

Menentukan Nilai Energi Stacking Fault Paduan Baja Mangan Fe-Mn-C-Cr Menggunakan Persamaan Termodinamika

Haris Wahyudi^{a,*}, Swandya Eka Pratiwi^a, Sagir Alva^a, Subekti^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana

Jl. Meruya Selatan No. 1, Meruya Selatan, Kec. Kembangan, Jakarta Barat

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

Abstract

Plastic deformation in austenitic steel occurs through one of three deformation mechanisms, namely deformation-induced martensitic transformation, dislocation, and twinning. The plasticity behavior of alloy steel is closely related to the Stacking Fault Energy (SFE) of the austenite phase. The SFE value can be directly measured using Transmission Electron Microscopy (TEM). However, the TEM method requires long procedures, is expensive, and not easily accessible. Therefore, calculations based on thermodynamic models are considered an alternative approach to estimate the SFE in Fe-Mn-Si and Fe-Mn-C steels. The purpose of this study is to obtain the SFE value based on the thermodynamic equation for Fe-Mn-C-Cr manganese steel alloys. The method used is a literature study to obtain the parameters of each element in manganese steel, including Fe, Mn, C, Cr, and Si. The SFE value obtained from the thermodynamic equation is compared with empirical equations proposed by several researchers. In addition, the calculated SFE values are compared with experimental data available in the literature, such as TEM and XRD analysis. The SFE value obtained from the thermodynamic equation is 24 ± 10 mJ/m². The empirical equations give a wide range of values, from a minimum of 46.77 mJ/m² to a maximum of 510.16 mJ/m². The SFE value calculated using the thermodynamic equation is close to the value reported in the literature, which is 21 mJ/m². These results demonstrate that calculating SFE using thermodynamic equations provides a more accurate estimation by considering the contributions of the constituent elements.

Keywords: stacking fault energy (SFE); manganese steel, twinning, Gibbs free energy, thermodynamic equation

Abstrak

Deformasi plastis pada baja austenitik terjadi melalui salah satu dari tiga mekanisme deformasi, yaitu transformasi martensitik terinduksi deformasi, dislokasi, dan *twinning*. Perilaku plastisitas baja paduan berkaitan erat dengan *Stacking Fault Energy* (SFE) pada fasa austenit. Nilai SFE dapat dihitung secara langsung menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM). Akan tetapi, metode TEM memerlukan tahapan yang panjang, biaya tinggi, dan sulit dilakukan. Oleh karena itu, perhitungan berbasis model termodinamika menjadi alternatif untuk menentukan nilai SFE pada baja Fe-Mn-Si dan Fe-Mn-C. Tujuan penelitian ini adalah memperoleh nilai SFE berdasarkan persamaan termodinamika pada paduan baja mangan Fe-Mn-C-Cr. Metode yang digunakan adalah studi literatur untuk mendapatkan parameter dari setiap unsur penyusun baja mangan, yaitu Fe, Mn, C, Cr, dan Si. Nilai SFE hasil perhitungan persamaan termodinamika dibandingkan dengan persamaan empiris yang telah diusulkan oleh beberapa peneliti. Selain itu, nilai SFE juga dibandingkan dengan data eksperimen yang dilaporkan dalam literatur, seperti hasil TEM dan XRD. Nilai SFE dari perhitungan persamaan termodinamika diperoleh sebesar 24 ± 10 mJ/m². Nilai SFE dari perhitungan persamaan empiris menunjukkan rentang yang bervariasi, dengan nilai terkecil 46,77 mJ/m² dan terbesar 510,16 mJ/m². Nilai SFE hasil perhitungan persamaan termodinamika mendekati nilai yang dilaporkan dalam literatur, yaitu 21 mJ/m². Hasil ini menunjukkan bahwa perhitungan SFE menggunakan persamaan termodinamika lebih akurat karena mempertimbangkan kontribusi unsur-unsur penyusunnya.

Kata kunci: energi *stacking fault* (SFE); baja mangan; *twinning*; energi bebas Gibbs, persamaan termodinamika

1. PENDAHULUAN

Kajian tentang *high work hardening* pada baja Mangan menjadi topik yang cukup menarik dan relevan, meskipun telah banyak publikasi yang dihasilkan. Baja Hadfield dengan kandungan unsur Mn tinggi menghasilkan nilai *Stacking Fault Energy* (SFE) rendah sehingga fenomena *twin* lebih dominan. Baja Hadfield adalah salah satu contoh baja Mangan dengan kandungan unsur Mn tinggi, 11-14% [1,2]. Metode untuk mendapatkan nilai SFE dapat dilakukan secara teori dan empiris. *Stacking fault* adalah salah satu cacat dua dimensi yang sangat penting karena *stacking fault* berkaitan dengan

banyak fenomena, misalnya sifat mekanik, presipitasi, transformasi martensit, ketahanan korosi dan lain-lain. Banyak penelitian telah dilakukan untuk menentukannya secara eksperimental. Salah satu penelitian diulas oleh Gallagher [3], yaitu ada perbedaan besar yang bahkan pada logam murni antara nilai SFE yang diukur menggunakan metode berbeda.

Sejauh ini, ada 5 metode utama untuk menentukan SFE, yaitu 1) pengukuran dengan mikroskop transmisi elektron (TEM) [4,5]; 2) perhitungan dengan ab-initio [6,7]; 3) *embedded-atom method* (EAM) [8–10]; 4) persamaan termodinamika [11–17]; dan 5) analisis XRD [18–21]. *Stacking fault energy* umumnya ditentukan menggunakan analisis TEM dengan mengukur dislokasi parsial yang dipisahkan oleh pita *stacking fault*. Akan tetapi, metode ini relatif mahal dan prosedurnya relatif sulit. Perhitungan ab-initio lebih cocok untuk menghitung SFE baja tahan karat Fe-Cr-Ni, dan EAM menghitung SFE logam murni. Untuk baja Fe-Mn-Si, sulit untuk mengukur SFE-nya dengan TEM karena SFE-nya sangat rendah sehingga dislokasi yang diperpanjang hampir tidak dapat dibatasi. Selain itu, metode TEM perlu tahapan panjang, mahal, dan tidak mudah. Oleh karena itu, perhitungan berdasarkan model termodinamika yang diusulkan oleh Olson dan Cohen [22] telah banyak digunakan untuk menghitung SFE pada baja Fe-Mn-Si dan Fe-Mn-C [11,14,23]. Tujuan penelitian ini adalah menghitung nilai SFE menggunakan persamaan termodinamika, analisis perbandingan hasil perhitungan SFE berdasarkan persamaan termodinamika dan empiris.

Pada penelitian ini, nilai *stacking fault energy* akan ditentukan berdasarkan persamaan termodinamika sebagai fungsi dari komposisi paduan. Metode persamaan termodinamika untuk menentukan nilai SFE ada beberapa contoh yang sudah diteliti. Akan tetapi, metode termodinamika digunakan bergantung kepada komposisi paduan baja dan fasanya. Baja mangan tinggi Fe-Mn-C yang digunakan juga mengandung unsur Cr relatif tinggi yang tidak biasa digunakan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan memberikan informasi nilai SFE paduan baja Mangan Fe-Mn-C dan Cr. Atom-atom yang tidak mengikuti pola formasi susunan (*stacking fault*), misalnya pada austenit (γ) yaitu ABC ABC, akan meningkatkan energi kisi karena terjadi ketidakseimbangan struktur. Energi tiap satuan luas untuk kondisi *stacking fault* dikenal dengan *Stacking Fault Energy* (SFE). SFE dianggap sebagai cacat bidang (*planar defect*) [24,25] atau cacat volume (*volumetric defect*) [22,26]. Nilai SFE (satuan J/m²) berpengaruh terhadap mekanisme deformasi struktur austenit.

Baja Hadfield dengan kandungan unsur Mn tinggi menghasilkan nilai *stacking fault energy* (SFE) rendah sehingga fenomena *twin* lebih dominan [27]. Karena SFE rendah, energi yang diperlukan untuk mekanikal *twinning* juga rendah sehingga jumlah (pembentukan) *twinning* meningkat. Pada proses *work hardening*, distribusi *twinning* yang banyak menghambat pergerakan dislokasi sehingga kekuatan meningkat. Penambahan unsur lain seperti Al dan Si pada baja Hadfield menaikkan SFE tapi fenomena *twin* berkurang sehingga deformasi plastis cenderung karena mekanisme slip [15].

Terdapat tiga kelompok nilai SFE berbeda yang mengakibatkan mekanisme deformasi plastis pada baja austenit:

- SFE ≤ 20 mJ/m²: mekanisme deformasi plastis melalui transformasi $\gamma \rightarrow \epsilon$ (TRIP) dominan terjadi [28,29].
- $20 < \text{SFE} \leq 40$ mJ/m²: mekanisme TWIP dominan terjadi [29–32].
- SFE > 40 mJ/m²: mekanisme *glide* dislokasi dominan [11,33–38].

Untuk mendapatkan nilai SFE, metode yang digunakan adalah persamaan termodinamika. Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan berbagai persamaan termodinamika sesuai kandungan bahan Mangan tinggi yang digunakan. Karena SFE rendah, energi yang diperlukan untuk mekanikal *twinning* juga rendah sehingga jumlah (pembentukan) *twinning* meningkat. Pada proses *work hardening*, distribusi *twinning* yang banyak menghambat pergerakan dislokasi sehingga kekuatan meningkat. Penambahan unsur lain seperti Al dan Si pada baja Hadfield menaikkan SFE tapi fenomena *twin* berkurang sehingga deformasi plastis cenderung karena mekanisme slip [15]. Hubungan antara nilai SFE dan mekanisme deformasi pada baja austenit dirangkum seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan antara nilai SFE dan mekanisme deformasi

No	Nilai SFE	Mekanisme deformasi
1	< 20 mJ/m ²	TRIP, transformasi dominan $\gamma \rightarrow \epsilon$
2	$20 \text{ mJ/m}^2 - 40 \text{ mJ/m}^2$	TWIP, mekanisme <i>twinning</i> lebih dominan
3	> 40 mJ/m ²	Mekanisme dislokasi (<i>glide</i>) parsial atau seluruhnya lebih dominan

Perbandingan formula empiris juga dilakukan oleh beberapa peneliti berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan. Persamaan termodinamika untuk mendapatkan nilai SFE dapat ditulis dalam Persamaan 1 berikut [39]:

$$\text{SFE} = 2\rho(\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon} + E_{str}) + 2\sigma \quad (1)$$

dimana SFE adalah *stacking fault energy* (mJ/m²), ρ adalah kerapatan permukaan molar sepanjang bidang atom (111) (m⁻²), $\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon}$ adalah energi molar Gibbs untuk transformasi fasa γ (austenit) ke fasa ϵ (martensit) (J/mol), E_{str} adalah energi regangan elastis karena perbedaan volume spesifik antara fasa γ dan ϵ , σ adalah energi antarmuka γ/ϵ (mJ/m²). Nilai ρ adalah parameter lattice (a_0) fasa austenit (Persamaan 2) dan nilai $\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon}$ diperoleh dari Persamaan 3.

$$\rho = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{1}{a_0^2 N} \quad (2)$$

$$\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon} = \sum_i x_i \Delta G_i^{\gamma \rightarrow \epsilon} + \sum_{ij} x_i x_j \Delta \Omega_{ij}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + \Delta G_m^{\gamma \rightarrow \epsilon} + \Delta G_A^{\gamma \rightarrow \epsilon} \quad (3)$$

dimana:

- x = fraksi molar unsur paduan,
- $\Delta G_i^{\gamma \rightarrow \epsilon}$ = perubahan molar parsial energi bebas Gibbs fasa γ dan ϵ (J/mol),
- $\Delta \Omega_{ij}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$ = perubahan parameter interaksi termodinamika antar unsur dalam fasa γ dan ϵ . Penjumlahan bagian pertama dan kedua pada Persamaan 3 menghasilkan perubahan kimia energi bebas Gibbs antara fasa γ dan ϵ .
- $\Delta G_m^{\gamma \rightarrow \epsilon}$ = perubahan magnetik energi bebas Gibbs antara fasa γ dan ϵ .
- $\Delta G_A^{\gamma \rightarrow \epsilon}$ = kelebihan energi bebas karena faktor penghalusan ukuran butir pada fasa γ .

Beberapa peneliti mengusulkan persamaan empiris dalam menentukan nilai SFE baja Mangan berdasarkan unsur penyusunnya. Pada Persamaan 4 – 7 di bawah ini, simbol γ melambangkan nilai SFE sedangkan persen unsur dihitung berdasarkan persen berat (%wt).

a. Persamaan Pickering [40]

$$\gamma = 25,7 + 2 (\%Ni) + 410 (\%C) - 0,9 (\%Cr) - 77 (\%Ni) - 13 (\%Si) - 1,2 (\%Mn) \text{ (mJm}^{-2}\text{)} \quad (4)$$

b. Persamaan Schramm and Reed [19]

$$\gamma = 53 + 6,2\% Ni + 0,7\%Cr + 3,2\%Mn + 9,3\%Mn \text{ (mJm}^{-2}\text{)} \quad (5)$$

c. Persamaan Rhodes and Thompson [41]

$$\gamma = 1,2 + 1,4\%Ni + 0,6\%Cr + 17,7\%Mn - 44,7\%Si \text{ (mJm}^{-2}\text{)} \quad (6)$$

d. Persamaan Brofman and Ansell [42]

$$\gamma = 16,7 + 2,1\%Ni - 0,9\%Cr + 26\%C \text{ (mJm}^{-2}\text{)} \quad (7)$$

Persamaan empiris di atas diperoleh melalui pendekatan regresi linear yang diperoleh dari penentuan nilai SFE menggunakan analisis XRD atau TEM. Persamaan 5 dari Schramm and Reed [19] adalah persamaan hasil pendekatan regresi linear hubungan SFE dan komposisi unsur penyusunnya. Nilai SFE dari persamaan ini diperoleh melalui analisis XRD. Penentuan nilai SFE Persamaan 6 [41] dan Persamaan 7 [42] berdasarkan analisis TEM. Secara spesifik, nilai SFE Persamaan 6 menggunakan analisis TEM dengan teknik *weak beam dark field microscopy* [41].

2. MATERIAL DAN METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan berdasarkan studi literatur dan kemudian pengumpulan data nilai energi bebas Gibbs unsur penyusun paduan Mangan. Kajian pustaka dilakukan untuk mendapatkan teori transformasi Persamaan termodinamika dibuat berdasarkan teori transformasi austenit ke hcp sesuai dengan data energi bebas Gibbs. Nilai SFE bisa dihitung berdasarkan persamaan termodinamika energi bebas Gibbs dan magnetik untuk model *nucleation* $\gamma \rightarrow \epsilon$. Persamaan termodinamika ditulis berdasarkan informasi dari perubahan energi Gibbs, energi regangan elastis dan energi antarmuka. Persamaan termodinamika akan ditulis dalam Microsoft Excel untuk memudahkan perhitungan. Perbandingan nilai SFE persamaan termodinamika yang diperoleh akan dibandingkan dengan persamaan empiris dan hasil dari literatur dengan perubahan komposisi unsur.

Tabel 2. Komposisi paduan sampel baja Hadfield

No.	Unsur	Kandungan (%wt)
1	C	1,23
2	Mn	10,61
3	Cr	2.12
4	Si (<i>max</i>)	0,4
5	P (<i>max</i>)	0,035
6	Fe	<i>balance</i>

Sampel baja yang digunakan pada penelitian ini adalah baja Hadfield. Komposisi yang diperoleh dari pengujian OES (*Optical Emission Spectrometry*) diperoleh komposisi seperti Tabel 2. Kandungan unsur seperti tabel di atas bersesuaian dengan komposisi paduan baja Mangan tinggi ASTM kategori C [2] dengan kandungan Cr antara 1,5-2,5 %wt. Persen berat kandungan Fe setelah dikurangi semua unsur yang ada adalah 85,5 %wt.

Perhitungan SFE menggunakan persamaan termodinamika membutuhkan data yang diperoleh dari literatur seperti pada Tabel 3. Pada tabel tersebut nilai perubahan molar parsial energi bebas Gibbs fasa γ dan ϵ ($\Delta G_i^{\gamma \rightarrow \epsilon}$) adalah nilai

untuk masing-masing unsur yaitu Fe, Mn, Cr dan C. Sedangkan nilai perubahan parameter interaksi termodinamika antar unsur dalam fasa γ dan ϵ ($\Delta\Omega_{ij}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$) adalah interaksi antara atom Fe dengan Mn (FeMn), atom Fe dengan C (FeC) dan antara Fe dengan Cr (FeCr).

Tabel 3. Parameter perhitungan nilai SFE

Parameter	Nilai atau Formula (satuan)	Rujukan
$\Delta G_{Fe}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$	$-2243,38 + 4,309T$ (J/mol)	[43]
$\Delta G_{Mn}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$	$-1000,00 + 1,123T$ (J/mol)	[43]
$\Delta G_{Cr}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$	$1370 - 0,163 T$ (J/mol)	[43]
$\Delta G_C^{\gamma \rightarrow \epsilon}$	-24.619 (J/mol)	[44]
$\Omega G_{FeMn}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$	$-9135,5 + 15282,1X_{Mn}$ (J/mol)	[17]
$\Omega G_{FeC}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$	42500 (J/mol)	[45]
$\Omega G_{FeCr}^{\gamma \rightarrow \epsilon}$	2095 (J/mol)	[46,47]

Dalam menghitung nilai SFE paduung baja Hadfield sesuai Tabel 2, nilai persen berat (%wt) perlu dikonversi menjadi persen atom (%at) menggunakan Persamaan 8 di bawah ini.

$$\%at\ x = \frac{(\%wt\ x)/(at.wt.x)}{(\%wt\ x)/(at.wt.x) + (\%wt\ y)/(at.wt.y)} \quad (8)$$

x adalah unsur, %at adalah persen atom, %wt adalah persen berat unsur x , dan at.wt. adalah berat atom.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan nilai SFE dilakukan menggunakan persamaan termodinamika dan persamaan empiris yang diperoleh dari literatur. Software Microsoft Excel digunakan dalam perhitungan proses perhitungan.

a. Penentuan SFE melalui persamaan termodinamika

Persen berat (%wt) kandungan unsur seperti pada Tabel 2 kemudian dikonversi menjadi persen atom (%at) menggunakan Persamaan 8. Data berat atom masing-masing unsur diperlukan dalam konversi persen berat ke persen atom. Proses konversi menggunakan persamaan di bawah ini dan dengan bantuan Microsoft Excel diperoleh data seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konversi persen berat ke persen atom

Unsur	Fe	C	Mn	Cr	Si	P
Berat atom	55.845	12.011	54.938	51.996	28.085	30.974
%wt.	85.495	1.23	10.61	2.12	0.4	0.035
%at.	81.3	5.4	10.2	0.8	0.06	2.16

Berdasarkan komposisi unsur paduan pada Tabel 4, Persamaan 3 dapat ditulis ulang dengan memasukkan komponen persen atom untuk setiap unsur menjadi Persamaan 9 di bawah ini.

$$\Delta G^{\gamma \rightarrow \epsilon} = X_{Fe} \Delta G_{Fe}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_C \Delta G_C^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Mn} \Delta G_{Mn}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Cr} \Delta G_{Cr}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Si} \Delta G_{Si}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_P \Omega G_P^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Fe} X_C \Omega G_{FeC}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Fe} X_{Mn} \Omega G_{FeMn}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Fe} X_{Cr} \Omega G_{FeCr}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Fe} X_{Si} \Omega G_{FeSi}^{\gamma \rightarrow \epsilon} + X_{Fe} X_P \Omega G_{FeP}^{\gamma \rightarrow \epsilon} \quad (9)$$

Nilai perhitungan dilakukan di Microsoft Excel, dengan memasukkan nilai $\rho = 2,52 \times 10^{-9}$ J/cm² dan $\sigma = 10 \pm 5$ mJ/m² diperoleh nilai SFE adalah 24 ± 10 mJ/m².

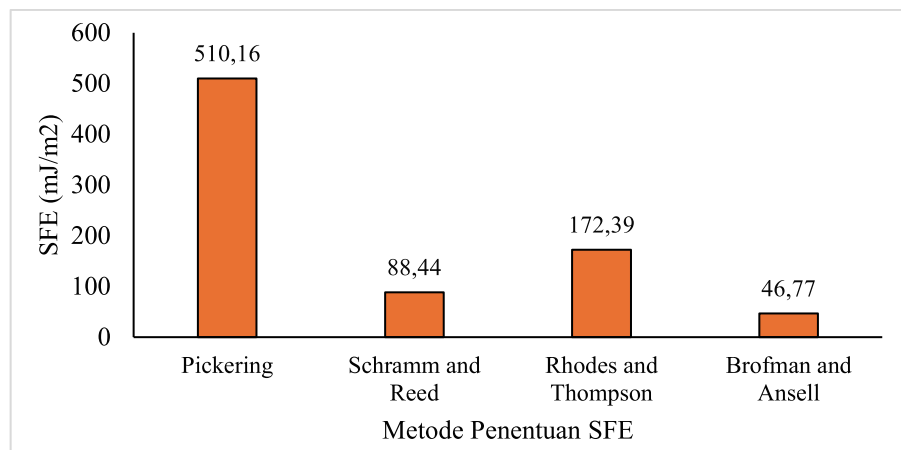
b. Penentuan SFE menggunakan persamaan teoritis dan empiris

Stacking Fault Energy (SFE) dihitung dari persamaan teoritis yang ada di dalam literatur. Persamaan teoritis yang diusulkan seperti Persamaan 4-6 ini dikembangkan oleh para peneliti yang berbeda berdasarkan beberapa asumsi yang

terkait dengan komposisi, elemen paduan dan kondisi termodinamika. Nilai SFE menggunakan persamaan empiris dirangkumkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai SFE menggunakan persamaan empiris

Metode	SFE (mJ/m ²)
Pickering	510,16
Schramm and Reed	88,44
Rhodes and Thompson	172,39
Brofman and Ansell	46,77



Gambar 1. Grafik nilai SFE menggunakan persamaan empiris

Nilai SFE pada Tabel 5 menunjukkan nilai yang bervariasi dengan nilai yang relatif besar, nilai terkecil 46,77 mJ/m² dan terbesar adalah 510,16 mJ/m². Jika dibandingkan dengan nilai pada Tabel 1, semua nilai lebih besar dari 40 mJ/m² yang mengindikasikan bahwa deformasi cenderung ke mekanisme dislokasi jika menerima beban plastis. Perbedaan nilai disebabkan karena persamaan empiris yang digunakan berdasarkan unsur penyusunnya dan tidak sama dengan komposisi baja mangan yang diteliti seperti pada Tabel 2 (C, Mn, Cr, Si, P, Fe). Pada persamaan 4, 6 dan 7 terdapat unsur Ni yang tidak ada pada baja mangan yang diteliti. Pada persamaan 5, terdapat dua unsur yang berbeda yaitu Ni dan Mo. Secara teori unsur penyusun baja mangan berpengaruh terhadap nilai energi *stacking fault* [15].

Nilai perhitungan menggunakan persamaan termodinamika dengan mempertimbangkan komposisi unsur penyusun diperoleh nilai SFE 24±10 mJ/m². Nilai ini berada di kategori kedua pada Tabel 1, yang mengindikasikan bahwa paduan baja dengan unsur penyusun tersebut, mekanisme deformasi yang diharapkan adalah *Twinning*. Nilai ini lebih dekat dengan nilai SFE di literatur untuk baja Hadfield yaitu 21 mJ/m² [19].

4. KESIMPULAN

Perhitungan nilai energi *stacking fault* dilakukan menggunakan persamaan termodinamika dengan parameter yang diperoleh dari hasil kajian literatur. Karakterisasi baja Mangan yang diteliti dilakukan menggunakan OES dengan komposisi persen berat (%wt) C 1,23; Mn 10,61; Cr 2,12; Si 0,4; P 0,035; dan Fe 85,61. Nilai SFE yang diperoleh dari perhitungan adalah 24±10 mJ/m², nilai minimum 14 mJ/m² dan nilai maksimum 34 mJ/m². Nilai tengah SFE yang diperoleh berada di kategori baja TWIP, artinya baja mangan yang diteliti punya potensi mekanisme deformasi *twinning* jika menerima beban plastis. Perbandingan nilai SFE menggunakan persamaan empiris menghasilkan nilai 510,16 mJ/m² metode Pickering, 88,44 mJ/m² metode Schramm and Reed, 172,39 mJ/m² metode Rhodes and Thompson, dan 46,77 mJ/m² Metode Brofman and Ansell. Hasil perhitungan persamaan empiris untuk baja yang diteliti menghasilkan nilai relatif besar. Hal ini disebabkan perbedaan unsur kimia penyusun baja mangan yaitu unsur Ni dan Mo. Nilai SFE hasil perhitungan persamaan termodinamika yaitu 24±10 mJ/m² mendekati nilai SFE yang diperoleh dari literatur yaitu 21 mJ/m². Hasil ini membuktikan bahwa perhitungan nilai SFE menggunakan persamaan termodinamika lebih akurat dengan mempertimbangkan unsur penyusunnya dibanding menggunakan persamaan empiris.

Daftar Pustaka

- [1] Weeks. J. D. 1888. Hadfield's Manganese Steel. *Science*, ns-12(306), 284–284. <https://doi.org/10.1126/science.ns-12.306.284>
- [2] ASTM International, A. 128M. (2003). *Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese*. www.astm.org.

- [3] Gallagher, P. C. J. 1970. The influence of alloying, temperature, and related effects on the stacking fault energy. *Metallurgical Transactions*, 1(9). <https://doi.org/10.1007/BF03038370>
- [4] Gavriljuk, V., Petrov, Y., & Shanina, B. 2006. Effect of nitrogen on the electron structure and stacking fault energy in austenitic steels. *Scripta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.05.025>
- [5] Stoltz, R. E., & Vander Sande, J. B. 1980. The effect of nitrogen on stacking fault energy of Fe-Ni-Cr-Mn steels. *Metallurgical Transactions A*, 11(6). <https://doi.org/10.1007/BF02654717>
- [6] Vitos, L., Nilsson, J. O., & Johansson, B. 2006. Alloying effects on the stacking fault energy in austenitic stainless steels from first-principles theory. *Acta Materialia*, 54(14). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.04.013>
- [7] Vitos, L., Korzhavyi, P. A., & Johansson, B. 2006. Evidence of large magnetostructural effects in austenitic stainless steels. *Physical Review Letters*, 96(11). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.117210>
- [8] Kim, Y. M., Shin, Y. H., & Lee, B. J. 2009. Modified embedded-atom method interatomic potentials for pure Mn and the Fe-Mn system. *Acta Materialia*, 57(2). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.09.031>
- [9] Daw, M. S., & Baskes, M. I. 1984. Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals. *Physical Review B*, 29(12). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.29.6443>
- [10] Foiles, S. M., Baskes, M. I., & Daw, M. S. 1986. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys. *Physical Review B*, 33(12). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.33.7983>
- [11] Allain, S., Chateau, J. P., Bouaziz, O., Migot, S., & Guelton, N. 2004. Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys. *Materials Science and Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.059>
- [12] Ferreira, P. J., & Müllner, P. 1998. A thermodynamic model for the stacking-fault energy. *Acta Materialia*, 46(13). [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00155-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00155-4)
- [13] Curtze, S., Kuokkala, V. T., Oikari, A., Talonen, J., & Hänninen, H. 2011. Thermodynamic modeling of the stacking fault energy of austenitic steels. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.037>
- [14] Nakano, J., & Jacques, P. J. 2010. Effects of the thermodynamic parameters of the hcp phase on the stacking fault energy calculations in the Fe-Mn and Fe-Mn-C systems. *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2010.02.001>
- [15] Dumay, A., Chateau, J. P., Allain, S., Migot, S., & Bouaziz, O. 2008. Influence of addition elements on the stacking-fault energy and mechanical properties of an austenitic Fe-Mn-C steel. *Materials Science and Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.170>
- [16] Lee, Y. K., & Choi, C. S. 2000. Driving force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation and stacking fault energy of γ in Fe-Mn binary system. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0271-3>
- [17] Saeed-Akbari, A., Imlau, J., Prah, U., & Bleck, W. 2009. Derivation and variation in composition-dependent stacking fault energy maps based on subregular solution model in high-manganese steels. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0050-8>
- [18] Reed, R. P., & Schramm, R. E. 1974. Relationship between stacking-fault energy and x-ray measurements of stacking-fault probability and microstrain. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/1.1663122>
- [19] Schramm, R. E., & Reed, R. P. 1975. Stacking fault energies of seven commercial austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions A*. <https://doi.org/10.1007/BF02641927>
- [20] Rafaja, D., Krbetschek, C., Ullrich, C., & Martin, S. 2014. Stacking fault energy in austenitic steels determined by using in situ X-ray diffraction during bending. *Journal of Applied Crystallography*, 47(3). <https://doi.org/10.1107/S1600576714007109>
- [21] Ichikawa, R. U., Martinez, L. G., Imakuma, K., & Turrillas, X. (2014). *Development of a methodology for the application of the Warren-Averbach method*. <https://doi.org/10.5151/phypro-ecfa-049>
- [22] Olson, G. B., & Cohen, M. 1976. A general mechanism of martensitic nucleation: Part I. General concepts and the FCC $\rightarrow$ HCP transformation. *Metallurgical Transactions A*. <https://doi.org/10.1007/BF02659822>
- [23] Nakano, J. 2013. A thermo-mechanical correlation with driving forces for hcp martensite and twin formations in the Fe-Mn-C system exhibiting multicomposition sets. *Science and Technology of Advanced Materials*, 14(1). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/1/014207>
- [24] Dieter, G. E., 2011. Mechanical metallurgy. In *Mechanical metallurgy*. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.35895>
- [25] Takaki, S., Nakatsu, H., & Tokunaga, Y. 1993. Effects of austenite grain size on ϵ martensitic transformation in Fe-15mass%Mn alloy. *Materials Transactions, JIM*. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.34.489>
- [26] Brooks, J. W., Loretto, M. H., & Smallman, R. E. 1971. In situ observations of the formation of martensite in stainless steel. *Acta Metallurgica*. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90073-7)
- [27] Kibey, S., Liu, J. B., Johnson, D. D., & Sehitoglu, H. 2007. Predicting twinning stress in fcc metals: Linking twin-energy pathways to twin nucleation. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.08.042>
- [28] Sato, K., Ichinose, M., Hirotsu, Y., & Inoue, Y. 1989. Effects of Deformation Induced Phase Transformation and Twinning on the Mechanical Properties of Austenitic Fe-Mn-Al Alloys. *Isij International*. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.29.868>

- [29] Grässel, O., Frommeyer, G., Derder, C., & Hofmann, H. 1997. Phase transformations and mechanical properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-steels. *Journal De Physique. IV : JP*. <https://doi.org/10.1051/jp4:1997560>
- [30] Vercammen, S., Blanpain, B., De Cooman, B. C., & Wollants, P. 2004. Cold rolling behaviour of an austenitic Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP-steel: The importance of deformation twinning. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.12.040>
- [31] Remy, L., & Pineau, A. 1977. Twinning and strain-induced F.C.C. → H.C.P. transformation in the FeMnCrC system. *Materials Science and Engineering*. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(77\)90093-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(77)90093-3)
- [32] Lee, T. H., Shin, E., Oh, C. S., Ha, H. Y., & Kim, S. J. 2010. Correlation between stacking fault energy and deformation microstructure in high-interstitial-alloyed austenitic steels. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.01.056>
- [33] Yoo, J. D., & Park, K. T. 2008. Microband-induced plasticity in a high Mn-Al-C light steel. *Materials Science and Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.042>
- [34] Gutierrez-Urrutia, I., & Raabe, D. 2012. Multistage strain hardening through dislocation substructure and twinning in a high strength and ductile weight-reduced Fe-Mn-Al-C steel. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.07.018>
- [35] Yoo, J. D., Hwang, S. W., & Park, K. T. 2009. Origin of extended tensile ductility of a Fe-28Mn-10Al-1C steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9862-9>
- [36] Shen, Y. F., Li, X. X., Sun, X., Wang, Y. D., & Zuo, L. 2012. Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.080>
- [37] De Cooman, B. C., Estrin, Y., & Kim, S. K. 2018. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels. In *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.046>
- [38] Lu, J., Hultman, L., Holmström, E., Antonsson, K. H., Grehk, M., Li, W., Vitos, L., & Golpayegani, A. 2016. Stacking fault energies in austenitic stainless steels. *Acta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.042>
- [39] Hirth, J. P. 1970. Thermodynamics of stacking faults. *Metallurgical Transactions*, 1(9). <https://doi.org/10.1007/BF03038365>
- [40] Kumar, D. 2015. Design of High Manganese Steels: Calculation of SFE and Ms Temperature. In *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015 Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1002/9781119223399.ch107>
- [41] Rhodes, C. G., & Thompson, A. W. 1977. The composition dependence of stacking fault energy in austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions A*, 8(12). <https://doi.org/10.1007/bf02646563>
- [42] Brofman, P. J., & Ansell, G. S. 1978. On the Effect of Carbon on the Stacking Fault Energy of Austenitic Stainless Steels. *Metallurgical Transactions A*, 9(6). <https://doi.org/10.1007/BF02649799>
- [43] Ishida, K. 1976. Direct estimation of stacking fault energy by thermodynamic analysis. *Physica Status Solidi (a)*. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210360233>
- [44] Yang, W. S., & Wan, C. M. 1990. The influence of aluminium content to the stacking fault energy in Fe-Mn-Al-C alloy system. *Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/BF01045392>
- [45] Ishida, K., & Nishizawa, T. 1974. EFFECT OF ALLOYING ELEMENTS ON STABILITY OF EPSILON IRON. *Trans Jap Inst Met*. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.15.225>
- [46] Breedis, J. F., & Kaufman, L. 1971. The formation of Hcp and Bcc phases in austenitic iron alloys. *Metallurgical Transactions*. <https://doi.org/10.1007/BF02814874>
- [47] Yakubtsov, I. A., Ariapour, A., & Perovic, D. D. 1999. Effect of nitrogen on stacking fault energy of f.c.c. iron-based alloys. *Acta Materialia*, 47(4). [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00419-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00419-4)