

ANALISIS MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK DARI BAJA TAHAN KARAT BEBAS NIKEL

ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NICKEL-FREE STAINLESS STEELS

Fadlin Qisthi Nasution

Kelompok Peneliti Rekayasa Teknologi dan Pengelolaan Lingkungan,
Pusat Penelitian Kelapa Sawit, Indonesia

Diterima: 11 April 2022

Direvisi: 13 Mei 2022

Disetujui: 10 Juni 2022

ABSTRAK

Baja tahan karat austenitik adalah jenis baja tahan karat yang paling banyak diproduksi di dunia. Akhir-akhir ini terjadi fluktuasi harga nikel mentah yang berdampak negatif pada produksi baja tahan karat austenitik. Dari penelitian awal, ditemukan paduan multikomponen BCC fase tunggal dalam sistem paduan Fe-Cr-X-Y yang berpotensi menggantikan baja tahan karat austenitik. Penelitian ini difokuskan untuk mempelajari lebih lanjut struktur mikro dan perubahan sifat mekanik pada sistem paduan Fe-Cr-X-Y. Ternyata bahwa peningkatan kandungan kromium meningkatkan kekerasan dan mengurangi keuletan paduan. Penambahan 5% elemen X dan Y masing-masing dalam sistem paduan telah dapat menghasilkan berbagai paduan yang tidak mengandung fase sigma, yang merusak sifat mekanik baja tahan karat feritik, bahkan setelah perlakuan panas yang lama pada 300-500 °C. Namun, masih ada peningkatan kekerasan ketika paduan diberi perlakuan panas pada suhu tersebut. Ini menandakan pemisahan fase α dan α' karena *immiscibility* dalam larutan padat. Studi lebih lanjut diperlukan untuk memecahkan masalah pemisahan fase ini.

Kata kunci: baja tahan karat, baja tahan karat feritik, alloys multikomponen, fase sigma, fase α' .

ABSTRACT

Austenitic stainless steels are the most produced type of stainless steels in the world. Recently, there has been fluctuation in the price of raw Nickel which has negative impact in production of austenitic stainless steels. It is recently discovered a BCC single-phase Multi Component Alloys within the Fe-Cr-X-Y alloy system which can potentially replace austenitic stainless steels. This study was focused to further the study of microstructure and mechanical properties changes in the Fe-Cr-X-Y alloy system. It is found that an increase in the chromium content increases the hardness and reduces the ductility of the alloys. The addition of 5% of X and Y elements respectively in the alloy system had successfully produced a range of alloys which contained no sigma phase, which was detrimental to the mechanical properties of ferritic stainless steels, even after prolonged heat treatment at 300-500 °C. However, there was still an increase in hardness when the alloys were heat treated at such temperature. This signified the separation of α and α' phase due to the immiscibility in the solid solution. Further study is required to solve this phase separation problem.

Keywords: *stainless steels, ferritic stainless steels, multicomponent alloys, sigma phase, α' phase.*

PENDAHULUAN

Baja tahan karat (*stainless steel*) banyak digunakan karena sifatnya yang luar biasa, seperti sifat mekanik yang baik dan ketahanan korosi yang baik. Baja tahan karat austenitik Cr-Ni adalah jenis baja tahan karat yang paling banyak diproduksi di dunia [1-3]. Akhir-akhir ini terjadi fluktuasi harga nikel mentah. Gejolak harga

tersebut berdampak negatif pada produksi baja tahan karat, khususnya baja Cr-Ni. Baja Cr-Ni menggunakan cukup banyak nikel dalam paduannya; sehingga fluktuasi harga ini sangat mempengaruhi biaya produksi. Oleh karena itu, banyak pabrikan dan pabrikan baja yang mencoba substitusi baja Cr-Ni dengan baja jenis lain [3-5].

*Corresponding author :

Email: fadlin.qisthi@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.37209/jtbt.v12i1.235>

Jenis baja tahan karat austenitik lainnya, baja tahan karat seri 200, baja tahan karat feritik (seri 400) telah dicoba untuk menggantikan baja Cr-Ni. Baja tahan karat seri 200 dan seri 400 mengandung lebih sedikit nikel, sehingga menurunkan biaya produksi. Namun, seri 200 memiliki ketahanan korosi yang lebih buruk daripada baja tahan karat seri 300. Sementara itu, baja tahan karat seri 400 tidak dapat digunakan untuk menggantikan baja tahan karat seri 300 pada aplikasi suhu tinggi karena adanya 475 °C *embrittlement* [6-11]. 475 °C *embrittlement* terjadi karena keberadaan kandungan kromium yang tinggi mendorong pembentukan fasa sigma dalam paduan. Fasa sigma bersifat getas, sehingga dapat menurunkan *ultimate tensile strength* dan ketangguhan baja tahan karat feritik [12-14].

Penelitian di bidang paduan pada entropi tinggi dengan logam berbasis Fe sebagai sarana untuk menggantikan baja tahan karat seri 300 telah dilakukan. Akan tetapi, telah ditemukan bahwa penggunaan komposisi ekuimolar konvensional menghasilkan struktur multifasa dengan senyawa intermetalik yang terdapat dalam paduan multikomponen [15-20]. Dari penelitian awal, telah ditemukan paduan BCC fasa tunggal yang stabil dalam sistem paduan Fe-Cr-X-Y. Baja tahan karat entropi tinggi ini memiliki karakteristik yang baik bila dibandingkan dengan baja tahan karat feritik konvensional yang mungkin dapat menggantikan baja tahan karat seri 300. Paduan ini tidak menunjukkan adanya fasa sigma bahkan pada konsentrasi Cr yang tinggi. Penelitian ini ditujukan untuk mengembangkan penemuan baru ini dengan mengembangkan rangkaian paduan Fe-Cr-X-Y yang memiliki kemampuan kerja yang tetap kompetitif dari segi biaya bila dibandingkan dengan baja tahan karat kelas komersial dan bahkan baja galvanik yang dapat digunakan dalam industri konstruksi, otomotif, dirgantara, kelautan serta makanan dan minuman.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Paduan diproduksi dari logam dengan kemurnian tinggi (Fe 99,95%, Cr 99,9%, X 99,95%, Y 99,95%).

Metode

Sampel paduan multikomponen dengan volume 1 cm³ sesuai dibuat dengan proses *arc-melting* menggunakan *Edmund Bühler Compact Arc MAM-1* dalam lingkungan *inert* (gas argon) untuk menghasilkan sampel berbentuk kancing (*button*). Berikut ini (Tabel 1) adalah komposisi dari sampel yang digunakan pada studi ini.

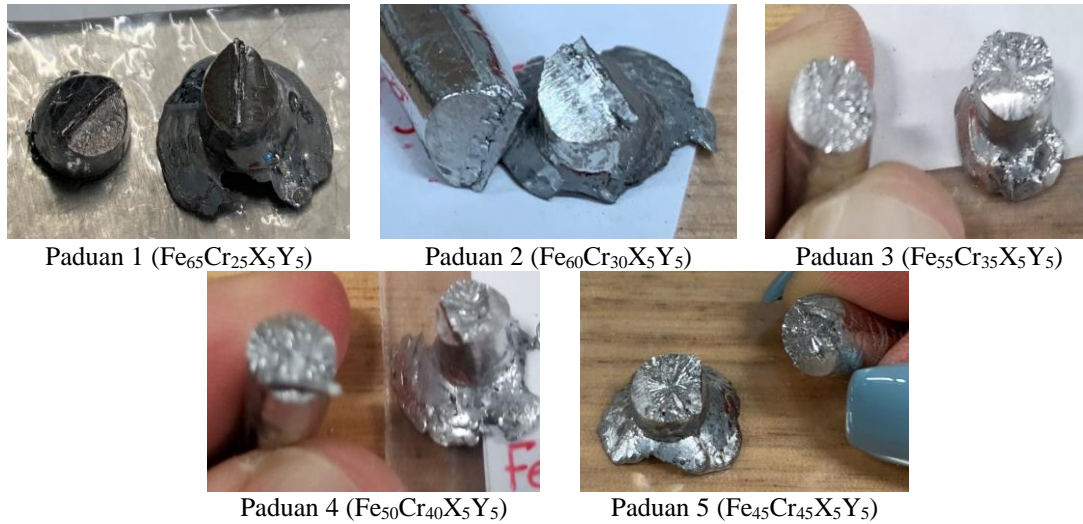
Tabel 1. Komposisi Paduan Multi Komponen

Sampel	Komposisi (%)
1	Fe ₆₅ Cr ₂₅ X ₅ Y ₅
2	Fe ₆₀ Cr ₃₀ X ₅ Y ₅
3	Fe ₅₅ Cr ₃₅ X ₅ Y ₅
4	Fe ₄₅ Cr ₄₀ X ₅ Y ₅
5	Fe ₄₀ Cr ₄₅ X ₅ Y ₅

Sampel kemudian dibersihkan permukaannya secara abrasi mekanis menggunakan *Struers Labopol-5* dan pembersihan ultrasonik dalam etanol menggunakan *Branson® Ultrasonic Cleaner*. Sampel kemudian dicetak dalam keadaan *vacuum* menggunakan *Edmund Bühler Compact Arc MAM-1*. Pengujian kualitatif dari keuletan material dilakukan dengan proses *shearing* menggunakan *bolt cutter*.

Sampel kemudian dipotong menjadi beberapa bagian menggunakan *IsoMet™ Low Speed Precision Cutter*. Selanjutnya, sampel dienkapsulasi menggunakan tabung silika dan kemudian diberi perlakuan *solution treatment* pada temperatur 850 °C selama 6 jam yang diikuti dengan pendinginan di udara. Sampel kemudian diberi perlakuan panas lanjutan dengan memanaskannya pada temperatur 400 °C dan 500 °C selama 7 hari. Perlakuan panas dilakukan pada sampel menggunakan *Nabertherm Muffle Furnace L 9/11/SKM*.

Proses *mounting* untuk keperluan uji keras dan metalografi dilakukan menggunakan *Struers CitoPress-20*. Uji kekerasan mikro dilakukan menggunakan *Struers DuraScan* dengan beban 1 N selama 10 detik. Pengujian kekerasan dilakukan pada kondisi *as-cast*, *solution treated*, dan setelah perlakuan panas pada temperatur 350 °C, 400 °C, 450 °C dan 500 °C selama 7 hari. Karakterisasi XRD dilakukan pada sampel 1 dan 5 menggunakan *Philips/PANalytical X'Pert Pro-MPD Powder Diffractometer* dengan pengaturan perangkat keras yang digunakan untuk pemindaian adalah 10 mm *fixed mask*, celah



Gambar 1. Penampang Permukaan Patahan

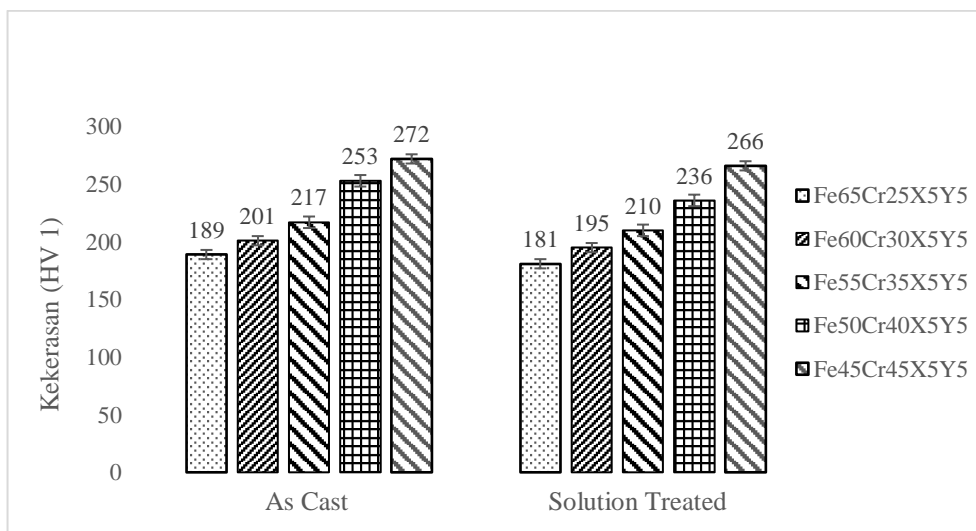
divergen $\frac{1}{2}^\circ$ dan $0,04$ rad *soller slit* pada pemegang sampel dengan 4 putaran/menit. *Scanning degree* mulai dari 20° hingga 120° dan waktu pemindaian 30 menit untuk setiap sampel. Analisis hasil XRD dilakukan menggunakan program *HighScore Plus* versi 4.8.

HASIL DAN PEMBAHASAN

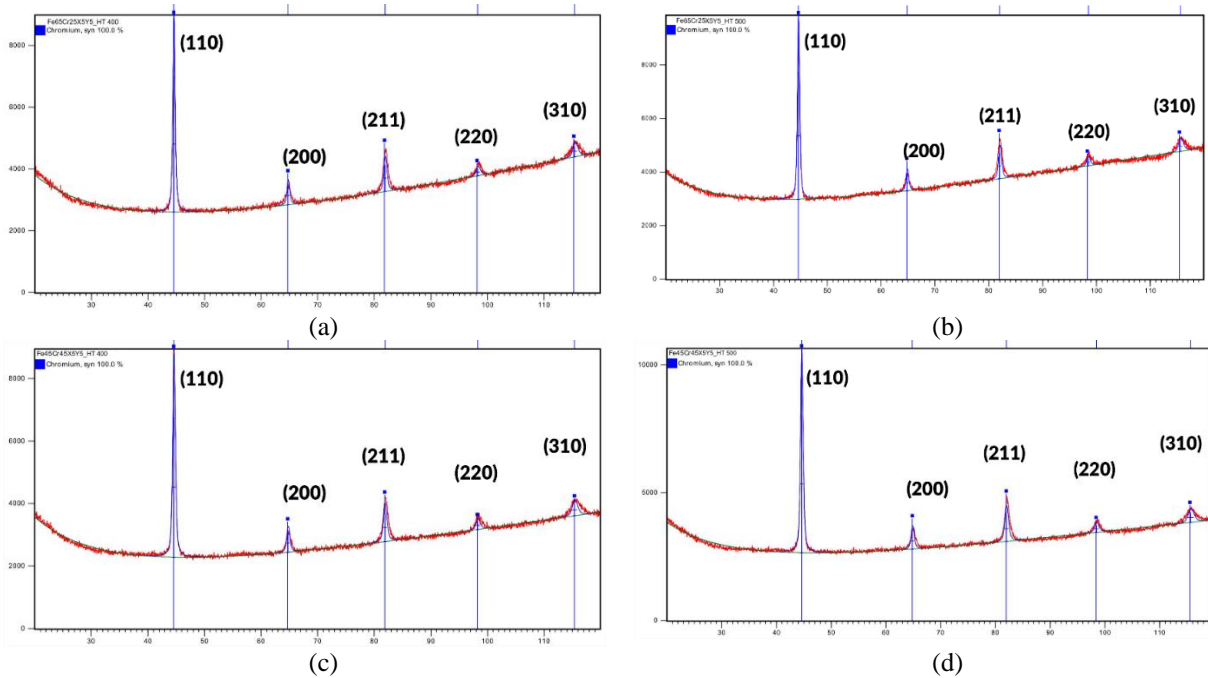
Gambar 1 menunjukkan bahwa paduan 1 ($\text{Fe}_{65}\text{Cr}_{25}\text{X}_5\text{Y}_5$) dan paduan 2 ($\text{Fe}_{60}\text{Cr}_{30}\text{X}_5\text{Y}_5$) memiliki keuletan yang baik. Namun, paduan 3 ($\text{Fe}_{55}\text{Cr}_{35}\text{X}_5\text{Y}_5$) tampaknya merupakan titik transisi dari ulet ke getas, karena memiliki bagian patahan ulet dan getas. Paduan 4 ($\text{Fe}_{50}\text{Cr}_{40}\text{X}_5\text{Y}_5$) dan paduan 5 ($\text{Fe}_{45}\text{Cr}_{45}\text{X}_5\text{Y}_5$) menunjukkan

keuletan yang buruk, ditunjukkan dengan patahan getas.

Gambar 2 memperlihatkan nilai kekerasan dari paduan 1 hingga paduan 5 untuk *as-cast* dan *solution treated*. Paduan 1 ($\text{Fe}_{65}\text{Cr}_{25}\text{X}_5\text{Y}_5$), paduan dengan jumlah Cr paling sedikit dalam sistem, memiliki kekerasan *as-cast* dan *solution treated* terendah. Sementara itu, paduan 5 ($\text{Fe}_{45}\text{Cr}_{45}\text{Mn}_5\text{Al}_5$), paduan dengan kadar Cr tertinggi, memiliki kekerasan *as-cast* dan *solution treated* tertinggi dibandingkan paduan lain. Juga terlihat bahwa kekerasan paduan *as-cast* dan *solution treated* terus meningkat sehubungan dengan jumlah kandungan Cr dalam



Gambar 2. Nilai Kekerasan *As-Cast* and *Solution Treated*



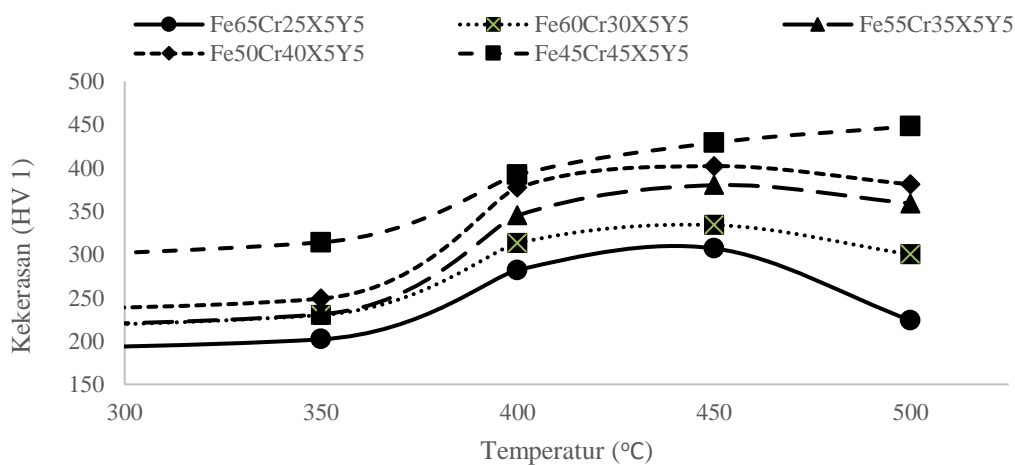
Gambar 3. Hasil XRD pada Paduan 1 Setelah Perlakuan Panas pada Temperatur 400 °C (a) dan 500 °C (b). Hasil XRD pada Paduan 5 Setelah Perlakuan Panas pada Temperatur 400 °C (c) dan 500 °C(d).

sistem. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan dari kekerasan *as-cast* dan *solution treated* untuk paduan yang sama.

Gambar 3(a) – 3(d) menunjukkan hasil XRD pada paduan 1 dan 5 setelah perlakuan panas pada temperatur 400 °C dan 500 °C. Dari hasil XRD, didapatkan bahwa tidak terbentuknya fasa intermetalik sigma, meskipun terpapar panas pada temperatur rawan getas (475 °C

embrittlement). Hal ini membuktikan bahwa penambahan 5% dari unsur X dan Y pada paduan berhasil menghasilkan *lattice misfit* yang mampu menghalangi pergerakan atom-atom Fe dan Cr yang berpotensi untuk membentuk fasa sigma.

Namun, dari Gambar 4 terlihat bahwa tetap terjadi peningkatan kekerasan ketika terpapar oleh panas yang lama pada temperatur 300 °C hingga 500 °C untuk seluruh paduan. Hal ini



Gambar 4. Pengaruh Temperatur

terjadi karena adanya pemisahan fasa α dan fasa α' yang diakibatkan oleh adanya *spinodal decomposition* pada diagram fasa Fe-Cr. Dari Gambar 4 terlihat bahwa makin tinggi kandungan Cr pada paduan, maka makin banyak fraksi α' yang terbentuk.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penambahan unsur X dan Y sebanyak 5% pada paduan multikomponen Fe-Cr-X-Y berhasil menghadang pembentukan fasa sigma yang bersifat getas. Oleh karena itu, adanya unsur X-Y berpotensi untuk menghambat terjadinya *475 °C embrittlement*.

Hal ini memungkinkan aplikasi paduan multikomponen Fe-Cr-X-Y pada temperatur kerja hingga 550 °C. Namun, masih terdapat pemisahan fasa α dan fasa α' pada komposisi paduan yang digunakan pada penelitian ini. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi separasi fasa pada paduan.

Saran

Untuk mengatasi separasi fasa pada paduan Fe-Cr-X-Y, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menambahkan elemen baru pada paduan dan/atau mengubah komposisi dari paduan yang ada.

Selain itu, perlu juga dilakukan pengujian terhadap sifat-sifat lain dari paduan tersebut seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, dan ketahanan mulur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. M. Cobb, "Steel Products Manual: Stainless Steels," *Iron & Steel Society*. p. 116, 1999.
- [2] H. M. Cobb and ASM International., *The history of stainless steel*. ASM International, 2010.
- [3] J. Rowe, "Stainless Steel in Figures 2013," 2013.
- [4] P.-J. Cunat, *Working with stainless steels*. Euro Inox [u.a.], 2008.
- [5] A. Outokumpu Stainless, "Handbook of stainless steel," *Avesta Research Centre, Avesta, Sweden*, 2013.
- [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] J. Ki, L. Lai, K. H. Lo, and C. H. Shek, "Martensitic Stainless Steels," in *Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*, 2012, pp. 41–51.
- [8] J. Ki, L. Lai, K. H. Lo, and C. H. Shek, "Duplex Stainless Steels," in *Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*, 2012, pp. 52–63.
- [9] J. Ki, L. Lai, K. H. Lo, and C. H. Shek, "Austenitic Stainless Steels," in *Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*, 2012, pp. 23–40.
- [10] J. Ki, L. Lai, K. H. Lo, and C. H. Shek, "Precipitation-Hardening Stainless Steels," in *Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*, 2012, pp. 64–71.
- [11] B. Holmberg, "Stainless Steels. Their properties and their suitability for welding," 2008.
- [12] T. Michler, "Austenitic Stainless Steels," *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, no. June 2015, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.02509-1.
- [13] 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.
- [14] P. Lambert, *Sustainability of metals and alloys in construction*, Second Edi. Elsevier Ltd., 2016.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] M. J. Yao, K. G. Pradeep, C. C. Tasan, and D. Raabe, “A novel, single phase, non-equiatomic FeMnNiCoCr high-entropy alloy with exceptional phase stability and tensile ductility,” *Scr. Mater.*, vol. 72, pp. 5–8, 2014.
- [20] 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.