

Analisis XRD dan Kekerasan Baja Hadfield setelah Deformasi Cold Rolling

Swandya Eka Pratiwi¹, Agus Ismail², Fahri Heltha^{3,4}, Haris Wahyudi^{1*}

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana

Jl. Meruya Selatan No. 1, Meruya Selatan, Jakarta Barat, Indonesia

² Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Jayabaya

Jl. Raya Jakarta-Bogor No.KM. 28, Pekayon, Kec. Cimanggis, Kota Jakarta Timur, Indonesia

³ Departemen Teknik Elektro dan Komputer, Universitas Syiah Kuala

Jl. Teungku Syech Abdur Rauf No. 7, Darussalam, Banda Aceh, Aceh, Indonesia

⁴ Department of Mechanical Engineering, UCSI University

Jalan UCSI, UCSI Heights (Taman Connaught), Cheras 56000, Kuala Lumpur, Malaysia

*Penulis korespondensi; E-mail: haris.wahyudi@mercubuana.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 Nov 2025

Revised 7 Sep 2026

Accepted 1 Oct 2026

Available online 30 Oct 2026

Communicated by Haris

Wahyudi

Keywords: hadfield, cold rolling, crystallite size, microstrain, Williamson-Hall.

ABSTRACT

Hadfield steel demonstrates outstanding mechanical characteristics, merging significant work-hardening ability with substantial ductility. This research intends to examine the impact of plastic deformation on Hadfield steel via the cold rolling (CR) technique. The examined samples included both as-cast specimens and those subjected to cold reduction (CR) of 20%, 30%, and 40%. The Hadfield steel specimens were fabricated through casting and later sectioned with wire cutting. The samples were subsequently affixed with resin and hardener, then ground and polished before characterization. X-ray diffraction (XRD) was utilized for phase identification, and the diffraction data were examined with HighScore software to ascertain the existing phases, full width at half maximum (FWHM), and approximations of crystallite size and microstrain through Williamson-Hall analysis. Moreover, Vickers hardness assessment utilizing a 30 kgf load was conducted to analyze alterations in hardness due to plastic deformation occurring during cold rolling. The findings indicated that augmenting the extent of plastic deformation via cold rolling led to a reduction in crystallite size, decreasing from 33.68 nm in the as-cast state to 32.91 nm (CR 20%), 22.28 nm (CR 30%), and 21.61 nm (CR 40%). Conversely, the microstrain escalated from 0.53% in the as-cast state to 0.68% (CR 20%), 0.72% (CR 30%), and 0.92% (CR 40%). The rise in microstrain signifies an escalation in lattice distortion as assessed via XRD peak broadening analysis with heightened plastic deformation. The Vickers hardness measurements indicated a rise in hardness corresponding to the level of deformation, progressing from 212.1 ± 10.2 HV30/10 in the as-cast state to 401.4 ± 6.6 HV30/10 (CR 20%), 469.7 ± 18.4 HV30/10 (CR 30%), and 525.7 ± 56.0 HV30/10 (CR 40%). The noted enhancement in hardness aligns with strain hardening caused by plastic deformation throughout the cold rolling procedure.

This is an open access article under the [CC BY](#) license



PENDAHULUAN

Baja Hadfield memiliki karakteristik yang baik jika mengalami laju regangan dan energi tinggi [1]–[4]. Pengaruh deformasi terhadap kekuatan baja Hadfield ditunjukkan oleh beberapa peneliti antara lain [5] yang menyebutkan bahwa peningkatan kekuatan dan kekerasan baja Hadfield didominasi oleh dislokasi dan *twinning* [3], [6]. Profil difraksi sinar-X (XRD) menunjukkan hanya fasa austenit yang ada dan tidak ditemukan fasa yang lain pada spesimen yang mengalami deformasi plastis. Ini dibuktikan tidak terjadi transformasi fasa (γ ke α atau γ ke ϵ) [5]. Hasil karakterisasi XRD lain juga menunjukkan bahwa tidak ada perubahan fasa pada baja Hadfield setelah mengalami uji tarik sampai patah [7], [8]. Penelitian pada baja Hadfield terutama dititikberatkan pada hubungan kecepatan pengerasan regangan dan mekanisme deformasi. Selain itu hanya fokus pada struktur mikro dan sifat mekanik baja Hadfield [5], [9], [10]. Hubungan antara proses pembebanan dan mekanisme pengerasan regangan pada temperatur berbeda serta hubungan antara energi impact dan temperatur belum banyak dikaji. Energi impact kritis menyebabkan jenis deformasi berbeda. Di bawah energi kritis deformasi disebabkan oleh slip dan dislokasi dan di atas energi kritis deformasi didominasi oleh *twinning*. Energi impact kritis dilaporkan bernilai 60 J [11], 80 dan 100 J [5], dan 128 J [2]. Penelitian terkait mekanisme deformasi baja Hadfield masih menjadi topik yang relevan karena metode deformasi dipengaruhi beberapa hal antara lain komposisi unsur paduan, laju deformasi, *stacking fault* dan energi pembebanan [6], [12], [13].

Analisis profil XRD baja Hadfield bisa digunakan untuk menentukan regangan mikro (*microstrain*) dan kerapatan dislokasi (*dislocation density*) [14], [15]. Karakteristik fasa melalui pengamatan struktur mikro memerlukan preparasi spesimen yang lebih rumit. Oleh karena itu, pengamatan fasa dan transformasi menggunakan XRD lebih mudah [3]–[16]. *X-Ray Diffraction* (XRD) adalah teknik analisis non-destruktif yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa bahan kristal dan menentukan ukuran unit sel. Hasil karakterisasi baja Hadfield menggunakan metode XRD dilakukan untuk menentukan adanya pembentukan karbida atau potensi perubahan fasa akibat perlakuan panas dan deformasi yang diberikan. Metode yang umum digunakan untuk menentukan ukuran kristalit (*crystallite size*) dari pelebaran puncak difraksi sinar-X (XRD) diusulkan oleh Scherrer [17]–[19].

Metode Scherrer telah banyak digunakan untuk mengestimasi ukuran kristalit berdasarkan pelebaran puncak difraksi [19]–[21] sedangkan metode Williamson–Hall dapat digunakan untuk memisahkan kontribusi pelebaran puncak yang berkaitan dengan ukuran kristalit dan regangan mikro [22], [23]. Dalam analisis pola difraksi, pelebaran puncak tidak hanya berasal dari karakteristik material, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh instrumen pengukuran [21], [24]. Oleh karena itu, kontribusi pelebaran yang berasal dari instrumen perlu diperhitungkan sebelum parameter mikrostruktur ditentukan. Penggunaan material standar seperti Lanthanum Hexaboride (LaB_6) [24] dapat digunakan untuk mengestimasi kontribusi pelebaran instrumen dalam analisis profil garis difraksi.

Penelitian mengenai baja Hadfield telah menunjukkan bahwa deformasi plastis melalui *cold rolling* maupun metode deformasi lainnya dapat menghasilkan perubahan struktur mikro dan meningkatkan respon pengerasan regangan. Analisis XRD juga telah digunakan untuk mengevaluasi perubahan pelebaran puncak, *microstrain*, dan ukuran domain kristalin pada baja Hadfield yang mengalami deformasi. Penelitian terdahulu, misalnya, telah menggunakan analisis Williamson–Hall untuk mengevaluasi *microstrain* dan *crystallite size* pada baja Hadfield yang mengalami *rolling strain*, sedangkan penelitian lainnya membandingkan pengaruh *cold rolling* dengan mode deformasi lainnya terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik baja Hadfield.

Meskipun demikian, evaluasi sistematis terhadap perubahan parameter pelebaran puncak XRD pada beberapa tingkat reduksi *cold rolling* masih relevan untuk dilakukan, khususnya dengan mempertimbangkan kontribusi instrumental *broadening* sebelum analisis Williamson–Hall. Dalam penelitian ini, baja Hadfield dengan kandungan 2,71 wt.% Cr diberi deformasi *cold rolling* sebesar 20%, 30%, dan 40%, dengan kondisi *as-cast* sebagai pembanding. Perubahan *crystallite size* dan *microstrain* dievaluasi dan selanjutnya dibandingkan dengan perubahan kekerasan Vickers untuk memperoleh gambaran keterkaitan antara tingkat deformasi, perubahan struktur kristal, dan respons pengerasan material.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tingkat deformasi plastis melalui proses *cold rolling* terhadap karakteristik struktur kristal baja Hadfield. Tingkat reduksi *cold rolling* yang digunakan adalah 20%, 30%, dan 40%, dengan kondisi *as-cast* sebagai pembanding. Karakteristik material dianalisis melalui identifikasi fasa XRD, analisis pelebaran puncak menggunakan metode Williamson–Hall untuk menentukan *crystallite size* dan *microstrain*, serta pengujian kekerasan Vickers. Hasil analisis tersebut digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara peningkatan deformasi plastis, perubahan parameter struktur kristal, dan peningkatan kekerasan baja Hadfield.

METODE

Material dan Komposisi Kimia

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan eksperimen yang meliputi persiapan material baja Hadfield, karakterisasi komposisi kimia, proses deformasi plastis menggunakan *cold rolling* (CR), preparasi permukaan spesimen, karakterisasi struktur kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), serta pengujian kekerasan Vickers. Baja Hadfield yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui proses peleburan menggunakan tungku induksi dan kemudian dicetak hingga menghasilkan material berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan tinggi 200 mm. Material hasil pengecoran selanjutnya dipotong menggunakan *wire electrical discharge machining* (*wire cut*) untuk memperoleh spesimen dengan ketebalan awal sekitar 5 mm.

Komposisi kimia material dikarakterisasi menggunakan *optical emission spectrometry* (OES), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Spesimen kemudian dipersiapkan dan dibagi untuk memperoleh kondisi material tanpa deformasi (*as-cast*) serta material yang mengalami deformasi plastis melalui proses *cold rolling* dengan tingkat reduksi 20%, 30%, dan 40%. Tahapan penelitian selanjutnya meliputi proses *cold rolling* secara bertahap pada temperatur kamar, preparasi permukaan spesimen melalui proses pengamplasan dan pemolesan, pengujian XRD untuk mengidentifikasi fasa dan karakteristik pelebaran puncak difraksi, serta pengujian kekerasan Vickers untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik akibat deformasi plastis. Spesimen baja Hadfield dibuat dengan komposisi berdasarkan Standar ASTM A128/A128M dengan nomor kode ASTM C [25]. Komposisi paduan diperoleh dari pengujian OES seperti pada Tabel 1.

Proses Cold Rolling

Proses *cold rolling* (CR) dilakukan pada temperatur kamar menggunakan mesin *two-high rolling mill* Buehler dengan diameter rol 80 mm. Proses CR menghasilkan deformasi plastis dan meningkatkan efek pengerasan regangan (*strain hardening*) pada baja Hadfield. Tiga tingkat reduksi ketebalan digunakan dalam penelitian ini, yaitu 20%, 30%, dan 40%. Persentase reduksi ketebalan (*cold rolling reduction*) dihitung berdasarkan perbandingan antara pengurangan ketebalan terhadap ketebalan awal spesimen menggunakan persamaan (1).

$$\%CR = \frac{(H_0 - H_i)}{H_0} \times 100 \quad (1)$$

dengan %CR adalah persentase *cold rolling*, H_0 adalah ketebalan awal dan H_i adalah ketebalan akhir. Ketebalan awal spesimen adalah 5 mm, panjang 40 mm, lebar 19,7 mm. Jika ingin mendapatkan tebal akhir, dengan nilai %CR adalah 20 %, maka $20 = \frac{(5-H_i)}{5} \times 100$, $H_i = 5 - \left(\frac{20 \times 5}{100}\right) = 4\text{mm}$. Berdasarkan ketebalan awal tersebut, tingkat reduksi 20%, 30%, dan 40% masing-masing ditargetkan menghasilkan ketebalan akhir sebesar 4,00 mm, 3,50 mm, dan 3,00 mm.

Tabel 1. Komposisi baja Hadfield

Unsur	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Sn	Al	Fe
Komposisi (wt%)	1,130	0,324	0,005	0,048	12,418	0,037	2,706	0,006	0,008	0,026	0,002	0,003	83,282

Tabel 2. Parameter dan hasil proses *cold rolling*

Spesimen	Ketebalan awal (mm)	Ketebalan target (mm)	Jumlah <i>pass</i>	Reduksi nominal/ <i>pass</i>	Ketebalan akhir (mm)	Reduksi total (%)
CR20	5,00	4,00	9	2,5%	3,98	20,4
CR30	5,00	3,50	14	2,5%	3,51	29,8
CR40	5,00	3,00	20	2,5%	3,01	39,7

Proses pengerolan dilakukan secara bertahap dan tanpa pelumas dengan reduksi nominal sekitar 2,5% pada setiap *pass*. Berdasarkan perhitungan kumulatif reduksi, kondisi reduksi sekitar 20%, 30%, dan 40% masing-masing dicapai setelah 9, 14, dan 20 *pass*. Ketebalan akhir berdasarkan perhitungan masing-masing adalah sekitar 3,98; 3,51 dan 3,01 mm. Penyetelan celah rol dilakukan menggunakan skala mesin dengan rentang 0–100. Satu putaran penuh mekanisme penyetelan ekuivalen dengan perubahan celah sekitar 1 mm, sehingga satu divisi skala ekuivalen dengan sekitar 0,01 mm. Pengerolan dilakukan secara bertahap dan ketebalan benda kerja diperiksa pada tahapan pengerolan. Parameter utama proses *cold rolling* yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada . Setelah setiap tahapan pengerolan, ketebalan spesimen diukur untuk memastikan tingkat reduksi yang diperoleh mendekati nilai target.

Preparasi Spesimen dan Pengujian XRD

Setelah proses *cold rolling*, spesimen dipersiapkan untuk karakterisasi XRD melalui tahapan pengamplasan dan pemolesan. Pengamplasan dilakukan secara bertahap untuk menghasilkan permukaan yang rata, sedangkan pemolesan dilakukan hingga diperoleh permukaan yang halus dan *mirror finish*. Preparasi permukaan dilakukan untuk menghilangkan lapisan oksida, kotoran, dan ketidakteraturan permukaan yang berpotensi memengaruhi kualitas pola difraksi yang diperoleh. Karakterisasi struktur kristal baja Hadfield dilakukan menggunakan difraktometer XRD Rigaku dengan sumber radiasi *CuK α* dan panjang gelombang $\lambda = 1,5406\text{\AA}$. Pengukuran dilakukan pada rentang sudut $20^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$ dengan *step size* sebesar $0,01^\circ$. Pola difraksi yang diperoleh digunakan untuk mengidentifikasi fase kristalin dan menentukan karakteristik pelebaran puncak difraksi. Pengolahan dan analisis pola difraksi dilakukan menggunakan perangkat lunak *HighScore Plus*. Analisis meliputi identifikasi posisi puncak difraksi, pencocokan puncak dengan pola referensi fase kristalin, serta penentuan nilai *full width at half maximum* (FWHM) dari puncak-puncak difraksi yang teridentifikasi. Nilai FWHM selanjutnya digunakan untuk menganalisis pelebaran puncak akibat ukuran kristalit dan regangan mikro.

Untuk memperhitungkan kontribusi pelebaran yang berasal dari instrumen, dilakukan koreksi instrumental menggunakan material standar Lanthanum Hexaboride (LaB_6). Nilai pelebaran instrumen yang diperoleh dari pengukuran standar LaB_6 digunakan untuk mengoreksi FWHM puncak spesimen sebelum dilakukan analisis Williamson-Hall. Dengan demikian, parameter *crystallite size* dan *microstrain* yang diperoleh dari analisis Williamson-Hall diharapkan lebih merepresentasikan kontribusi struktur kristal material setelah kontribusi pelebaran instrumen diperhitungkan. Analisis meliputi penentuan *background*, identifikasi posisi puncak difraksi, pencocokan puncak dengan pola referensi fase kristalin, serta penentuan nilai FWHM dari puncak-puncak difraksi yang teridentifikasi. Nilai FWHM selanjutnya digunakan untuk analisis pelebaran puncak dan perhitungan *crystallite size* serta *microstrain* menggunakan metode Williamson-Hall.

Analisis Data XRD

Analisis data XRD dilakukan untuk mengidentifikasi fasa kristalin serta mengevaluasi perubahan karakteristik struktur kristal akibat deformasi plastis. Pola difraksi hasil pengukuran diolah menggunakan perangkat lunak *HighScore Plus*. Tahapan pengolahan meliputi penentuan *background*, penghalusan profil difraksi apabila diperlukan, identifikasi posisi puncak, pencocokan puncak dengan pola referensi berbasis data kristal, dan penentuan nilai FWHM dari puncak-puncak difraksi yang teridentifikasi. Pencocokan pola difraksi digunakan untuk menentukan fasa yang terdapat pada masing-masing spesimen, sedangkan nilai FWHM digunakan sebagai parameter dalam analisis pelebaran puncak. Ukuran kristalit diestimasi

berdasarkan pelebaran puncak difraksi menggunakan persamaan Scherrer (persamaan 2).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

Dimana (D) adalah ukuran kristalit (nm), (K) adalah faktor bentuk kristal, λ adalah panjang gelombang radiasi sinar-X, β adalah lebar puncak difraksi pada nilai FWHM dalam satuan radian, dan θ adalah sudut Bragg. Nilai k yang umum digunakan adalah: 0,94 jika β adalah FWHM dan 0,89 untuk *integral breadth* [2, 4]. Persamaan Scherrer digunakan sebagai dasar estimasi ukuran domain kristalin yang memberikan kontribusi terhadap pelebaran puncak difraksi.

Selain ukuran kristalit, pelebaran puncak difraksi juga dipengaruhi oleh regangan mikro (*microstrain*) yang terjadi akibat distorsi kisi. Kontribusi pelebaran puncak akibat regangan mikro dapat dinyatakan sebagai persamaan (3) [26]–[28].

$$\beta_{\epsilon} = 4\epsilon \cdot \tan \theta \quad (3)$$

dengan β_{ϵ} adalah pelebaran puncak yang berasal dari regangan mikro, ϵ adalah regangan mikro, dan θ adalah sudut Bragg. Untuk memisahkan kontribusi ukuran kristalit dan regangan mikro terhadap pelebaran puncak, digunakan metode Williamson–Hall (W–H) [29]. Metode ini mengasumsikan bahwa pelebaran puncak yang diamati merupakan kontribusi dari ukuran kristalit dan regangan mikro, sehingga secara sederhana dapat dinyatakan sebagai persamaan (4).

$$\beta = \beta_d + \beta_e \quad (4)$$

dengan β_d merupakan kontribusi pelebaran akibat ukuran kristalit dan β_e merupakan kontribusi akibat regangan mikro. Dengan menggabungkan kontribusi tersebut, persamaan Williamson–Hall dapat dituliskan sebagai persamaan (5).

$$\beta \cos \theta = \frac{k\lambda}{D} + 4\epsilon \sin \theta \quad (5)$$

Hubungan tersebut dinyatakan dalam bentuk persamaan linier dengan $y = \beta \cdot \cos \theta$ dan $x = \sin \theta$. Dengan demikian, persamaan Williamson–Hall dapat dituliskan dalam bentuk $y = mx + c$ dengan kemiringan garis $m = 4\epsilon$, sehingga nilai regangan mikro diperoleh dari $\epsilon = m/4$, sedangkan intersep c berhubungan dengan ukuran kristalit melalui $c = (K\lambda)/D$ sehingga ukuran kristalit dapat ditentukan dari $D = K\lambda/c$. Analisis dilakukan menggunakan beberapa puncak difraksi yang teridentifikasi pada masing-masing spesimen. Nilai FWHM yang digunakan dalam analisis terlebih dahulu dikoreksi terhadap kontribusi pelebaran yang berasal dari instrumen. Koreksi instrumental dilakukan menggunakan spesimen standar lantanum hexaboride (LaB_6) [30]. Dengan asumsi kontribusi pelebaran instrumen dan spesimen mengikuti hubungan kuadrat, pelebaran puncak dapat dinyatakan sebagai persamaan (6) [26].

$$\beta_{\text{total}}^2 = \beta_{\text{spesimen}}^2 + \beta_{\text{instrumen}}^2 \quad (6)$$

Dimana β_{total} adalah pelebaran puncak yang terukur, β_{spesimen} adalah kontribusi pelebaran yang berasal dari spesimen, dan $\beta_{\text{instrumen}}$ adalah kontribusi pelebaran yang berasal dari instrumen. Nilai pelebaran instrumen yang diperoleh dari pengukuran standar LaB_6 digunakan untuk melakukan koreksi terhadap nilai FWHM spesimen sebelum analisis Williamson–Hall. Dengan demikian, nilai *crystallite size* dan *microstrain* yang diperoleh lebih merepresentasikan kontribusi struktur kristal material dibandingkan kontribusi pelebaran instrumen. Pelebaran puncak XRD disebabkan oleh beberapa faktor antara lain instrumen, ukuran kristalit, regangan mikro dan masing-masing berkontribusi terhadap profil puncak [7], [31], [32].

Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik baja Hadfield akibat peningkatan tingkat deformasi *cold rolling*. Pengujian dilakukan menggunakan beban sebesar 30 kgf dengan waktu pembebanan (*dwell time*) selama 10 detik, sehingga hasil pengujian dinyatakan sebagai HV30/10. Pengujian dilakukan pada spesimen *as-cast*, CR 20%, CR 30%, dan CR 40%. Pada setiap kondisi, dilakukan tiga indentasi pada lokasi yang berbeda pada permukaan spesimen yang sama. Nilai rata-rata dan simpangan baku dihitung berdasarkan tiga hasil indentasi tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian XRD dilakukan terhadap spesimen baja Hadfield *as-cast* CR 20%, 30%, dan 40%. Pola difraksi selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak *HighScore Plus* untuk mengidentifikasi posisi dan intensitas puncak difraksi serta menentukan karakteristik pelebaran puncak. Hasil pengolahan pola difraksi XRD untuk seluruh kondisi spesimen ditampilkan pada Gambar 1, sedangkan nilai posisi puncak difraksi dan FWHM dirangkum pada Tabel 3. Berdasarkan pola difraksi pada Gambar 1, seluruh spesimen menunjukkan puncak-puncak difraksi utama yang dapat diidentifikasi sebagai struktur austenitik. Puncak difraksi utama teramati pada bidang kristal (111), (200), (220), dan (311). Pola difraksi seluruh spesimen didominasi oleh refleksi fase austenitik. Pada kondisi *as-cast* maupun setelah proses *cold rolling* hingga tingkat reduksi 40% tidak terdapat puncak tambahan dengan intensitas yang cukup kuat dan terpisah secara jelas untuk mengidentifikasi fase kristalin sekunder dalam batas sensitivitas pengukuran XRD. Hasil tersebut menunjukkan bahwa deformasi plastis melalui proses *cold rolling* pada kondisi penelitian ini tidak menghasilkan perubahan fasa kristalin yang dapat terdeteksi oleh XRD.

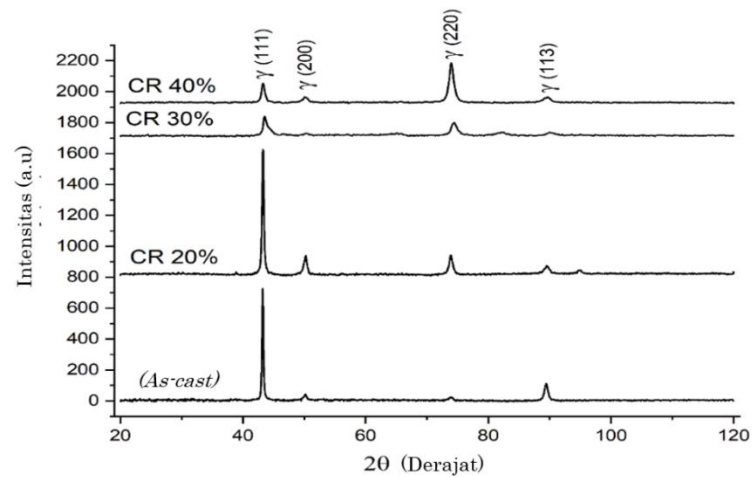
Selain perubahan intensitas puncak, pola difraksi menunjukkan perubahan karakteristik puncak setelah peningkatan tingkat deformasi. Pelebaran puncak difraksi cenderung meningkat pada beberapa bidang kristal, sebagaimana ditunjukkan oleh perubahan nilai FWHM pada Tabel 3. Pelebaran puncak tersebut berkaitan dengan perubahan struktur kristal akibat deformasi plastis dan selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menganalisis ukuran kristalit (*crystallite size*) dan regangan mikro (*microstrain*) menggunakan metode Williamson–Hall.

Pola difraksi XRD seluruh spesimen menunjukkan refleksi utama yang dapat diidentifikasi sebagai fase austenitik. Puncak utama diamati pada bidang kristal (111), (200), (220), dan (311) seperti ditampilkan di Gambar 1. Dengan meningkatnya tingkat reduksi *cold rolling*, terjadi perubahan pada karakteristik pelebaran puncak difraksi, yang ditunjukkan oleh perubahan nilai FWHM. Perubahan pelebaran puncak tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan metode Williamson–Hall untuk memisahkan kontribusi ukuran kristalit dan regangan mikro. Hubungan ukuran kristalit dan regangan mikro hasil pengujian XRD spesimen baja Hadfield bisa ditentukan menggunakan metode W-H seperti Persamaan 4. Data yang diperoleh seperti pada Tabel 1 kemudian dibuat grafik dengan sumbu y adalah $\beta \cos \theta$ dan sumbu x $\sin \theta$. Plot grafik W-H untuk spesimen *as-cast*, CR 20%, CR 30% dan CR 40% ditunjukkan pada Gambar 2 sampai Gambar 5.

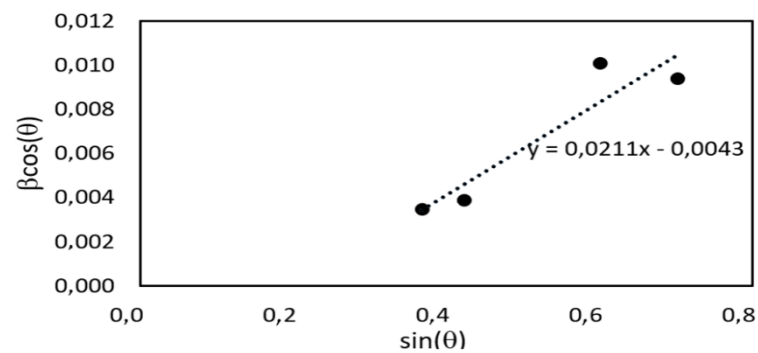
Ukuran kristalit dan regangan kiri berikutnya ditentukan berdasarkan Persamaan 4 dan nilai pendekatan linear dari grafik W-H keempat spesimen. Nilai masing-masing kemiringan kurva digunakan untuk menentukan persentase regangan mikro dan nilai konstanta dari regresi linear digunakan untuk menghitung ukuran kristalit. Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan nilai ukuran kristalit dan persentase regangan untuk spesimen *as-cast* sampai CR 40%.

Tabel 3. Data hasil pengolahan pola difraksi XRD

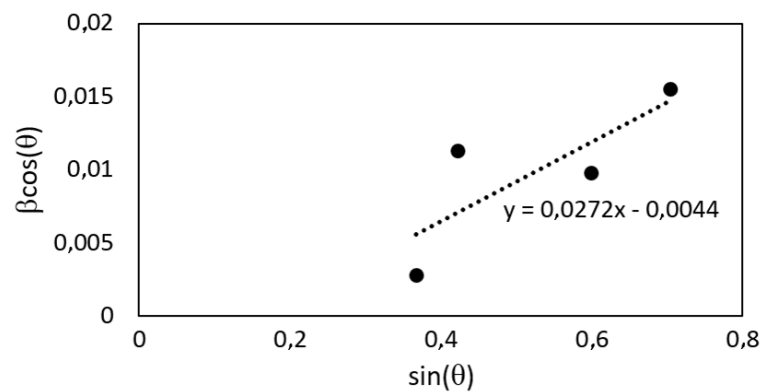
No	2θ (°)	(hkl)	FWHM (°)			
			<i>As-cast</i>	CR 20%	CR 30%	CR 40%
1	43,19	(111)	0,215	0,170	0,178	0,299
2	50,16	(200)	0,246	0,713	0,429	0,742
3	73,95	(220)	0,723	0,701	0,910	1,026
4	89,35	(311)	0,757	1,254	1,027	1,577



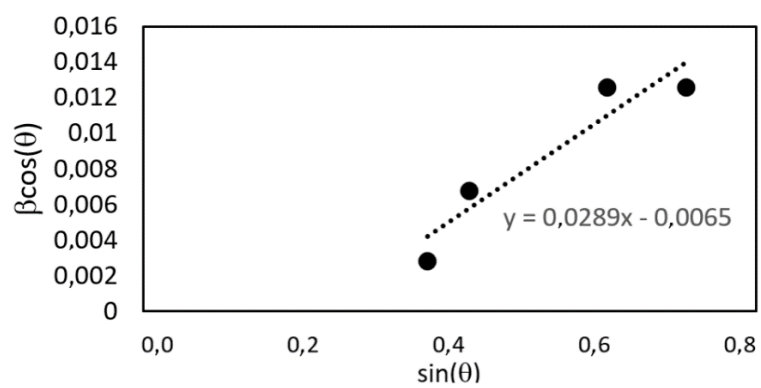
Gambar 1. Pola difraksi XRD spesimen *as-cast*, CR 20%, CR 30% dan CR 40% yang ditampilkan dengan *vertical offset* untuk memperjelas perbandingan profil puncak



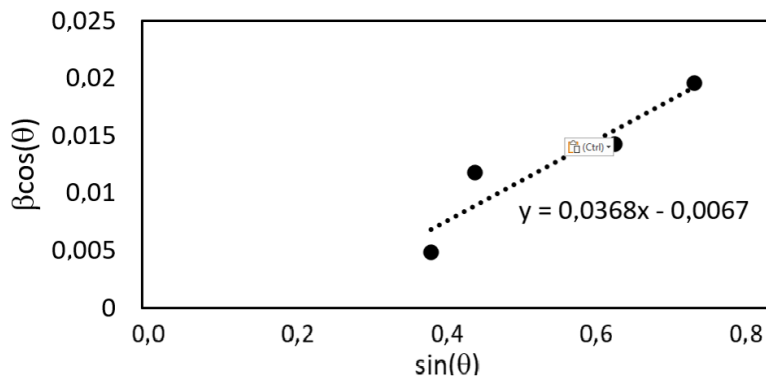
Gambar 2. Plot Williamson-Hall untuk spesimen *as-cast*



Gambar 3. Plot Williamson-Hall untuk spesimen CR 20%



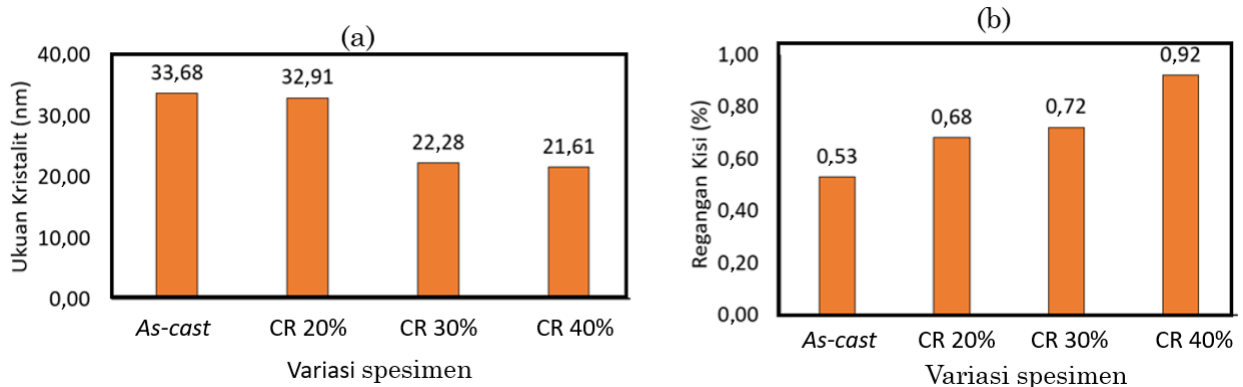
Gambar 4. Plot Williamson-Hall untuk spesimen CR 30%



Gambar 5. Plot Williamson-Hall spesimen CR 40%

Tabel 4. Nilai regangan mikro dan ukuran kristalit

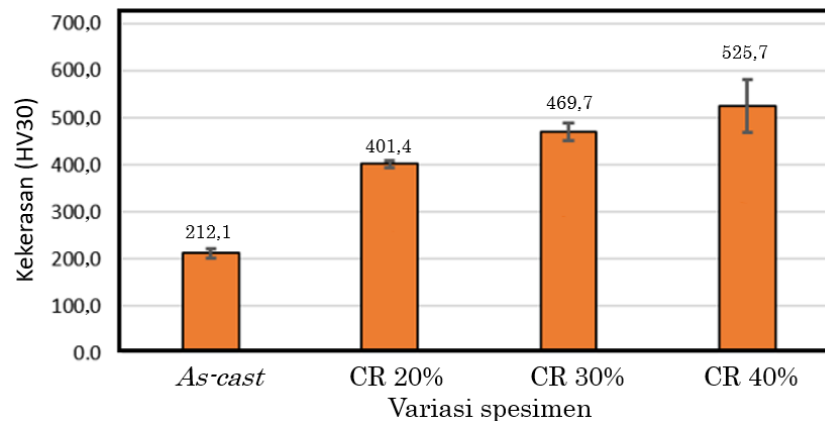
Parameter	<i>As-cast</i>	CR 20%	CR 30%	CR 40%
Regangan Mikro (%)	0,53	0,68	0,72	0,92
Ukuran Kristalit (nm)	33,68	32,91	22,28	21,61



Gambar 6. Grafik distribusi ukuran kristalit dan regangan mikro: a) Ukuran kristalit, b) Regangan mikro

Ukuran kristalit adalah ukuran rata-rata dari kristalit, domain kristal kecil yang membentuk suatu material baja Hadfield. Pada Gambar 6a, ukuran kristalit menurun dari spesimen *as-cast* sampai spesimen CR 40%. Penurunan nilai kristalit berbanding terbalik dengan regangan mikro seperti pada Gambar 6b. Pada spesimen *as-cast*, ukuran kristalit menunjukkan nilai paling tinggi yaitu 33.68 nm, kemudian menurun menjadi 32,91 pada spesimen CR 20%, 22,28 pada spesimen CR 30% dan 21,61 pada spesimen CR 40%. Nilai regangan mikro paling kecil adalah spesimen *as-cast* yaitu 0,53%, kemudian meningkat sebesar 0,68% pada spesimen CR 20%, 0,72% pada spesimen CR 30% dan 0,92% pada spesimen CR 40%. Hasil analisis Williamson-Hall menunjukkan bahwa peningkatan tingkat deformasi plastis diikuti oleh penurunan ukuran domain kristalin (*crystallite size*) dan peningkatan *microstrain*. Peningkatan nilai *microstrain* menunjukkan meningkatnya distorsi atau regangan pada kisi kristal yang terdeteksi melalui pelebaran puncak difraksi. Temuan ini juga sejalan dengan apa yang telah dilaporkan oleh [22], [23].

Kekerasan spesimen diukur menggunakan alat kekerasan Vickers untuk spesimen *as-cast*, spesimen CR 20%, 30% dan 40%. Pengukuran kekerasan dilakukan tiga kali untuk setiap spesimen untuk kemudian diambil nilai rata-rata. Nilai kekerasan spesimen seperti ditunjukkan pada Gambar 7 menunjukkan peningkatan kekerasan mulai dari spesimen *as-cast* sebesar $212,1 \pm 10,2$ HV, spesimen CR 20% sebesar $401,4 \pm 6,6$ HV, spesimen CR sebesar 30% $469,7 \pm 18,4$ HV dan spesimen CR 40% sebesar $525,7 \pm 56,0$ HV. Peningkatan *microstrain* dapat berkaitan dengan akumulasi cacat kristal akibat deformasi plastis, termasuk kontribusi dislokasi [34], [35]. Namun, densitas dislokasi tidak dihitung secara langsung dalam penelitian ini sehingga peningkatan densitas dislokasi tidak dinyatakan sebagai hasil kuantitatif penelitian. Peningkatan kekerasan yang diamati seiring dengan meningkatnya tingkat deformasi konsisten dengan respon



Gambar 7. Nilai kekerasan spesimen

pengerasan regangan (*strain hardening*) akibat deformasi plastis selama proses *cold rolling*. Dengan demikian, hasil kekerasan memberikan indikasi adanya peningkatan resistansi terhadap deformasi, tetapi mekanisme mikroskopis spesifik yang mendasarinya tidak dapat ditentukan secara langsung hanya berdasarkan data XRD dan kekerasan.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *cold rolling* hingga reduksi 40% tidak menghasilkan perubahan fase kristalin yang dapat terdeteksi melalui XRD pada kondisi pengujian yang digunakan. Peningkatan tingkat deformasi plastis diikuti oleh penurunan ukuran domain kristalin (*crystallite size*) dari 33,68 nm pada kondisi *as-cast* menjadi 32,91 nm pada CR 20%, 22,28 nm pada CR 30%, dan 21,61 nm pada CR 40%. Sebaliknya, nilai *microstrain* meningkat dari 0,53% pada kondisi *as-cast* menjadi 0,68% pada CR 20%, 0,72% pada CR 30%, dan 0,92% pada CR 40%. Perubahan tersebut menunjukkan peningkatan pelebaran puncak yang berkaitan dengan distorsi kisi akibat deformasi plastis. Namun, hasil XRD tidak digunakan untuk menyimpulkan secara langsung perubahan ukuran butir metalografis maupun densitas dislokasi. Pengujian kekerasan Vickers menunjukkan peningkatan nilai rata-rata dari $212,1 \pm 10,2$ HV30/10 pada kondisi *as-cast* menjadi $401,4 \pm 6,6$ HV30/10 pada CR 20%, $469,7 \pm 18,4$ HV30/10 pada CR 30%, dan $525,7 \pm 56,0$ HV30/10 pada CR 40%. Dengan demikian, pada kondisi penelitian ini, peningkatan deformasi plastis melalui *cold rolling* berkaitan dengan peningkatan *microstrain*, penurunan *crystallite size*, dan peningkatan kekerasan baja Hadfield.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. C. Liu, Z. N. Yang, C. L. Zheng, and F. C. Zhang, "Simultaneously Improving The Strength and Ductility of Coarse-Grained Hadfield Steel with Increasing Strain Rate," *Scripta Materialia*, vol. 66, no. 7, pp. 431–434, 2012, doi: 10.1016/j.scriptamat.2011.12.005.
- [2] H. Enginsoy, E. Bayraktar, and A. Kurşun, "A Comprehensive Study on the Deformation Behavior of Hadfield Steel Sheets Subjected to the Drop Weight Test: Experimental Study and Finite Element Modeling," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 9, Article 734, 2018, doi: 10.3390/met8090734.
- [3] D. Bańkowski, P. S. Młynarczyk, W. Depczyński, and K. C. Bolanowski, "The Effect of Work Hardening on the Structure and Hardness of Hadfield Steel," *Archives of Foundry Engineering*, vol. 2024, no. 1, pp.14–20, 2024, doi: 10.24425/afe.2024.149246.
- [4] G. Tressia, T. Tepedino, M. Masoumi, and J. I. Pereira, "Microstructural Evolution and Strain-Hardening Behavior in Hadfield Steel Railway Crossings," *Tribology in Industry*, vol. 46, no. 4, pp.639–650, 2024, doi: 10.24874/ti.1744.08.24.10.
- [5] L. Xiaoyun, W. Wei, Z. Fangqiu, L. Lanjun, and Z. Xianfeng, "Influence of Impact Energy on Work Hardening Ability of Austenitic Manganese Steel and Its Mechanism," *China Foundry*, vol. 9, no. 3, pp. 248–251, 2012.

- [6] X. Yan, Z. Chai, Z. Zhou, and Z. Hou, "The Coupled Effect of SFE and Microstructural Evolution on Wear Resistance in Hadfield Steel at Different Temperatures," *Wear*, vol. 578–579, Article 205833, 2025, doi: 10.1016/j.wear.2025.205833.
- [7] Y. H. Wen, H. B. Peng, H. T. Si, R. L. Xiong, and D. Raabe, "A Novel High Manganese Austenitic Steel with Higher Work Hardening Capacity and Much Lower Impact Deformation than Hadfield Manganese Steel," *Materials and Design*, vol. 55, pp. 798–804, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.057.
- [8] M. Zemlik, Ł. Konat, K. Leśny, and K. Jamroziak, "Comparison of Abrasive Wear Resistance of Hardox Steel and Hadfield Cast Steel," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 23, Article 11141, 2024, doi: 10.3390/app142311141.
- [9] B. Hutchinson and N. Ridley, "On Dislocation Accumulation and Work Hardening in Hadfield Steel," *Scripta Materialia*, vol. 55, no. 4, pp. 299–320, 2006, doi: 10.1016/j.scriptamat.2006.05.002.
- [10] F. C. Liu, B. Lv, F. C. Zhang, and S. Yang, "Enhanced Work Hardening in Hadfield Steel During Explosive Treatment," *Materials Letters*, vol. 65, no. 15–16, pp. 2333–2336, 2011, doi: 10.1016/j.matlet.2011.05.041.
- [11] F. C. Zhang, Z. N. Yang, L. H. Qian, F. C. Liu, B. Lv, and M. Zhang, "High Speed Pounding: A Novel Technique for The Preparation of A Thick Surface Layer with A Hardness Gradient Distribution on Hadfield Steel," *Scripta Materialia*, vol. 64, no. 6, pp. 560–563, 2011, doi: 10.1016/j.scriptamat.2010.11.043.
- [12] J. A. Castañeda, O. A. Zambrano, G. A. Alcázar, S. A. Rodríguez, and J. J. Coronado, "Stacking Fault Energy Determination in Fe-Mn-Al-C Austenitic Steels by X-Ray Diffraction," *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 11, Article 1701, 2021, doi: 10.3390/met11111701.
- [13] Y. Kong *et al.*, "Influence of Stacking Fault Energy and Hydrogen on Deformation Mechanisms in High Mn Austenitic Steels during In-Situ Tensile Testing," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 148, Article 149833, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.06.023.
- [14] H. Wahyudi, S. E. Pratiwi, S. Alva, and S. Subekti, "Menentukan Nilai Energi Stacking Fault Paduan Baja Mangan Fe-Mn-C-Cr Menggunakan Persamaan Termodinamika," *Rotasi*, vol. 27, no. 2, pp. 77–83, 2025, doi: 10.14710/rotasi.27.2.77-83.
- [15] H. S. Lipson, "X-ray Diffraction by B. E. Warren," *Acta Crystallographica Section A*, vol. 27, no. 2, p. 2, 1971, doi: 10.1107/s0567739471000445.
- [16] M. A. Ikaningsih, R. R. M. Isa, and D. H. Prajitno, "Perilaku Korosi Paduan Magnesium AZ91 Hasil Phosphate Conversion Coating dalam Lingkungan Simulated Body Fluids," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 23, no. 1, pp. 43–56, 2026, doi: 10.9744/jtm.23.1.43-56.
- [17] P. Scherrer, "Determination of Size and Inner Structure of Colloidal Particles By X-Ray (*Bestimmung der Grösse und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen*)," *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, vol. 1918, 1918.
- [18] A. Monshi, M. R. Foroughi, and M. R. Monshi, "Modified Scherrer Equation to Estimate More Accurately Nano-Crystallite Size Using XRD," *World Journal of Nano Science and Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 154–160, 2012, doi: 10.4236/wjnse.2012.23020.
- [19] M. T. Ulhakim, S. Sukarman, K. Khoirudin, N. Fazrin, T. Irfani, and A. Hakim, "Determining The Crystallite Size of TiO₂/EG-Water XRD Data Using the Scherrer Equation," *Indonesian Journal of Applied Physics*, vol. 14, no. 1, pp. 141–150, 2024, doi: 10.13057/ijap.v14i1.79195.
- [20] S. A. Disha, M. Sahadat Hossain, M. L. Habib, and S. Ahmed, "Calculation of Crystallite Sizes of Pure and Metals Doped Hydroxyapatite Engaging Scherrer Method, Halder-Wagner Method, Williamson-Hall Model, and Size-Strain Plot," *Results in Materials*, vol. 21, Article 100496, 2024, doi: 10.1016/j.rinma.2023.100496.
- [21] M. R. Jannat *et al.*, "Validity of Crystallite Size Determination Methods Based on XRD Peak Broadening in Pure and Metal-Doped Nickel Ferrites," *Results in Materials*, vol. 28, Article 100762, 2025, doi: 10.1016/j.rinma.2025.100762.
- [22] M. K. Alam, M. S. Hossain, N. M. Bahadur, and S. Ahmed, "A Comparative Study in Estimating of Crystallite Sizes of Synthesized and Natural Hydroxyapatites using Scherrer Method, Williamson-Hall model, Size-Strain Plot and Halder-Wagner Method," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1306, Article 137820, 2024, doi: 10.1016/j.molstruc.2024.137820.
- [23] S. I. Yusuf, S. J. Mohammad, and M. H. Ali, "Scherrer and Williamson-Hall Estimated Particle Size Using XRD Analysis for Cast Aluminum Alloys," *Journal of Theoretical and Applied Physics*, vol. 18, Article 17, 2024, doi: 10.57647/j.jtap.2024.si-AICIS23.17.

- [24] M. Y. A. Mostafa, A. Mostafa, M. Abdel-Rahman, E. E. Assem, A. Ashour, and E. A. Badawi, "XRD Peak Broadening Modelling for Al-Alloys Characterization Compared with Rietveld Profile Analysis," *Materials Today: Proceedings*, vol. 120, pp. 89–04, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.252.
- [25] ASTM International, "ASTM 128/128M-19: Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese," 2003, doi: 10.1520/A0128_A0128M-19
- [26] J. I. Langford and A. J. C. Wilson, "Scherrer After Sixty Years: A Survey and Some New Results in The Determination of Crystallite Size," *Journal of Applied Crystallography*, vol. 11, no. 2, pp. 102–113, 1978, doi: 10.1107/s0021889878012844.
- [27] A. Leineweber, "Understanding Anisotropic Microstrain Broadening in Rietveld Refinement," *Zeitschrift fur Kristallographie*, vol. 226, no. 12, pp. 905–923, 2011, doi: 10.1524/zkri.2011.1413.
- [28] A. Leineweber and E. J. Mittemeijer, "Notes on The Order-of-Reflection Dependence of Microstrain Broadening," *Journal of Applied Crystallography*, vol. 43, no. 5, pp. 981–989, 2010, doi: 10.1107/S0021889810030451.
- [29] G. K. Williamson and W. H. Hall, "X-Ray Line Broadening from Filed Aluminium and Wolfram," *Acta Metallurgica*, vol. 1, no. 1, pp. 23–31, 1953, doi: 10.1016/0001-6160(53)90006-6.
- [30] K. Nakagawa *et al.*, "Characterization of Dislocation Rearrangement in FCC Metals during Work Hardening using X-Ray Diffraction Line-Profile Analysis," *Quantum Beam Science*, vol. 4, no. 4, Article 36, 2020, doi: 10.3390/qubs4040036.
- [31] H. Jagodzinski, H. P. Klug und L. E. Alexander "X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials", 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York-Sydney-Toronto 1974
- [32] E. G. Astafurova, M. S. Tukeeva, G. G. Maier, E. V. Melnikov, and H. J. Maier, "Microstructure and Mechanical Response of Single-Crystalline High-Manganese Austenitic Steels Under High-Pressure Torsion: The Effect of Stacking-Fault Energy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 604, pp. 166–175, 2014, doi: 10.1016/j.msea.2014.03.029.
- [33] A. Russakova, A. Zhilkashinova, D. Alontseva, M. Abilev, A. Khozhanov, and A. Zhilkashinova, "Effect of the Dislocation Substructure Parameters of Hadfield Steel on Its Strain Hardening," *Materials*, vol. 16, no. 4, Article 1717, 2023, doi: 10.3390/ma16041717.
- [34] C. Chen, B. Lv, X. Feng, F. Zhang, and H. Beladi, "Strain Hardening and Nanocrystallization Behaviors in Hadfield Steel Subjected to Surface Severe Plastic Deformation," *Materials Science and Engineering A*, vol. 729, pp.178–184, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.05.059.
- [35] G. Tressia and A. Sinatora, "Effect of The Normal Load on The Sliding Wear Behavior of Hadfield Steels," *Wear*, vol. 520–521, Article 204657, 2023, doi: 10.1016/j.wear.2023.204657.