

## Potential Used Finite Element Indentation Modeling approach for Characterization strength and behavior Material in Non Standard Conditions

I Nyoman Budiarsa<sup>1\*</sup>, I Nyoman Gde Antara<sup>1</sup>, I Made Gatot Karohika<sup>1</sup>, I Wayan Widhiada<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana. Badung 80361 Bali

\*Corresponding author: [nyoman.budiarsa@unud.ac.id](mailto:nyoman.budiarsa@unud.ac.id)

**Abstract.** Elastic-plastic material parameters and material fracture parameters can be immediately determined when standard specimens are available, but for conditions of certain structural materials such as spot welded joints, standard testing does not apply to characterizing HAZ and nuggets due to complex structures and sizes small sample. In this study the relationship between constitutive material parameters ( $\sigma_y$  and  $n$ ) of elasto-plastic materials, P-h indentation curves and hardness with sharp indenters (Vickers) was systematically investigated by combining representative stress analysis and FE modeling using steel as a material system. Vickers and Spherical indentation FE models have been developed and validated. A new approach to predicting hardness values is developed based on 3D relationships between Hardness, yield stress ( $\sigma_y$ ) and strain hardening coefficient ( $n$ ). The proposed approach (ie predicting hardness value) has been successfully used to produce hardness values various material traits, which are then used to build relationships between hardness values and representative stress. This provides a useful tool for evaluating the feasibility of using hardness values in predicting parameters of constitutive materials by referring to accuracy and uniqueness by mapping through all potential material ranges.

**Abstrak.** Parameter bahan elastis-plastik dan parameter fraktur bahan dapat segera ditentukan saat Spesimen standar tersedia, namun untuk kondisi material dengan struktur tertentu seperti hasil sambungan las titik (spot welded joint) maka pengujian standar tidak berlaku untuk mengkarakterisasi HAZ dan nugget karena struktur yang kompleks dan ukuran sampel kecil. Dalam Penelitian ini, hubungan antara konstitutif parameter bahan ( $\sigma_y$  dan  $n$ ) dari bahan elasto-plastik, kurva indentasi P-h dan kekerasan dengan indenters tajam (Vickers) telah sistematis diselidiki dengan menggabungkan analisis tegangan representatif dan FE pemodelan menggunakan baja sebagai sistim bahan. Model FE indentasi Vickers dan Spherical telah dikembangkan dan divalidasi. Sebuah pendekatan baru untuk memprediksi nilai-nilai kekerasan dikembangkan berdasarkan hubungan 3D antara Hardness, yield stress ( $\sigma_y$ ) dan koefisien pengerasan regangan ( $n$ ). Pendekatan (yaitu memprediksi kekerasan) yang diusulkan telah berhasil digunakan untuk menghasilkan nilai-nilai kekerasan berbagai sifat material, yang kemudian digunakan untuk membangun hubungan antara nilai-nilai kekerasan dengan stress representatif. Ini menyediakan alat yang berguna untuk mengevaluasi kelayakan menggunakan nilai kekerasan dalam memprediksi parameter bahan konstitutif dengan mengacu pada akurasi dan keunikan oleh pemetaan melalui semua bahan potensial rentang.

**Kata kunci:** Yield stress ( $\sigma_y$ ), Koefisien pengerasan regangan ( $n$ ), HV, HRB.

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

### Pendahuluan

Evaluasi terhadap karakteristik material sering dikaitkan dengan penggunaan Indentasi sebagai metode pengujian bahan yang penting, yang dilakukan dengan menggunakan indentor tajam (Vickers, Berkovich) atau tumpul (Brinell, Rockwell). Nilai kekerasan bahan (Hardness value) didasarkan pada perlawanan material ketika sebuah deformasi lokal terjadi pada permukaan solid. Dalam indentasi, bila sebuah indentor ditekan ke permukaan spesimen, maka ukuran lekukan

permanen terbentuk dan dapat diukur untuk mewakili resistensi lekukan (yaitu kekerasan material). Perkembangan terbaru dalam dalam instrumentasi test indentasi untuk uji indentasi kontinyu respon perilaku material pada pengujian didasarkan oleh beban ( $P$ ) dan perpindahan ( $h$ ) pada kurva ( $p-h$ ) indentasi. Dalam proses indentasi, material mengalami deformasi yang kompleks membentuk zona deformasi mekanisme yang berbeda yang merupakan salah satu cara yang paling efektif untuk menganalisis indentasi[1]. Karya sebelumnya menunjukkan kekerasan yang

dapat berhubungan dengan tegangan representatif ( $\sigma$ ) [1], [2], sesuai dengan regangan representatif ( $\epsilon$ ) yang merupakan regangan plastik rata-rata yang dihasilkan pada indentasi. Konsep ditambah dengan pemodelan elemen hingga (FE) telah berhasil digunakan dalam menganalisis indenter tajam di mana regangan dan tegangan representatif didefinisikan dengan baik dengan menggunakan sudut indenter tetap [3], [4] Dalam kasus ini, hubungan yang dihasilkan antara parameter material dan kurva P-h akhirnya dapat digunakan untuk mengestimasi kekerasan dari parameter bahan. Perkembangan selanjutnya, banyak karya telah dieksplorasi dalam mencari cara untuk melakukan prediksi terbalik (inverse prediction) sifat material dari indentasi [3] Kebanyakan penelitian telah berfokus pada menggunakan kurva P-h penuh sementara hubungan antara kekerasan dan sifat bahan konstitutif sebagian besar didasarkan pada data empiris. Sebagai contoh untuk logam elasto-plastik, sebagian besar data properti dan nilai kekerasan telah tersedia terutama menggunakan kekuatan tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) dan kekuatan tarik utama ( $\sigma_t$ ) [5], karena sulit untuk mengukur kontribusi koefisien pengerasan regang ( $n$ ). Ini menjadi tidak ideal, karena justru koefisien pengerasan regang sangat diperlukan untuk situasi di mana model FE rinci diperlukan untuk menggambarkan parameter konstitutif dari material. Hubungan akhirnya dibangun antara sifat material, kurva indentasi dan nilai-nilai kekerasan yang akan menjadi alat yang berguna untuk menyelidiki kelayakan dari kedua parameter bahan konstitutif (yang diwakili oleh tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) dan koefisien pengerasan regang ( $n$ ) yang didasarkan dari nilai kekerasan (hardness value) yang diketahui. Serta membangun pemahaman yang lebih luas pada aplikasi masalah dalam prediksi terbalik (inverse prediction) sifat identifikasi. Kemampuan identifikasi semua calon set properti material yang mungkin yang sesuai dengan hasil pengujian juga akan membuka jalan bagi perbaikan di masa depan program prediksi terbalik (inverse prediction) dengan menggunakan data terukur tambahan..

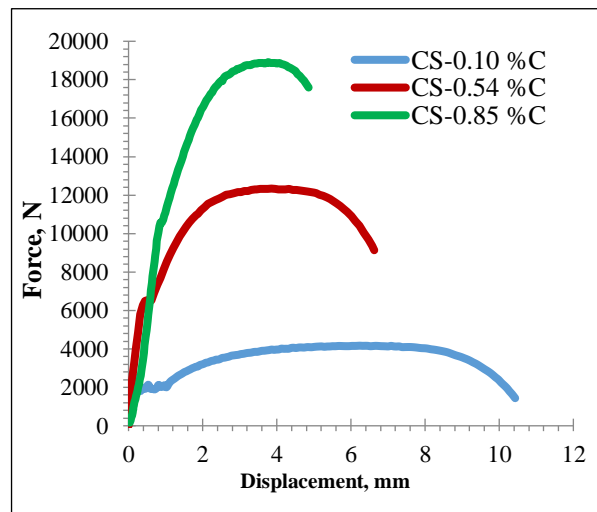
**Eksperimen**

Material yang digunakan dalam penelitian sifat plastik logam adalah baja karbon dengan berbagai komposisi kandungan karbon (baja karbon dengan kandungan karbon 0.10% C, 0.54% C dan 0.85% C). Komposisi kimia dari bahan yang tercantum dalam **Tabel 1**. Material baja karbon Padat berbentuk batang elips dari 5 mm dan 26.39 mm memiliki dudukan di tepi. Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan perangkat uji tarik.

**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)	Normalized at 900°	0.1	0.5	<0.04	<0.05	0.1	0.01
	0.10% C						
Carbon Steel (CS)	Normalized at 840°	0.54	0.9	0.055	0.014	0.19	0.014
	0.54% C						
Carbon Steel (CS)	Normalized at 830°	0.85	0.9	0.04	0.04	0.35	0.015
	0.85% C						

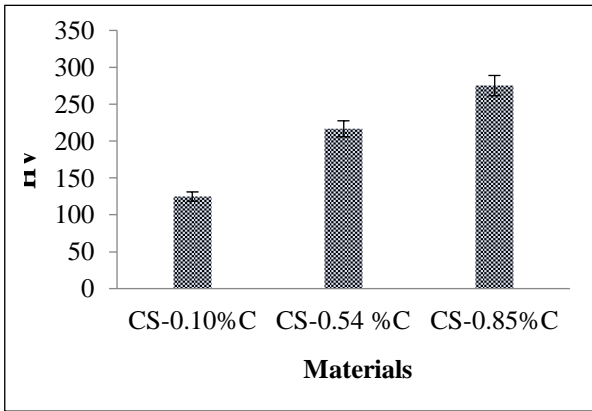
Melalui software Micro (P3) pada camcorder layar komputer dan strain Indicator serta perekam akan menampilkan proses dan hasil pengukuran uji tarik. Hasil pengujian tarik ditampilkan sebagai diagram Gaya (force) versus perpindahan(displacement) seperti **Gambar 1**. Sampel uji kekerasan disiapkan sebagai disk dengan diameter  $\phi$  5 mm, sampel yang disajikan dalam bentuk arah melintang (*transverse direction*) dan arah panjang (*length direction*). Spesimen dipersiapkan dalam resin menggunakan termoseting (Bakelite) dan dibersihkan (polishing) sebelum dilakukan pengujian kekerasan



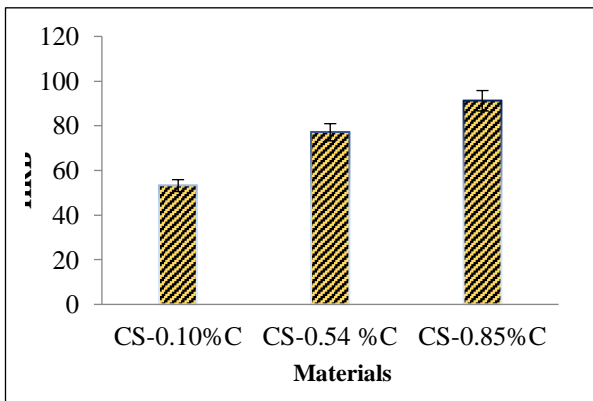
**Gambar 1.** Tipikal diagram Gaya (N) vs perpindahan (h) (mm) untuk baja karbon dengan berbagai komposisi kandungan karbon.

Uji kekerasan Vickers dilakukan dengan menggunakan Duramin-1 Struers hardness Vickers. menggunakan metode pembebanan langsung dengan berbagai beban dari 490.3 mN sampai 19.61N (0.05 ÷ 2 kgf). Indenter memiliki bentuk piramida yang tepat dengan dasar persegi dan sudut 136° antar sisi muka yang berlawanan. Sedangkan uji kekerasan Rockwell B dilakukan dengan menggunakan: Wilson Rockwell hardness tester. Indentasi menggunakan skala indenter bola B, dengan R= 0.79 mm (Diameter bola baja = 1/16 in), di bawah beban minor awal (Fm) = 10 kg dan

diikuti oleh beban mayor (FM ) = 100 kg. Nilai rata-rata untuk HV dan HRB untuk baja karbon dengan kandungan karbon 0.10% C, 0.54% C dan 0.85% C Dengan replikasi dan rentang kesalahan 5% seperti ditunjukkan pada Gambar 2, 3



**Gambar 2** Tipikal nilai rata-rata Kekerasan Vickers untuk baja karbon dengan kandungan karbon 0.01% C, 0.54% C dan 0.85% C dengan replikasi pengukuran dan rentang kesalahan 5%.

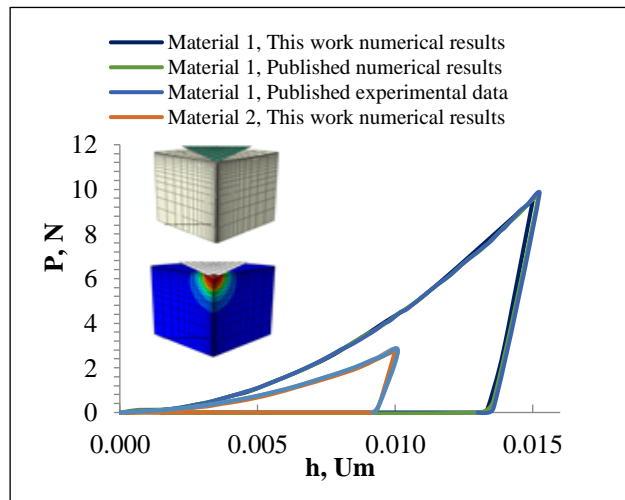


**Gambar 3.** Tipikal nilai rata-rata Kekerasan Rockwell B (HRB) untuk baja karbon dengan kandungan karbon 0.01% C, 0.54% C dan 0.85% C dengan replikasi pengukuran dan rentang kesalahan 5%.

### Model Numerik Indentasi Dual Indenter

Model elemen hingga indentasi Vickers dirancang dengan menggunakan piranti komersial ABAQUS. Dalam penelitian ini indenter Vickers disimulasikan berbentuk piramida dengan dasar persegi dan sudut 136° antara sisi muka yang berlawanan seperti **Gambar 4**. Hanya seperempat dari indenter dan bahan kolom disimulasikan karena bangun indenter memiliki bentuk geometri simetris (symmetric geometry). Ukuran sampel dibuat lebih dari 10 kali dibandingkan kedalaman indentasi maksimal, yang cukup besar untuk menghindari efek ukuran sampel atau efek batas [6] Bagian dasar model dipertahankan tetap untuk semua derajat kebebasan dan memiliki bentuk simetris tetap dalam arah y dan x. Jenis elemen

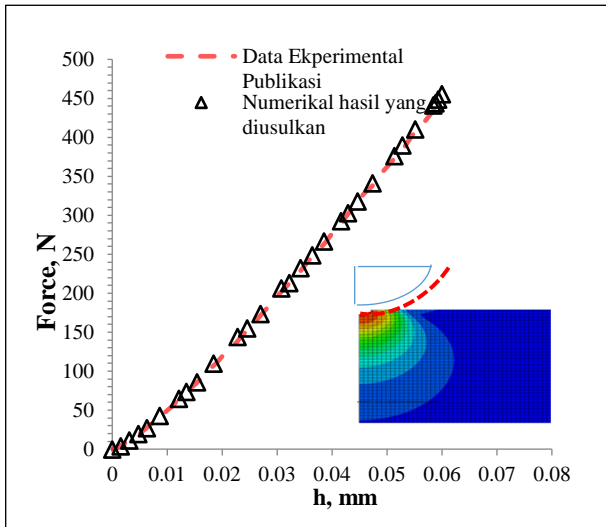
yang digunakan adalah C3D8R (reduced integration element used in stress/ displacement analysis). Kontak didefinisikan pada antar muka(interface) indenter dan spesimen dengan koefisien gesekan 0.2. Model FE (finite element) uji indentasi Vickers diverifikasi dengan membandingkan hasil numerik dari penelitian ini dengan beberapa model dari hasil eksperimen yang telah dipublikasikan. Hasil ditunjukkan pada **Gambar 4**. Bahan properti dalam model FE diadopsi dari data yang digunakan oleh [3], dan kemudian kurva P-h diprediksi dibandingkan dengan data numerik dan eksperimen yang telah dipublikasikan. Seperti terlihat pada kurva, untuk kedua bahan, hasil prediksi berhubungan sangat baik dengan data eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa model tersebut akurat dan valid.



**Gambar 4.** Tipikal Model Elemen Hingga indentasi Vickers dan kontak antar muka pada indentasi Vickers serta tipikal perbandingan hasil numerik dengan experimental data publikasi

Gambar 4. Menunjukkan model FE Indentasi bulat (spherical). Model 2-D simetris aksial digunakan untuk memodelkan keadaan simetri dari indenter bola. Indenter tersebut diasumsikan kaku (rigid) jauh lebih solid dibandingkan dengan bahan indenter indentasi. Elemen penyusunnya adalah simetris: CAX4R dan CAX3 (4-node bilinear asymmetric quadrilateral and 3-node linear asymmetric triangle element). Pergerakan indenter disimulasikan dengan menggosok busur kaku (rigid body) sepanjang sumbu Z. Dalam model ini, ukuran sampel dapat diubah untuk memastikan bahwa sampel jauh lebih besar daripada daerah radius/kontak indenter selama indentasi berlangsung, untuk menghindari potensi ukuran sampel dan efek batas [6] Ketebalan dan lebar dari model yang digunakan adalah 3mm di kedua sisi. Inti model dipertahankan tetap dalam semua tingkat kebebasan

(Degree Of Freedom) dan dibatasi oleh garis sentral simetris. Gambar 5. menunjukkan grafik ekspansi wilayah plastic selama indentasi bulat (spherical indentation) berlangsung. Gambar 5 menunjukkan tipikal perbandingan antara Gaya (force)-hasil kedalaman indentasi (h) hasil simulasi model FE sesuai dengan solusi analisis dengan data properties materials yang dikenal untuk indentasi bahan elastis linear. Seperti ditunjukkan dalam gambar, hasil FE menunjukkan kesepakatan yang baik dengan solusi analitis (analytical solution).



**Gambar 5.** Tipikal Model Elemen Hingga indentasi Bulat (spherical) disertai kontak antar muka dan ekspansi plastis pada indentasi spherical dan tipikal perbandingan antara Gaya (force) – hasil indentasi (h) hasil simulasi model FE sesuai dengan solusi analisis dengan data properties materials yang dikenal untuk indentasi bahan elastis linear

**Model Material**

Diskripsi Power Law hampir selalu digunakan untuk mendekati perilaku plastik dari bahan metal [3]. Pengembangan secara komprehensif untuk pendekatan perilaku plastic [3] menggunakan reduksi modulus E\*dalam kisaran tertentu dari parameter material telah diidentifikasi regangan plastic representatif  $\epsilon_r = 0.033$  dan digunakan untuk menormalkan kurva beban (*loading curvature*) bahan dengan koefisien pengerasan regang (n). Penelitian ini berkaitan dengan bahan elastik plastik, kurva tegangan-regangan dapat diwakili oleh hukum Hooke dan kriteria Von Misses dalam power law pengerasan isotropik sebagai:

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & \text{for } \sigma \leq \sigma_y \\ R\epsilon^n & \text{for } \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (1)$$

Dengan  $0.0 < n < 0.5$  untuk logam, tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) didefinisikan pada offset regangan nol, modulus elastis E, dan koefisien pengerasan regang (n) memungkinkan untuk mengembangkan pendekatan yang relatif sederhana untuk menyimpulkan parameter konstitutif material [7], [8] Pada kondisi yang umum, tegangan-regangan plastic umumnya dinyatakan sebagai:

$$\sigma = \begin{cases} E \epsilon & \text{for } \sigma \leq \sigma_y \\ \sigma_y \left(\frac{E}{\sigma_y}\right)^n \epsilon^n & \text{for } \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (2)$$

Dimana E adalah modulus Young, R adalah strength coefficient, n koefisien pengerasan regang dan  $\sigma_y$  tegangan luluh awal pada offset nol regangan. Di wilayah plastik, regangan sebenarnya dapat terurai menjadi yield stress sebenarnya dan regangan plastik sebenarnya (true plastic strain) sebagai :

$$\epsilon = \epsilon_y + \epsilon_p \quad (3)$$

Untuk menghasilkan kontinuitas pada yield, maka mengikuti kondisi ( $\sigma = \sigma_y$ ). Sehingga

$$\sigma_y = E \epsilon_y = R \epsilon_y^n \quad ; \quad R \equiv \sigma_y \left(\frac{E}{\sigma_y}\right)^n \quad (4)$$

R adalah Pengerasan kerja rata-rata. Untuk  $n=0$  maka R akan tereduksi menjadi plastik sempurna Bagi kebanyakan logam dan paduan n adalah antara 0.1 dan 0.5 Persamaan power law Hollomon dalam hubungan antara Tegangan (stress) dan regangan plastic (plastic strain) adalah

$$\sigma = R \epsilon^n \quad (5)$$

Sehingga untuk kondisi kontinyu persamaan tegangan dan koefisien pengerasan regang di nyatakan sebagai:

$$\sigma = \sigma_y + R \epsilon^n \quad (6)$$

Bila  $\sigma > \sigma_y$ , regangan dapat diekspresikan sebagai

$$\sigma = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \epsilon_r\right)^n \quad (7)$$

**Identifikasi Sifat Plastik Material Dengan Dual Indenter**

Metode untuk menentukan sifat plastik material dengan dual indenter dikembangkan melalui prediksi terbalik (inverse prediction) dengan menggunakan input nilai kekerasan material dikenal untuk mengidentifikasi constitutive material properties. Pada tahap pertama, model FE secara sistematis dikembangkan untuk membentuk ruang simulasi meliputi berbagai potensi sifat material. Pada tahap berikutnya, kurva beban yang digunakan untuk mengembangkan ruang simulasi. Pendekatan telah dikembangkan komparatif untuk memprediksi set materi memiliki curvature indentasi sebenarnya. Melalui data tegangan (force) vs kedalaman indentasi yang dikaitkan dengan nilai kekerasan HV dan HRB. Simulasi dengan model yang telah tervalidasi dilakukan pada berbagai sifat material ( $\sigma_y$ : 100 - 900 MPa, dan  $n$ : 0.0 - 0.3) hubungan antara yield stress ( $\sigma_y$ ), koefisien pengerasan

regang ( $n$ ), HV dan HRB dapat diketahui. Hasil simulasi FE Model dijelaskan pada pemetaan 3D surface plot dengan menggunakan baja sebagai sistem model bahan diketahui berhubungan sangat baik antara yield stress ( $\sigma_y$ ), koefisien pengerasan regang ( $n$ ) terhadap HV ataupun HRB dengan koefisien korelasi = 0.97 yang didekati dengan menggunakan regresi linear Non Gaussian 3D. Hubungan ini ditemukan mengikuti persamaan:

$$\sigma_y = 91.34E+09 e^{-0.5 \left[ \left( \frac{n+1.476}{0.897} \right)^2 + \left( \frac{HRB-1216.57}{191.07} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

$$\sigma_y = 828.5 e^{-0.5 \left[ \left( \frac{HV-382}{135.4} \right)^2 + \left( \frac{n-0.605}{0.825} \right)^2 \right]} \quad (9)$$

**Tabel 2.** Contoh tabel kolom tunggal di awal/akhir halaman, tidak boleh diletakkan di tengah teks makalah.

Sample	Experiment				FE Model				Accuracy Study			
	Hardness		Properties		Hardness		Properties		Accuracy (Error %)			
	HV	HR	$\sigma_y$	n	HV	HR	$\sigma_y$	n	$\Delta HV / HV$	$\Delta HR / HR$	$\Delta \sigma_y / \sigma_y$	$\Delta n / n$
CS-0.10%C	124.77	53.21	126.55	0.25	123.11	55.21	127.75	0.26	0.013	-0.038	-0.010	-0.040
CS 0.54%C	216.59	77.08	345.90	0.14	219.72	78.78	340.88	0.14	-0.014	-0.022	0.015	0.008
CS-0.85%C	275.15	91.20	527.45	0.14	266.89	86.75	528.15	0.14	0.030	0.049	-0.001	-0.014

Model matematis yang berasal dari pemetaan surface plot 3D sebagai model yang hasil simulasi kemudian digunakan untuk memprediksi parameter material. Prediksi hasil ganda indenter FE Modeling dengan input nilai kekerasan indenter ganda yang dipilih terhadap sifat plastis (ditunjukkan sebagai yield stress ( $\sigma_y$ ), koefisien pengerasan regang ( $n$ )) ditampilkan dalam **Tabel 2**:

**Kesimpulan**

Dalam Penelitian ini, hubungan antara konstitutif parameter bahan ( $\sigma_y$  dan  $n$ ) dari bahan elasto-plastik, kurva indentasi P-h dan kekerasan Untuk duak indenter (indenters tajam (Vickers) dan indenter bulat (spherical)) telah sistematis diselidiki dengan menggabungkan analisis tegangan representatif dan FE pemodelan menggunakan baja sebagai sistim bahan. Model FE indentasi Vickers

dan Spherical telah dikembangkan dan divalidasi. Konsep dan metodologi yang dikembangkan kemudian digunakan untuk memprediksi nilai-nilai kekerasan (Hv) serta nilai kekerasan Rockwell B (HRB) dari bahan melalui analisis langsung dan divalidasi dengan data eksperimen pada sampel yang dipilih dari baja. Melalui metode pemetaan 3D surface plot dengan menggunakan baja sebagai sistem model bahan diketahui hubungan antara yield stress ( $\sigma_y$ ), koefisien pengerasan regang ( $n$ ) terhadap HV ataupun HRB dengan koefisien korelasi = 0.97 yang didekati dengan menggunakan regresi linear Non Gaussian 3D. Pendekatan ini didiperkirakan memiliki tingkat kesalahan di bawah lima persen. Memperlihatkan pendekatan ini secara signifikan dapat diterima dan menunjukkan model yang akurat. Hasil prediksi sifat material dari FE Model ganda indenter (CS 0.10%  $\sigma_y = 127.75$  MPa,  $n = 0.26$ ; CS 0.54%  $\sigma_y = 340.88$  MPa,  $n =$

0.14 dan CS 0.85% C  $\sigma_y = 528.15$  MPa  $n = 0.14$ ). Hasil Prediksi ganda indenter FE Modeling dikembangkan memberikan hasil statistik cukup baik dengan membandingkan parameter input dan diprediksi sifat material memiliki tingkat kesalahan di bawah lima persen. Merupakan prediksi yang dipilih secara signifikan dapat diterima. Dual indenter FE Model juga dikembangkan untuk memprediksi efek ukuran lekukan pada sifat material. Disebabkan hasil lekukan Vickers mewakili peningkatan kekerasan ketika penurunan beban yang diterapkan, oleh karena itu model simulasi FE juga dilakukan dalam sampel bahan dengan berbagai beban dalam rangka untuk mengetahui pengaruh ukuran Indentasi pada hasil prediksi.

### Referensi

- [1] I N Budiarsa., Jamal M., (2014) Hardness Value Prediction for Spherical Indentation Based on the Representative Stress Approach, Applied Mechanics and Materials Vol. 493 pp 628-633
- [2] I N Budiarsa., (2013) Indentation Size Effect (ISE) of Vickers hardness in steels: correlation with H/E, Applied Mechanics and Materials Vol. 391 pp 23-28
- [3] Busby J. T., Hash M. C., Was G. S., (2005) The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels, Journal of Nuclear Materials 336, 267-278
- [4] Cao Y. P., Lu J., (2004) A new method to extract the plastic properties of metal materials from an instrumented spherical indentation loading curve, Acta Materialia, 52, 4023–4032
- [5] Dao M., Chollacoop N., Van Vliet K. J., Venkatesh T. A. and Suresh S., (2001) Computational modelling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation, Acta Materialia, Vol. 49, pp. 3899–3918
- [6] Taljat B., Zacharia T. and Kosel F.(1998) New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical indentation data, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35(33), pp. 4411-4426
- [7] Swaddiwudhipong S., Tho K. K., Liu Z. S. and Zeng K.. (2005). Material characterisation based on dual indenters, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, pp. 69-83
- [8] Kang S., Kim J., Park C., Kim H., and Kwon D., (2010) Conventional Vickers and true instrumented indentation hardness determined by instrumented indentation tests, *J. Mater. Res.*, Vol. 25, No. 2.