

# Pengembangan Indentation Size Effect (ISE) Dalam Penentuan Koefisien Pengerasan Regang Baja

I Nyoman Budiarsa<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Udayana  
Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80361  
Email: nyoman.budiarsa@me.unud.ac.id

## Abstrak

Hubungan antara sifat material konstitutif dengan indentasi kekerasan (Hardness Indentation) termasuk ISE (Indentation Size Effect) telah dikembangkan dan dievaluasi dengan indentasi Vickers, hal ini akan menjadi alat yang berguna dalam mengevaluasi kelayakan penggunaan nilai kekerasan dalam memprediksi parameter bahan konstitutif dengan mengacu pada syarat akurasi pada rentang semua potensi bahan. ISE dapat konsisten diukur dan dapat berpotensi dihubungkan dengan H/E rasio. Skala ISE dari sampel yang diuji menunjukkan pengulangan yang konsisten dan berhubungan kuat dengan sifat material secara signifikan. Hal ini berpotensi memberikan set data eksperimen yang mencerminkan sifat material yang terkait dengan ketegangan gradien dan kerapatan dislokasi selama proses indentasi. Konsep untuk menggunakan data ukuran indentasi Vickers telah dikembangkan untuk meningkatkan akurasi sifat invers pemodelan berdasarkan kekerasan menggunakan baja sebagai sistem bahan. Penelitian ini menunjukkan bahwa ada ISE signifikan dalam tes kekerasan Vickers dimana skala dan reliabilitas ISE dianalisis dengan fitting data mengikuti Power law and proportional resistance model. Sebuah konsep baru menggunakan data ISE untuk memperkirakan Koefisien Pengerasan Regang ( $n$ ) nilai-nilai dari baja telah dievaluasi dan menunjukkan hasil yang baik untuk mempersempit kisaran sifat material yang diprediksi berdasarkan nilai-nilai kekerasan.

**Kata kunci:** ISE, H/E rasio, Koefisien Pengerasan Regang ( $n$ )

## Abstract

The relationship between the constitutive material properties with Hardness indentation including ISE (indentation Size Effect) has been developed and evaluated by Vickers indentation. This provided a useful tool in evaluating the feasibility of using of hardness value in predicting the constitutive material parameters with reference to the terms of accuracy in the all the potential materials range. ISE can be consistently measured and may potentially be associated with H/E ratio. ISE scale of the samples tested showed consistent repeatability and strongly associated with material properties significantly. This case has the potential to provide experimental data set that reflects the material properties associated with Strain gradient and dislocation density during the indentation process. The concept for using Vickers indentation size data have been developed to improve the accuracy of inverse modeling based of hardness using steel as a material system. This study shows that there are significant ISE in which the Vickers hardness test scale and reliability of ISE analyzed by fitting data following the Power Law and Proportional Resistance Model. A new concept of using ISE data for estimating the Strain hardening exponent ( $n$ ) values of steel has been evaluated and shown reasonable results for narrowing the range of predicted material properties based on hardness values

**Keywords:** ISE, H/E ratio, Strain hardening exponent ( $n$ )

## 1. PENDAHULUAN

Pengukuran nilai kekerasan bahan (*Hardness value*) didasarkan pada perlawanan material ketika sebuah deformasi lokal terjadi pada permukaan solid. Dalam indentasi, bila sebuah indenter ditekan ke permukaan spesimen, maka ukuran indentasi permanen terbentuk dan dapat diukur untuk mewakili resistensi indentasi (yaitu kekerasan material). Secara teoritis, nilai kekerasan bahan akan tetap, meskipun beban yang diterapkan berbeda, akan tetapi sebagaimana dalam beberapa kasus, nilai kekerasan bahan ditemukan tergantung pada beban yang diterapkan pada bahan. Hal ini didefinisikan sebagai *indentation size effect* (ISE) [1]. Secara umum fenomena ISE terlihat dimana nilai kekerasan bahan akan meningkat sebanding dengan penurunan pembebanan yang diterapkan (yaitu semakin kecil ukuran indentasi). Terdapat pula tipe ISE yang lain yang disebut ISE terbalik (*reverse ISE*) [2] di mana nilai kekerasan bahan menurun dengan beban yang diterapkan lebih rendah. Studi tentang pengaruh ukuran indentasi (*indentation size effect*) dikenal dengan terjadinya peningkatan nilai kekerasan (*hardness value*) dengan meningkatnya ukuran indentasi, terutama pada kedalaman tertentu (*micro hardness depth regime*) [3] ISE sampai saat ini masih menjadi subjek

---

\* Penulis korespondensi, tlp: 6281999600303  
Email: nyoman.budiarsa@me.unud.ac.id

penelitian penting, yang telah dikaitkan dengan sebuah jumlah fenomena dan mekanisme, termasuk *elastic recovery*, pengerasan kerja selama indentasi dan gradien regangan yang berkaitan dengan dislokasi [4]. Skala ISE ditemukan memiliki korelasi pada bahan dengan sifat yang berbeda: seperti modul elastis, kerapatan dislokasi, dll [5,6] Tujuan lain dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi ISE khususnya dari indentasi Vickers, yang berpotensi dapat menyediakan data terukur tambahan untuk meningkatkan kekokohan evaluasi terbalik (*inverse*) pada parameter material.

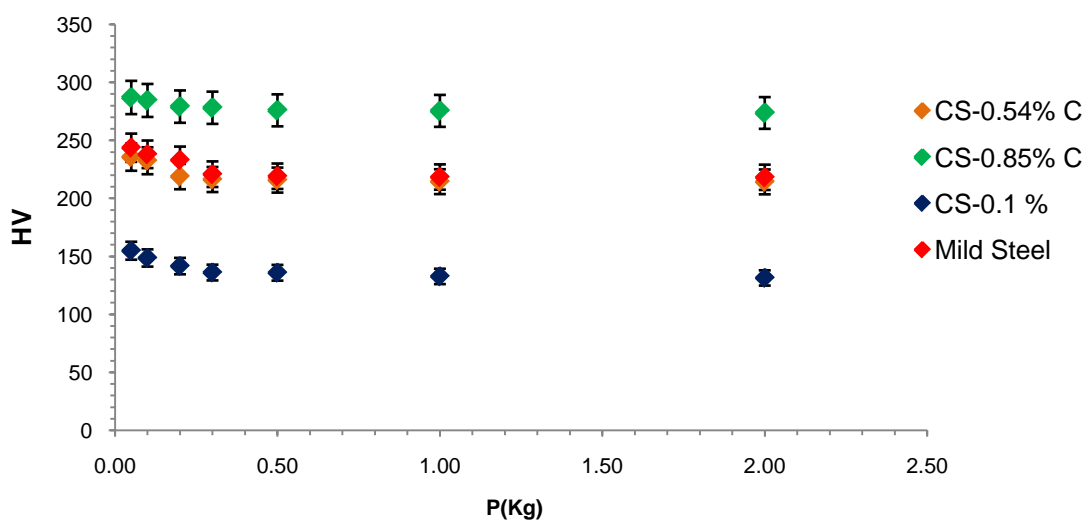
## 2. METODE

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon dengan berbagai komposisi kandungan karbon (0.10% C, 0.54% C, 0.85% C dan Mild Steel). Komposisi kimia sampel bahan seperti tercantum dalam tabel 1.

Tabel 1 Komposisi dan kondisi sampel bahan (CS-0.10% C, CS-0.54% C, dan CS-0.85% C)

Material	Condition	Element Composition (%)					
		C	Mn	P	S	Si	Ni
Carbon Steel (CS) 0.10% C	Normalized at 900°	0.1	0.5	<0.04	<0.05	0.1	0.01
Carbon Steel (CS) 0.54% C	Normalized at 840°	0.54	0.9	0.055	0.014	0.19	0.014
Carbon Steel (CS) 0.85% C	Normalized at 830°	0.85	0.9	0.04	0.04	0.35	0.015
Mild Steel	N/A	0.3	0.3	0.05	0.05	0.122	490 ppm

Bahan sampel yang digunakan adalah baja karbon dengan kandungan karbon 0.10% C, 0.54% C dan 0.85% C. Sampel yang digunakan adalah baja padat berbentuk batang elips diameter  $\Phi$  5 mm dan panjang 90 mm memiliki dudukan di tepi. Dua bahan utama yang digunakan dalam penelitian *indentation size effect* (ISE) dalam penentuan koefisien pengerasan regang baja ini sebagai (0.1% C Steel) dan Mild Steel. Tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) diidentifikasi untuk baja karbon 0.1%C adalah 308,03 MPa, koefisien pengerasan kerja (n) adalah 0,07; Tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) untuk Mild steel adalah 601,66 MPa, koefisien pengerasan kerja (n) adalah 0,025.



Gambar 1 Data Kekerasan Vickers untuk specimen dengan variasi beban (unit Hv: kg/mm<sup>2</sup>)

Kurva tegangan-regangan dan data sifat bahan yang akan digunakan sebagai masukan untuk model FE dan evaluasi akurasi kurva P-h berdasarkan dan sifat invers kekerasan material. Sedangkan pada uji Kekerasan (Hardness), pengujiannya dilakukan menggunakan Vickers hardness tester. Sampel disiapkan dimulai dengan disk  $\Phi 5$  mm, sampel disajikan dalam arah lateral (*Lateral direction*) dan arah panjang (*Long section*). Spesimen uji kekerasan diletakkan dalam dudukan kemudian dilakukan mounting menggunakan resin thermosetting (*bakelite*) pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan Vickers. Gambar 1 memperlihatkan tipikal hasil pengujian kekerasan Vickers dalam rangka untuk mengetahui pengaruh variasi beban terhadap indentasi. Dengan menggunakan Bar error 5%, yang merupakan batas potensi kesalahan pengukuran pada bahan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan Struers Duramin-1 Vickers hardness tester. Duramin-1 Struers Vickers hardness tester menggunakan metode beban langsung (*direct load method*) dengan variasi beban 490.3 mN sampai 19.61 N dengan indenter berbentuk piramida dengan dasar persegi dan sudut sisi berlawanan adalah  $136^\circ$ . Dari dua sampel utama yang diteliti yaitu 0.10% Carbon steel dan Mild Steel dengan bar error 5%, Diketahui kekerasan baja 0.1% C jauh lebih rendah dari pada nilai kekerasan sampel Mild Steel. Nilai-nilai kekerasan bahan (Hv) untuk baja 0.1% C adalah 98.368% dari nilai terukur; sedangkan dalam sampel Mild Steel, nilai kekerasan (Hv) adalah 98.611% dari nilai terukur.

Dalam Kedua kasus memperlihatkan adanya pengaruh ISE, namun tidak konklusif, tidak seperti konsep yang diterima secara umum. Dimana telah dibuktikan sebelumnya terdapat link dari ISE dengan H/E. Hal ini sangat kuat diperkirakan karena adanya hubungan gradient regangan dan dislokasi densitas selama proses indentasi berlangsung. Berdasarkan Strain Gradient Plasticity Model (MSG), hubungan antara ISE dan Non ISE dapat disajikan dengan persamaan berikut:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{1 + \frac{h^*}{h}}$$

Dimana H adalah nilai kekerasan (hardness value),  $H_0$  adalah macroscopic hardness, dan 'h' kedalaman indentasi (indentation depth), sedangkan  $h^*$  adalah panjang yang menjadi ciri ketergantungan kedalaman indentasi pada pengukuran kekerasan.

$$h^* = h * \left( \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 - 1 \right) \quad (2)$$

Dengan mendefinisikan Tegangan perwakilan (representative stress)  $\sigma_r$  dan regangan untuk deformasi bahan dibawah indenter tajam (Vickers indentation), representative stress  $\sigma_r$  dapat dijelaskan oleh persamaan Hollomon sebagai:

$$\sigma_r = K \epsilon_r^n \quad (3)$$

Dimana  $\epsilon_r$  adalah Representative strain, sedangkan (n) adalah Koefisien Pengerasan Regang

Karya Kim menunjukkan Hubungan Koefisien Pengerasan Regang (n) ditemukan persamaan berikut[7]:

$$n = -\frac{1}{2 \ln \epsilon_r} \ln \left( \frac{h^*}{b} \right) - \frac{1}{\ln \epsilon_r} \ln \left( \frac{K}{\mu} \right) + \frac{1}{\ln \epsilon_r} \ln \left( \frac{3}{\sqrt{2}} \alpha \cot \theta \right) \quad (4)$$

Di mana :

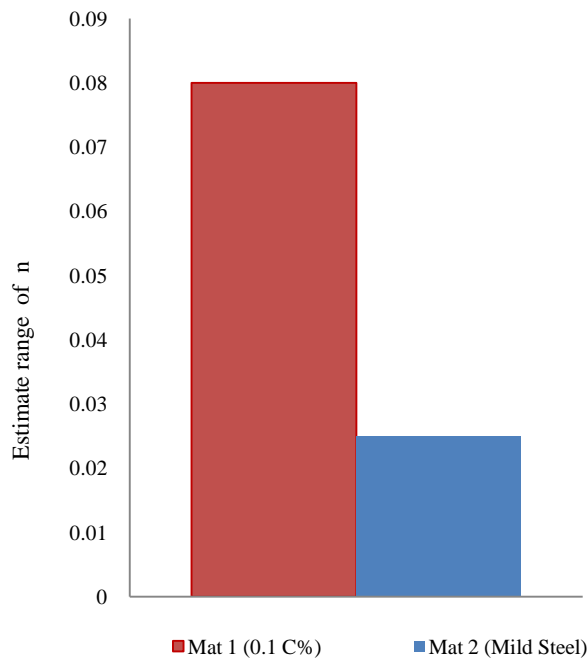
(n) : Koefisien Pengerasan Regang

b : Vektor Berger

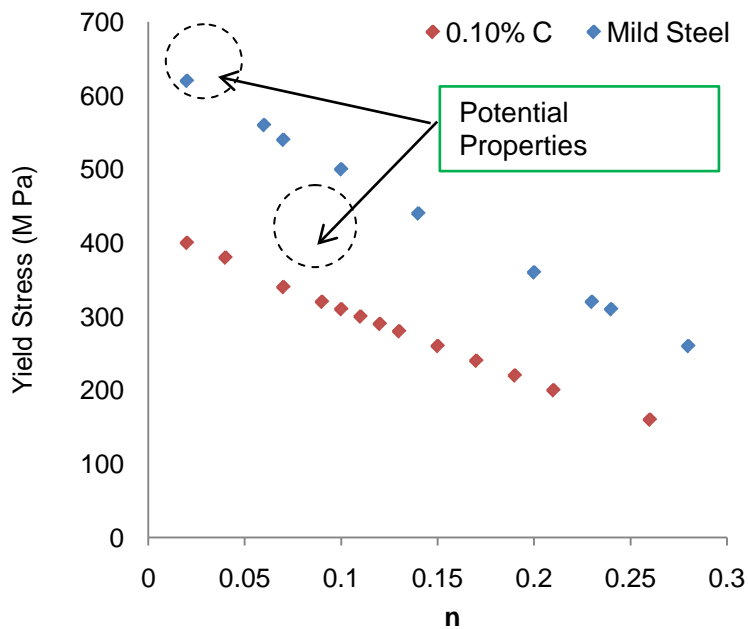
K : Konstanta strength

$\mu$  : Modulus geser,

$\alpha$  : Sudut kontak antara 0.3 - 0.6.



Gambar 2 Estimasi kisaran (*Estimated range*) untuk Koef. Pengerasan regang (n) 0.1%C dan Mild.Steel



Gambar 3 Proses penentuan potensi sifat material berdasarkan ISE pada dua material sampel yaitu 0.1% Carbon steel dan Mild steel

H\* dan h dapat diperkirakan dari nilai-nilai kekerasan pada beban yang berbeda. Dalam penelitian ini, h\* dapat diperkirakan dari impression size. Nilai K dapat dihitung dari kurva tegangan regangan dari bahan. Satu-satunya parameter yang belum diketahui adalah  $\alpha$ , yang diketahui antara 0.3-0.6. Dengan menggunakan kisaran ini, Koefisien pengerasan kerja dari dua bahan dapat

diestimasi. Pada gambar 2. menunjukkan kisaran Koefisien Pengerasan Regang berdasarkan ISE dari dua bahan yaitu 0.1%C dan Mild Steel.

Dalam penelitian ini ' $\alpha$ ' konstan berkisar antara 0.3-0.4, untuk nilai lebih tinggi dari 0.4 akan menghasilkan negative nilai ' $n$ ', yang secara fisik tidak mungkin. Dengan ini berbagai nilai ' $n$ ' bahan yang diprediksi, potensi rentangnya dapat dipersempit dalam tujuan menghasilkan keakuratan estimasi. Seperti yang diilustrasikan pada gambar 3. Tegangan luluh (yield strength) untuk Mild Steel ditemukan berada dalam 500-600 MPa dengan  $n$  dalam 0.08. ini jauh lebih menghasilkan keakuratan dari nilai-nilai pengukuran sebelumnya.

Bila ( $n$ ) adalah Koefisien Pengerasan Regang, dan  $b$  adalah Berger vektor (0.248), sedangkan  $\mu$  adalah modulus geser (untuk baja  $\mu = 79.3$  GPa),  $\epsilon_r$  adalah Representative Strain. Dimana diketahui sebelumnya [1] yaitu  $\epsilon_r = 0.029$ , panjang  $h^*$  dapat menentukan dari nilai-nilai kekerasan pada beban yang berbeda di mana  $H$  adalah kekerasan dan  $H_0$  kekerasan pada non-ISE. Kedalaman indentasi ( $h$ ) dapat diperkirakan dari ukuran indentasi. adalah konstanta dengan nilai 0.3-0.6. dan  $\theta$  adalah geometri indenter ( $\theta$  untuk Vickers indenter adalah  $68^\circ$ ).

Dengan input seperti tersebut diatas, maka parameter material,  $b$ ,  $K$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$ , dan  $\theta$  indenter geometri diketahui. Sehingga Koefisien Pengerasan Kerja ( $n$ ) dengan menggunakan persamaan (4) dapat ditentukan. Dengan menggunakan kisaran ini, pengerasan kerja dari dua bahandapat diperkirakan. Tegangan luluh (Yield strength) untuk Mild steel ditemukan berada dalam 500-600 MPa dengan  $n$  pada 0.025. dan tegangan luluh (Yield strength) untuk baja karbon 0.1% C ditemukan berada dalam 300-350 MPa dengan Koefisien Pengerasan Regang ( $n$ ) pada 0.07. Ini jauh lebih dekat dengan nilai-nilai yang sebenarnya diukur. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi konsep ini dan menentukan nilai yang tepat untuk  $\alpha$  konstan lebih kokoh, yang kemudian mengurangi rentang nilai  $n$  dan tegangan luluh (yield strength).

#### 4. SIMPULAN

Sebuah pendekatan baru untuk memprediksi P-h Indentasi dari sifat material konstitutif telah dikembangkan dan dievaluasi untuk Vickers Indentasi dengan menggabungkan analisis stres perwakilan (*Representative stress*) dan pemodelan *Finite Element* menggunakan baja sebagai model khas kelompok bahan yang telah terbukti menjadi alat yang berguna untuk memprediksi nilai kekerasan Vickers ( $H_v$ ) dari baja. Hasil penelitian menunjukkan untuk indenter tunggal (Vickers Indentasi) hasilnya tidak unik. Sebuah konsep baru untuk menggunakan data ukuran indentasi dari Vickers indentasi telah dieksplorasi untuk meningkatkan akurasi / kekokohan terbalik sifat pemodelan berdasarkan nilai kekerasan (Hardness value). Data kekerasan dengan banyak diterapkan berbeda dari baja dengan kondisi yang berbeda telah dievaluasi. Data menunjukkan bahwa kekerasan meningkat dengan menurunnya kadar karbon dalam baja. Sampel dengan Heat Treatment yang berbeda menunjukkan bahwa kekerasan menurun dengan anil dan suhu temper. Dalam semua kasus ada efek ukuran Indentasi (Indentation Size Effect) yang dikenal sebagai ISE secara nyata dan tingkat penurunan kekerasan dengan penerapan beban yang berbeda pada material. Sebuah konsep baru menggunakan data ISE untuk memperkirakan nilai  $n$  baja telah dieksplorasi dan menunjukkan hasil yang wajar untuk mempersempit kisaran sifat material yang diprediksi berdasarkan nilai-nilai kekerasan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Budiarsa.I N., Indentation Size Effect (ISE) of Vickers hardness in steels: correlation with H/E, Applied Mechanics and Materials Vol. 391 (2013) pp 23-28
- [2] Sangwal K., On the reverse indentation size effect and micro hardness measurement of solids, Materials Chemistry and Physics, 63, (2000) 145–152
- [3] Ebisu, T., Horibe, S., Analysis of the indentation size effect in brittle materials from nano indentation load-displacement curve. Journal of the European Ceramics Society 30, (2010) 2419-2426.
- [4] Huang, Y., Qu, S., Hwang, K.C., Li, M., Gao, H., A conventional theory of mechanism-based strain gradient plasticity. International Journal of Plasticity 20, (2004) 753–782.
- [5] Han, C., Gao, H., Huang Y., Nix,W.D., Mechanism-based strain gradient crystal plasticity-I. Theory. Journal of the Mechanics and Physics of solids 53, (2005) 1188–1203
- [6] Huang, Y., Gao, H., Nix, W.D., Hutchinson, J.W., Mechanism-based strain gradient plasticity–II. Analysis. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 48, (2000) 99–128.

- [7] Kim J. Y., Kang S. K., Greer J. R., Kwon D., Evaluating plastic flow properties by characterizing indentation size effect using a sharp indenter, *Acta Materialia* 56, (2008) 3338–3343