekanik dari sistem paduan tesebut. Penelitian ini dirancang dengan tujuan untuk menyelidiki dampak unsur X-Y dalam sistem paduan Fe-Cr-X-Y. Analisis kekuatan mekanik dilakukan pada tiga jenis paduan, yaitu paduan 1, 2, dan 3, yang memiliki komposisi dalam satuan *atomic percentage* dengan komposisi sebagai berikut: $(Fe_{65}Cr_{25}X_5Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$; $(Fe_{65}Cr_{20}X_{10}Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$; dan $(Fe_{65}Cr_{15}X_{15}Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$ secara berurutan. Hasil studi menujukkan bahwa Paduan 3 mengungguli dalam hal kekuatan tarik, kekerasan, dan persen elongasi, diikuti oleh Paduan 2 pada peringkat kedua, dan Paduan 1 pada peringkat ketiga. Berdasarkan data, dapat dlihat bahwa kadar unsur X berbanding lurus dengan sifat mekanik pada paduan. Dibandingkan dengan sifat mekanik ASTM A36 (*mild steel*), semua paduan yang dihasilkan dari penelitian ini menunjukkan hasil yang menjanjikan karena sifat mekaniknya mirip dengan baja ASTM A36. Secara keseluruhan, pengembangan baja tahan karat ferritik dalam kajian ini mengindikasikan potensi penggantian *mild steel* dalam konteks industri pabrik kelapa sawit. Meski demikian, perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait ketahanan terhadap korosi dan aus pada paduan tersebut guna memperdalam pemahaman terhadap karakteristik material yang baru dikembangkan.

Kata kunci: Baja Tahan Karat, Pabrik Kelapa Sawit, Paduan Entropi Tinggi

PENDAHULUAN

Umum diketahui bahwa korosi dapat memberikan dampak serius pada logam, menyebabkan kerusakan yang tidak diinginkan [1]. Mengingat harganya yang tinggi, pabrik kelapa sawit seringkali memilih untuk tidak menggunakan baja tahan karat, melainkan beralih ke ASTM A36, yang dikenal sebagai *mild steel*, pada berbagai tahap pengolahan minyak kelapa sawit. Namun, baja jenis ini memiliki ketahanan korosi yang kurang baik dibandingkan dengan baja tahan karat austenit yang umum digunakan, yang dapat menyebabkan kerusakan dan secara tak langsung menghambat produksi di pabrik kelapa sawit [2].

Baja tahan karat ferritik, dibandingkan dengan baja tahan karat austenitik, memiliki kandungan kromium yang tinggi, berkisar antara 11% berat hingga 30%*wt* (*weight percentage*), dengan sedikit atau tanpa nikel dalam paduannya [3], [4]. Ketidakhadiran nikel dalam baja tahan karat ferritik dapat mengurangi biaya produksi, menjadikannya pilihan yang lebih terjangkau dibandingkan dengan yang austenitik [5].

Namun, kandungan kromium yang tinggi dapat memicu pembentukan fasa sigma dalam paduan [6]. Fasa sigma bersifat getas, yang dapat menurunkan kekuatan tarik (*ultimate tensile strength)* dan ketangguhan (*toughness*) baja tahan karat ferritik [7]. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan berbagai baja tahan karat ferritik yang tidak mengandung fasa sigma dalam struktur kristalnya.

Belakangan ini, ditemukan *high entropy alloy* yang stabil dengan struktur tunggal bcc dalam sistem paduan Fe-Cr-X-Y [8]. Paduan ini tidak menunjukkan adanya fasa sigma yang merugikan, bahkan pada konsentrasi kromium yang tinggi. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan penemuan ini dengan menghasilkan rangkaian paduan baja tahan karat ferritik kromium tinggi yang ringan dan tahan korosi, namun tetap mudah diolah seperti *mild steel*, serta tetap bersaing secara biaya dengan baja tahan karat komersil. Studi ini bertujuan untuk menciptakan paduan yang tidak hanya tahan terhadap korosi, tetapi juga memiliki sifat mekanik, seperti kekuatan tarik, elastisitas, dan kekerasan yang setara dengan *mild steel*—menciptakan alternatif yang ekonomis dan unggul untuk digunakan di pabrik kelapa sawit.

TINJAUAN PUSTAKA

High Entropy Steels

Secara tradisional, Paduan Entropi Tinggi (*High Entropy Alloy - HEA*) didefinisikan sebagai kelas paduan yang menampilkan lima atau lebih unsur paduan dalam komposisi *equiatomic* atau mendekati *equiatomic*, dengan konsentrasi antara 5 hingga 35 *at*% (*atomic percentage*) untuk masing-masing unsur paduan [9], [10]. Sejak ditemukannya *HEA*, beberapa komposisi telah diteliti, terutama dari sistem kuarteneri Co-Cr-Fe-Ni dengan tambahan unsur seperti Al, Cu, Mn, Ti, dan/atau V.

Secara historis, penelitian awal untuk *HEA* awalnya ditujukan pada *metallic glasses*. Namun, penelitian saat ini dalam bidang ini bertujuan untuk merancang solusi padat Fe berbasis entropi tinggi dengan komposisi *equiatomic* [11]. *HEA* berbasis Fe sedang diteliti karena kemungkinan mengurangi kandungan Ni dalam sistem paduan sambil tetap mempertahankan kekuatan dan ketahanan terhadap korosi; dengan demikian mengurangi biaya produksi. Dibandingkan dengan paduan konvensional, *HEA* berbasis Fe memiliki kandungan unsur paduan yang jauh lebih tinggi dengan densitas rendah, yang juga akan mengakibatkan penurunan densitas paduan secara keseluruhan.

Namun, ditemukan bahwa menggunakan pendekatan *equiatomic* dalam merancang *HEA* berbasis Fe dapat menghasilkan struktur kristal *multiphase* dengan beberapa fasa intermetalik hadir dalam paduan, seperti yang terlihat dalam karya Tasan dkk [12]. Keberadaan fasa intermetalik dalam paduan multikomponen akan menurunkan kekuatan dan mengurangi kelenturan paduan, yang tidak diinginkan. Ini menjadi tantangan yang kompleks dalam perjalanan merancang *HEA* berbasis Fe ini.

Design Paduan

Eksperimen ini dirancang untuk mempelajari pengaruh X-Y dan dalam sistem paduan Fe-Cr-X-Y. Berdasarkan dari penelitian sebelumnya di bidang baja tahan karat entropi tinggi, Fe-Cr-X-Y akan dirancang dengan komposisi *non-equiatomic* namun masih mengikuti parameter yang diatur seperti yang terlihat dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Desain Paduan [13]–[15]

Uraian	**Nilai**
Atomic size difference (δ)	$1 \leq \delta \leq 6$
Mixing enthalpy (ΔH_{mix})	$-15\ \text{kJ} \leq \Delta H_{mix} \leq 5\ \text{kJ}$
Valence Electron Concentration (*VEC*)	$VEC < 6.87$

ISSN 2775-5630

Telah dikaji bahwa perbedaan ukuran atom dan entalpi pencampuran (ΔH_{mix}) bertanggung jawab untuk memastikan pembentukan solusi padat fasa tunggal dari paduan multikomponen ini. Sementara itu, *Valence Electron Concentration* (*VEC*) bertanggung jawab untuk menentukan stabilitas fasa dari paduan tersebut. *VEC* dengan nilai <6.87 akan membentuk paduan yang memiliki struktur mikro ferritik [13]–[15]. δ, ΔH_{mix}, dan *VEC* didefinisikan pada Persamaan (1) – (5).

$$\delta = 100\sqrt{\sum_{i=1,i\neq j}^{n} c_i(1-r_i/\bar{r})^2} \quad \text{.....(1)}$$

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^{n} r_i c_i \quad \text{.....(2)}$$

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i=1,i\neq j}^{n} \Omega_{ij} c_i c_j \quad \text{.....(3)}$$

$$\Omega_{ij} = 4\Delta H_{AB}^{mix} \quad \text{.....(4)}$$

$$VEC = \sum_{i=1}^{n} (\text{VEC})_i c_i \quad \text{.....(5)}$$

c_i dan c_j adalah persentase atomik dari komponen ke-i dan ke-j. r_i adalah persentase atomik dan radius dari elemen ke-i, dan $\bar{\boldsymbol{r}}$ adalah jari-jari atomik rerata. $\boldsymbol{\Delta H_{mix}}$ adalah entalpi pencampuran antara dua unsur biner. $(VEC)_i$ adalah persentase atomik dan konsentrasi elektron valensi dari unsur ke-i.

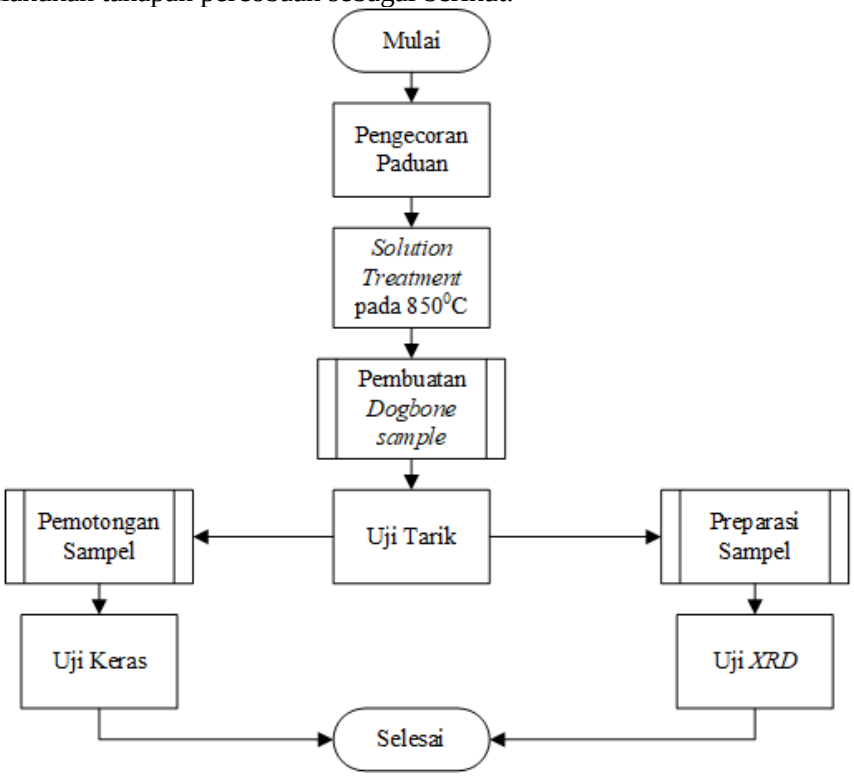
Berdasarkan pertimbangan-pertimbangan tersebut, maka pada studi ini, komposisi paduan yang diinvestigasi sifat mekaniknya terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Paduan

Paduan	**Komposisi (%*at.*)**
1	$(Fe_{65}Cr_{25}X_5Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$
2	$(Fe_{65}Cr_{20}X_{10}Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$
3	$(Fe_{65}Cr_{15}X_{15}Y_5)_{90}Ti_5Nb_5$

METODE

Pada studi ini, dilakukan tahapan percobaan sebagai berikut:



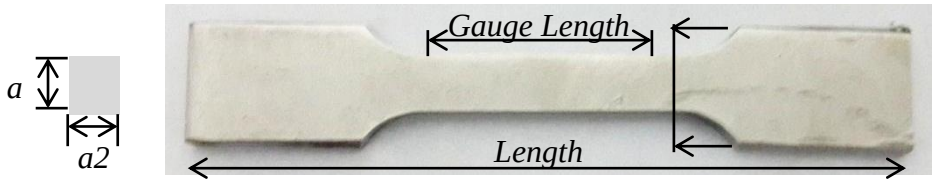
Gambar 1. Diagram Alir Percobaan

ISSN 2775-5630

Pengecoran paduan dilaksanakan dalam lingkungan *inert* (gas argon). Masing-masing sampel kemudian dibersihkan secara mekanis dengan metode abrasi dan melalui proses pembersihan ultrasonik dalam etanol. Selanjutnya, sampel dienkapsulasi menggunakan tabung borosilikat, yang kemudian diberi perlakuan *solution treatment* pada suhu 850°C selama 6 jam, diikuti dengan pendinginan di udara untuk mencapai homogenitas yang diinginkan pada paduan tersebut. Pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan spesifikasi ukuran sampel yang terdokumentasi pada Tabel 3. Representasi visual dari sampel uji tarik dapat ditemukan pada Gambar 2.

Tabel 3. Ukuran Spesimen Uji Tarik

Paduan	***Length***	***Gauge Length***	**a1**	**a2**
1	147 mm	50 mm	12.5 mm	6.63 mm
2	154.5 mm	50 mm	12.35 mm	6.65 mm
3	149 mm	50 mm	12. 43 mm	6.67 mm



Gambar 2. Spesimen Uji Tarik

Selanjutnya, Sampel dipotong menjadi beberapa bagian. Proses *mounting* untuk keperluan uji keras dilaksanakan dengan menggunakan *Struers CitoPress-20*. Uji kekerasan mikro dilakukan menggunakan *Struers DuraScan* dengan beban 1 N selama 10 detik.

Karakterisasi *XRD* (*X-Ray Diffractometry*) dilakukan pada sampel dengan Philips/PANalytical X'Pert ProMPD *Powder Diffractometer*, dengan konfigurasi perangkat keras yang mencakup penggunaan *fixed mask* berukuran 10 mm, celah divergen ½°, dan *soller slit* 0,04 rad pada pemegang sampel yang berputar dengan kecepatan 4 putaran/menit. Pemindaian dimulai dari sudut 20^0 hingga 120^0 dengan waktu pemindaian 30 menit untuk setiap sampel. Analisis hasil *XRD* dijalankan menggunakan program HighScore Plus versi 4.8.

HASIL DAN PEMBAHASAN

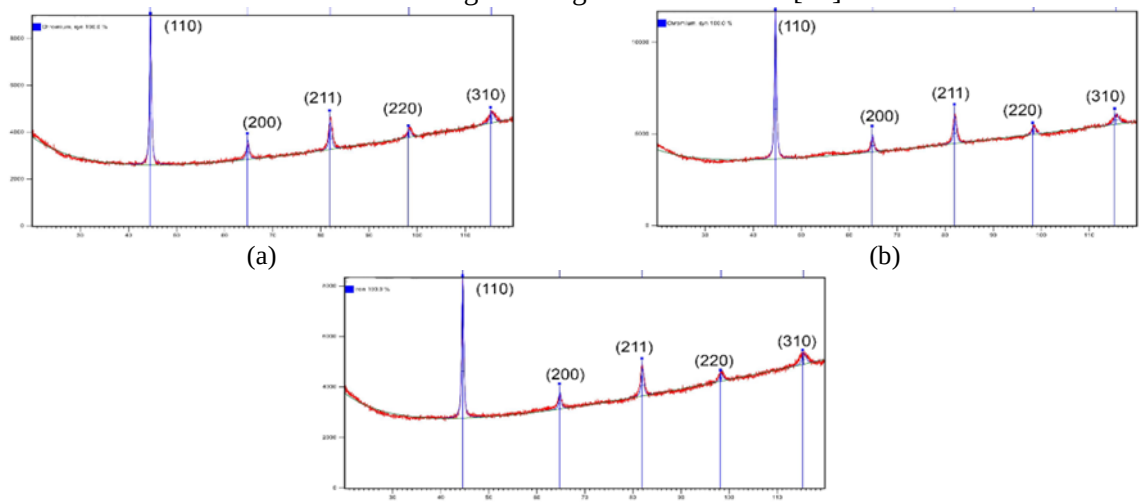
Gambar 3 mengindikasikan bahwa bidang-bidang (*plane*) yang teridentifikasi oleh peralatan *XRD* pada Paduan 1, Paduan 2, dan Paduan 3 menunjukkan bahwa paduan yang dihasilkan dalam kerangka eksperimen ini memperlihatkan tidak ditemukannya fasa sigma di dalam paduan. Sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya, penentuan komposisi yang akurat dan sesuai dengan parameter yang mengatur *HEA* yang diaplikasikan dalam kajian ini berhasil menghasilkan paduan baja tahan karat entropi tinggi dengan struktur kristal tunggal *BCC*.

Gambar 4 memperlihatkan bahwa Paduan 3 mengungguli dalam hal kekuatan tarik, diikuti oleh Paduan 2 pada peringkat kedua, dan Paduan 1 pada peringkat ketiga. Pola yang serupa terlihat pada tingkat kekerasan (Gambar 5) dan persen elongasi (Gambar 6), dengan Paduan 3 menduduki peringkat teratas, diikuti oleh Paduan 2 dan Paduan 1 secara berturut-turut.

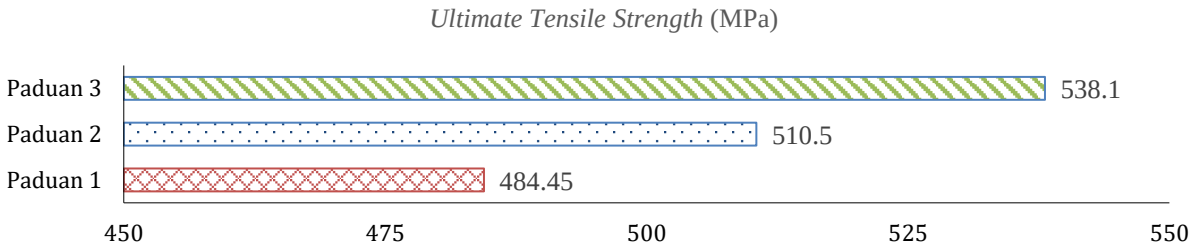
Berdasarkan data, dapat dlihat bahwa peningkatan kadar unsur X% dalam paduan berpengaruh positif terhadap sifat mekanik pada paduan. Semakin tinggi unsur X, maka semakin tinggi nilai kekuatan, kekerasan, dan kelenturan dari paduan dalam sistem Fe-Cr-X-Y. Peningkatan dalam sifat mekanis diperkirakan berasal dari ketidaksesuaian kisi kristal (*lattice misfit*) dalam sistem paduan yang lebih tinggi seiring dengan peningkatan kadar unsur X [16].

ISSN 2775-5630

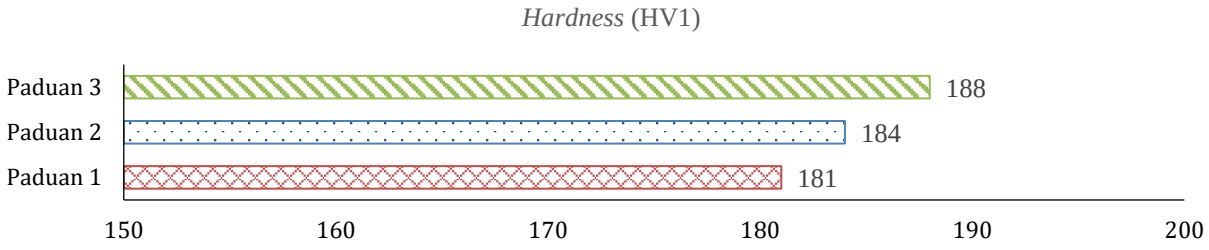
Dibandingkan dengan sifat mekanik ASTM A36 (*mild steel*), semua paduan yang dihasilkan dari penelitian ini menunjukkan hasil yang menjanjikan karena sifat mekaniknya mirip dengan baja ASTM A36, dengan kekuatan tarik sekitar 400–500 MPa dan tingkat elongasi minimal 23% [17].



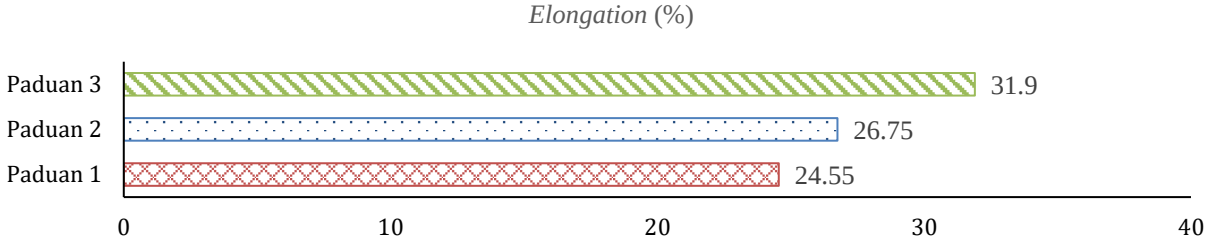
Gambar 3. Hasil XRD dari (a) Paduan 1, (b) Paduan 2 dan (c) Paduan 3



Gambar 4. Kekuatan Tarik Paduan



Gambar 5. Kekerasan Paduan



Gambar 6. Persentase Elongasi Paduan

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, pengembangan baja tahan karat ferritik dalam kajian ini mengindikasikan potensi penggantian *mild steel* dalam konteks industri pabrik kelapa sawit. Meski demikian, perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait ketahanan terhadap korosi dan aus pada paduan tersebut guna memperdalam pemahaman terhadap karakteristik material yang baru dikembangkan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] O. S. I. Fayomi and A. P. I. Popoola, "Corrosion propagation challenges of mild steel in industrial operations and response to problem definition," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1378, no. 2, p. 22006.

[2] O. S. I. Fayomi, I. G. Akande, and S. Odigie, "Economic impact of corrosion in oil sectors and prevention: An overview," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1378, no. 2, p. 22037.

[3] A. Outokumpu Stainless, "Handbook of stainless steel," *Avesta Resarch Centre, Avesta, Sweden*, 2013.

[4] M. Cortie and M. du Toit, "Stainless Steels, Ferritic," *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, no. June 2015, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.02501-7.

[5] International Stainless Steel Forum, "The Ferritic Solution," p. 67, 2007, [Online]. Available: http://www.worldstainless.org/publications/brochures_and_posters.

[6] J. Ki, L. Lai, K. H. Lo, and C. H. Shek, "Ferritic Stainless Steels," in *Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*, 2012, pp. 8–22.

[7] M. L. Martin, M. J. Connolly, F. W. DelRio, and A. J. Slifka, "Hydrogen embrittlement in ferritic steels," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 7, no. 4, 2020.

[8] F. Q. Nasution, "ANALISIS MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK DARI BAJA TAHAN KARAT BEBAS NIKEL," *J. Teknol. Bahan dan Barang Tek.*, vol. 12, no. 1, pp. 15–20, 2023.

[9] O. N. Senkov, J. M. Scott, S. V Senkova, D. B. Miracle, and C. F. Woodward, "Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy," *J. Alloys Compd.*, vol. 509, no. 20, pp. 6043–6048, 2011.

[10] X. Yang and Y. Zhang, "Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 132, no. 2–3, pp. 233–238, 2012.

[11] D. Raabe, C. C. Tasan, H. Springer, and M. Bausch, "From high-entropy alloys to high-entropy steels," *steel Res. Int.*, vol. 86, no. 10, pp. 1127–1138, 2015.

[12] C. C. Tasan, Y. Deng, K. G. Pradeep, M. J. Yao, H. Springer, and D. Raabe, "Composition dependence of phase stability, deformation mechanisms, and mechanical properties of the CoCrFeMnNi high-entropy alloy system," *Jom*, vol. 66, no. 10, pp. 1993–2001, 2014.

[13] A. Takeuchi and A. Inoue, "Calculations of mixing enthalpy and mismatch entropy for ternary amorphous alloys," *Mater. Trans. JIM*, vol. 41, no. 11, pp. 1372–1378, 2000.

[14] Y. Zhang, Y. J. Zhou, J. P. Lin, G. L. Chen, and P. K. Liaw, "Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 10, no. 6, pp. 534–538, 2008.

[15] G. U. O. Sheng and C. T. Liu, "Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase," *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 21, no. 6, pp. 433–446, 2011.

[16] E. P. George, D. Raabe, and R. O. Ritchie, "High-entropy alloys," *Nat. Rev. Mater.*, vol. 4, no. 8, pp. 515–534, 2019.

[17] ASTM Standard A36/A36M, "Standard Specification for Carbon Structural Steel." ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, doi: DOI:10.1520/A0036_A0036M-19.