

## Prediksi Kurva P-h dan Nilai Kekerasan pada Indentasi Bulat Berbasis Pendekatan Tegangan Representatif ( $\sigma_r$ )

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

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali. Indonesia

### Abstrak

Dalam penelitian ini model elemen hingga untuk indentasi bulat (Spherical) telah dikembangkan dan divalidasi. Sebuah pendekatan untuk memprediksi kurva P-h dari sifat material konstitutif telah dikembangkan dan diuji berdasarkan hubungan antara kelengkungan dan sifat-sifat material dan stres representatif ( $\sigma_r$ ). Hubungan antara parameter konstitutif material (di tetapkan sebagai yield stress ( $\sigma_y$ ) dan koefisien pengerasan regang ( $n$ )) bahan elastis-plastik, kurva P-h (kurva tegangan-kedalaman indentasi) dan kekerasan (hardness) pada indentasi bulat telah diselidiki secara sistematis dengan menggabungkan analisis tegangan representatif dan pemodelan elemen hingga (Finite Elemen) menggunakan baja. Parametrik Finite elemen model indentasi bulat (Spherical) telah dikembangkan sebagai range simulasi. Dua pendekatan baru untuk mengkarakterisasi kurva P-h untuk indentasi bulat (Spherical) telah dikembangkan dan dievaluasi. Melalui pendekatan fitting kurva penuh dan pendekatan kedalaman indentasi (indentation depth). Kedua pendekatan tersebut terbukti memadai/efektif dalam memprediksi kurva P-h indentasi bahan. Konsep dan metodologi yang dikembangkan kemudian digunakan untuk memprediksi nilai kekerasan (HRB) Rockwell B hardness melalui analisis langsung dan divalidasi dengan data eksperimen pada sampel yang dipilih dari baja

Kata kunci: Indentasi Bulat, stres representatif, koefisien pengerasan regang, Kurva P-h, HRB

### Abstract

In this work, the finite element model of spherical indentation has been developed and validated. An approach to predict the P-h curve of the material constitutive properties have been developed and evaluated based on the relationships between curvature and material properties and representative stress ( $\sigma_r$ ). The relationships between constitutive parameters of the material (in the set as the yield stress ( $\sigma_y$ ) and strain hardening coefficient ( $n$ )) of elastic-plastic material, P-h curve (Force-indentation depth curve) and hardness in the spherical indentation has been investigated systematically by combining the representative stress analysis and finite element modeling using steel. Parametric Finite element model of spherical indentation has developed a range of simulation. Two new approaches to characterize the P-h curve for spherical indentation has been developed and evaluated. One is the full curve fitting approach while the other is depth indentation base approach. Both approaches proved to be adequate / effective in predicting the indentation P-h curve material. The Concepts and methodology developed is to be used to predict the value of hardness (HRB) Rockwell B hardness through direct analysis and validated with experimental data on selected samples of steel.

Keywords: Spherical Indentation, representative stress, strain hardening coeff., P-h curve, HRB

### 1. Pendahuluan

Salah satu keuntungan yang signifikan dari uji indentasi adalah bahwa hanya membutuhkan sejumlah kecil sample bahan, sudah dapat diketahui sifat mekanis material (yaitu nilai kekerasan material), namun aplikasinya indentasi tes sangat dipengaruhi oleh banyak faktor (seperti bentuk indenter, deformasi bahan sekitar indenter dan kondisi eksperimental, dll). Faktor-faktor ini harus dipertimbangkan dengan cermat ketika menggunakan metode indentasi. Proses indentasi adalah dalam dua bentuk yaitu uji indentasi statis, dan uji indentasi kontinyu. Kekerasan bahan didasarkan pada perlawanan solid terhadap deformasi lokal. Dalam uji kekerasan (seperti Hv, HK, HRB), indenter ditekan ke permukaan spesimen dan ukuran lekukan permanen terbentuk dapat diukur untuk mewakili perlawanan terhadap indentasi yang terjadi (yaitu

kekerasan material). Dalam tes Rockwell B (HRB), kekerasan diukur menggunakan perbedaan kedalaman pada beban yang berbeda. Perkembangan lebih lanjut pengujian di tingkatkan melalui indentasi kontinyu serta instrumen tes indentasi. Dalam Indentasi kontinyu, perilaku material diwakili oleh beban (P)-perpindahan (h) dalam kurva P-h. Meskipun penggunaan luas perilaku bahan (diwakili oleh kurva kekerasan atau kurva P-h) tidak secara eksplisit terkait dengan sifat material konstitutif. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk dapat memprediksi (kurves P-h /kekerasan) resistensi lekukan dari parameter konstitutif bahan. Di sisi lain, hal ini juga sangat penting untuk penelitian dan penggunaan praktis untuk mengeksplorasi potensi untuk menggunakan data lekukan untuk memprediksi bahan konstitutif properti. Ini berpotensi memberikan cara yang lebih cepat untuk identifikasi parameter material dan

\*Korespondensi: Tel./Fax.: 62 81999600303  
E-mail:nyoman.budiarsa@unud.ac.id  
©Teknik Mesin Universitas Udayana 2016

diterapkan dalam situasi di mana spesimen standar tidak tersedia. Perkembangan dari kedua sisi tersebut memerlukan pemahaman terhadap program rinci yang menghubungkan konstituitif properti, kurva P-h dan kekerasan dengan indenter bulat dalam indentasi spherical. Didalam proses indentasi, material mengalami deformasi yang kompleks membentuk zona deformasi mekanisme yang berbeda. Salah satu cara yang paling efektif untuk menganalisis proses lekukan adalah metode representative stress [1]. Karya-karya sebelumnya menunjukkan bahwa kekerasan dapat berhubungan dengan stress bahan indentasi ( $\sigma_y$ ), sesuai dengan representative strain ( $\epsilon_r$ ), yang merupakan strain plastik rata-rata sesuai dengan stress yang ditetapkan. Konsep diperbaiki dengan pemodelan elemen hingga (FE) telah berhasil digunakan dalam menganalisis indenter tajam (Vickers) di mana strain perwakilan dan stress didefinisikan dengan baik dengan sudut indenter tetap [1],[2] Ini sangat penting untuk meningkatkan akurasi terutama dalam indentasi lekukan bulat dan terkait sistem kekerasan. Salah satu kasus tertentu adalah tes Rockwell B, di mana penentuan nilai kekerasan ditentukan oleh dua titik pada kurva P-h dari indenter bola. Dalam kasus ini, link dibangun antara parameter bahan dan kurva P-h alami dapat menyebabkan prediksi nilai kekerasan langsung (direct predictions) dari parameter bahan (seperti tegangan luluh dan koefisien pengerasan regang). Hal ini bisa digunakan sebagai alat yang berguna untuk penelitian dan aplikasi praktis.

## 2. Eksperimental

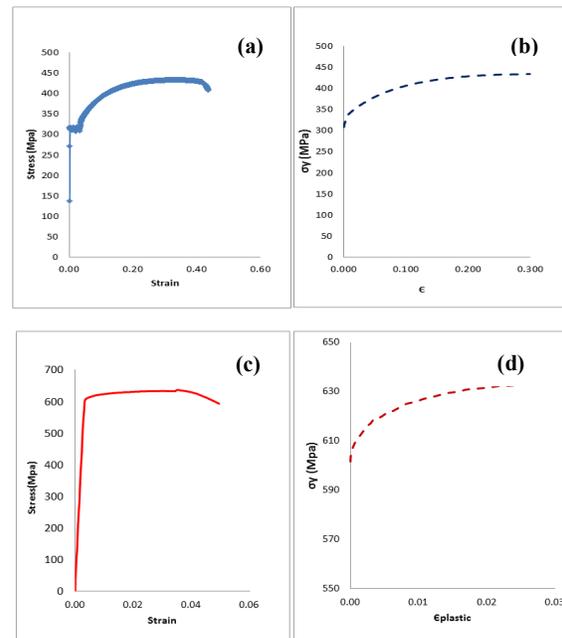
Bahan yang digunakan adalah baja. Komposisi kimia dari bahan, tercantum sebagai berikut dalam table:

Tabel.1 Komposisi kimia dari specimen

Material	Kondisi	Element Composition (%)					
		C	Mn	P	S	Si	Ni
Carbon Steel 0.10% C	Normalized at 900°C	0.1	0.5	<0.04	<0.05	0.10	0.01
Mild Steel	N/A	0.3	0.3	0.05	0.05	0.12	490 ppm

Sampel Baja batang elips solid dengan diameter  $\phi 5$  mm dan panjang 90 mm dan memiliki dudukan di tepi. Pengujian tarik dilakukan menggunakan Lloyd LR 30K Universal mesin uji materi dengan extensometer. Mesin ini memiliki kapasitas beban uji maksimum sebesar 30 kN, dengan pembacaan yang akurat untuk 0.5 % dari gaya. Mesin uji tarik dihubungkan dengan komputer mikro, cetak grafis dari test langsung ditampilkan dan data uji disimpan. Kontrol konsol dari mesin uji memiliki tampilan digital di mana mesin dapat dioperasikan secara manual atau otomatis. Dua bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini mencakup baja karbon (0.1% C) dan spesimen Mild steel.

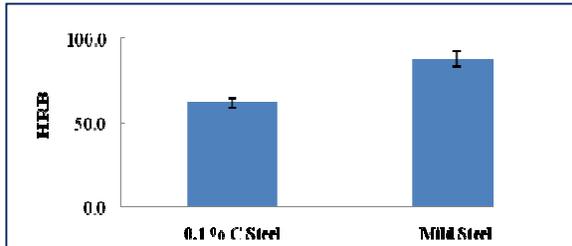
Gaya (P) dan kurva perpindahan (h) dari uji tarik untuk bahan hasil 0.1 % Carbon Steel ditunjukkan pada Gambar 1(a) dan Mild Steel pada Gambar 1(c). Dengan diketahui daerah luasan awal (A) dan panjang awal ( $l_0$ ) pada kurva p-h (Gambar 1(a),(c)) diperoleh kurva tegangan-regangan dan sifat bahan termasuk: tegangan luluh ( $\sigma_y$ ), Tegangan tarik ( $\sigma_u$ ), Tegangan tarik sesungguhnya ( $\sigma_t$ ) dan regangan sesungguhnya ( $\epsilon_t$ ) dan koefisien pengerasan kerja (n). Tegangan ( $\sigma$ ) adalah beban (P) dibagi luasan awal (A), sedangkan Regangan ( $\epsilon$ ) adalah panjang (l) dibagi dengan panjang awal ( $l_0$ ). Kurva regangan-tegangan dari dua bahan utama diuji ditunjukkan pada Gambar 1(b) untuk 0.1% C dan gambar 1(d) untuk Mild steel. Hasil tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) diidentifikasi untuk 0.1%C baja karbon adalah 308.03 MPa, koefisien pengerasan kerja (n) adalah 0.07, tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) untuk baja ringan (mild steel) adalah 601.66 Mpa, koefisien pengerasan kerja (n) adalah 0.025. Uji kekerasan Rockwell B dilakukan dengan menggunakan: Wilson Rockwell hardness tester (ACCO Wilson divisi instrument, USA).



Gambar 1. Kurva gaya (P) vs perpindahan (h) (*force displacement curves*) hasil tensile test untuk (a) 0.1% Carbon, (c) Mild steel, dan kurva tegangan-regangan untuk (b) 0.1% Carbon, (d) Mild steel

Indentasi menggunakan skala indenter bola B, dengan  $R = 0.79$  mm (Diameter bola baja = 1/16 in), indenter ditekan pada sampel di bawah beban minor awal ( $F_m$ ) = 10 kg dan diikuti oleh beban mayor ( $F_M$ ) = 100 kg. Rincian dari mekanisme asli pengujian dapat ditemukan dalam paten asli dari Rockwell(1924). Mesin ini dikalibrasi menggunakan blok pengujian, variasi kesalahan nilai kekerasan adalah 5%. Nilai rata-rata untuk HRB dua bahan

sampel ditunjukkan pada Gambar 2. Kekerasan Rockwell B (HRB) diidentifikasi untuk 0.1% C adalah 62.0 dan HRB untuk Mild Steel adalah 88.0. Data kekerasan HRB ini digunakan untuk memvalidasi evaluasi kekerasan terpilih dan program prediksi properties yang dikembangkan. Nilai-nilai kekerasan ditentukan oleh kedalaman penetrasi indenter bola pada proses loading sampel uji dengan persamaan  $(HR = 130 - (H1000 - H100)/0.002)$ .



Gambar 2. Data nilai kekerasan specimen menggunakan skala Rockwell B

Rincian dari mekanisme asli pengujian dapat ditemukan dalam paten asli dari Rockwell (1924). Mesin ini dikalibrasi menggunakan blok pengujian, variasi kesalahan nilai kekerasan adalah 5%. Nilai rata-rata untuk HRB dua bahan sampel ditunjukkan pada Gambar 2. Kekerasan Rockwell B (HRB) diidentifikasi untuk 0.1% C adalah 62.0 dan HRB untuk Mild Steel adalah 88.0. Data kekerasan HRB ini digunakan untuk memvalidasi evaluasi kekerasan terpilih dan program prediksi properties yang dikembangkan.

### 3. ANALISA DAN HASIL

#### 3.1 Material Model

Diskripsi Power Law hampir selalu digunakan untuk mendekati perilaku plastik dari bahan metal[3]. Pengembangan secara komprehensif untuk pendekatan perilaku plastik [1] menggunakan reduksi modulus  $E^*$  dalam kisaran tertentu dari parameter material telah diidentifikasi regangan plastik 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 Mises dalam power law pengerasan isotropik sebagai:

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

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 [4].

Pada kondisi yang umum, tegangan-regangan plastic umumnya dinyatakan sebagai:

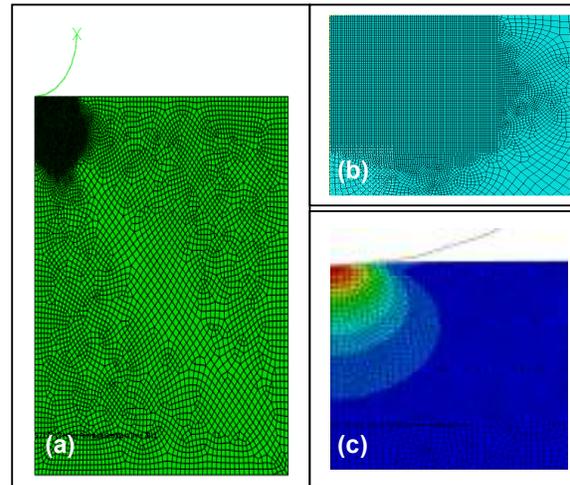
$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & \text{for } \sigma \leq \sigma_y \\ \sigma_y \left(\frac{E}{\sigma_y}\right)^n \epsilon^n & \text{for } \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (2)$$

Dimana 'E' adalah Modulus Young, 'n' koefisien pengerasan regang and ' $\sigma_y$ ' tegangan luluh awal, pada offset regangan nol. Jika  $\epsilon_r$  menyatakan regangan representatif pada tegangan plastik tertentu, tegangan representatifnya adalah ' $\sigma_r$ '. Pada titik regangan plastik, tegangan dapat dinyatakan sebagai:

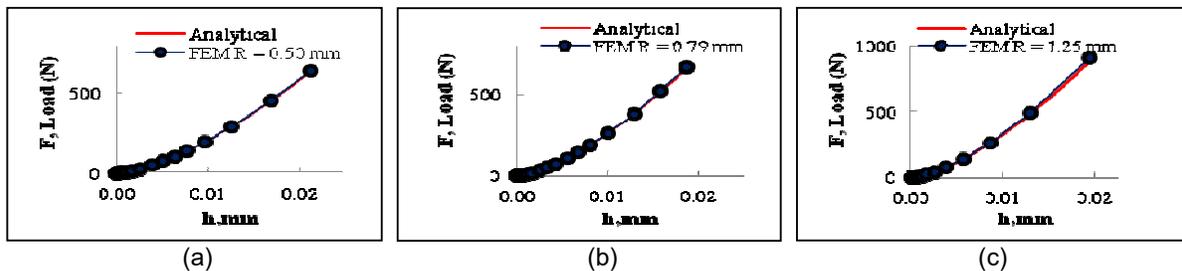
$$\sigma_r = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \epsilon_r\right)^n \quad (3)$$

#### 3.2 Model Numerik dan hasil

Model elemen hingga (Finite Elemen) 2-D Axial simetris FE dibangun untuk mensimulasikan respon indentasi solid elastis plastik menggunakan finite elemen komersial ABAQUS, yang ditunjukkan pada Gambar 3(a). dan 3(b). Terlihat tipikal mesh underneath dekat indenter di desain lebih rapat untuk meningkatkan akurasi analisis. Model 2-D Axial simetris ini digunakan karena kondisi simetri dari indenter bola. Dalam model ini, ukuran sampel dapat diubah untuk memastikan bahwa sampel jauh lebih besar daripada daerah radius indenter/kontak selama indentasi untuk menghindari potensi ukuran sampel dan efek batas[3]. Intinya model itu tetap dalam semua derajat kebebasan (DOF) dan garis sentral simetris dibatasi.



Gambar 3(a). Model Finite Element uji indentasi bulat (spherical). (b) tipikal mesh underneath dekat indenter untuk meningkatkan akurasi, (c) Kontur tegangan dan kedalaman selama indentasi untuk indenter bulat dengan ukuran indenter  $R = 0.79$  mm (sifat bahan yang digunakan  $\sigma_y = 350$  MPa,  $n = 0.2$ )



Gambar 4. Perbandingan antara FE gaya-perpindahan data numerik dan solusi analitik dengan model yang bahan elastic. (a) R = 0.5mm; (b) R = 0.79 mm; (c) R=1.25mm

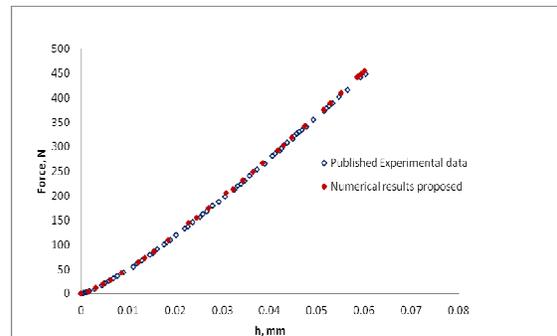
Model ini menggunakan free mesh pada bidang utama, ini memungkinkan menerapkan ukuran mesh dalam file program parametrik. Sebuah skema gradien meshing telah dikembangkan untuk daerah yang berbeda. Simulasi dilakukan menggunakan R = 0.79 mm, dan spesimen model yang digunakan adalah: modulus young = 200 GPa. Poisson rasio = 0.2. Ukuran mesh 10 um di daerah bawah dan sekitar indenter, sedangkan mesh daerah lain yang digunakan bias tunggal untuk memperoleh jala gradien yang lenih rapat ke bawah dan sekitar indenter untuk meningkatkan akurasi model. Dalam pemodelan FE, keakuratan hasil dipengaruhi oleh banyak faktor seperti bentuk mesh dan kepadatan, jenis elemen, kondisi gesekan dan kondisi batas[5]. Dalam penelitian ini mencakup domain kekuatan luluh  $\sigma_y$  100 sampai 900 MPa dan eksponen pengerasan regangan (n) bervariasi 0.0-0.3 dan Poisson rasio (v) di tetapkan sebesar 0.2. Hasil model simulasi FE Bulat akan menghasilkan kurva P-h (Force- depth of Indentation). Gambar 3(c) menunjukkan kurva P-h khas selama fase pembebanan (loading) pada bahan elastis-plastik khas dengan ukuran indenter R=0.79 in. Kurva beban mewakili resistensi bahan untuk penetrasi indenter, sementara perbedaan antara kurva loading dan unloading adalah merupakan kehilangan energi [4]. FE Model yang dikembangkan kemudian divalidasi dengan solusi analitis bahan elastis menggunakan solusi analisis yang dikenal[3] untuk indentasi dari bahan elastis linier.

$$F_z = \left(\frac{16R}{9}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \delta^{\frac{3}{2}} \tag{4}$$

Dimana 'Fz' adalah gaya reaksi, 'R' adalah radius indenter; 'E' dan 'v' adalah modulus Young dan Poisson rasio dari material, masing-masing.  $\delta$  adalah kedalaman lekukan. Seperti terlihat pada Gambar 4. Terlihat analisis trend sesuai dengan data kurva gaya vs kedalaman indentasi hasil simulasi FE Model secara numerikal dibandingkan dengan hasil dengan menggunakan pendekatan analitik. Hal ini menunjukkan secara statistik kurva bersesuaian dan berhubungan dengan baik terhadap data dan model FE adalah sama dan

sebangun dengan model analitik. Koefisien korelasi antara dua kurva ini menggunakan metode regresi least square adalah 99.9%.

FE Model indenter bulat selanjutnya divalidasi dengan membandingkan kurva P-h FE model dengan model bahan elastis-plastik hasil publikasi [6].



Gambar 5. Perbandingan hasil numerik dengan data eksperimen hasil terpublikasi[6] dengan indenter bola (R = 1.25 mm) menunjukkan validasi model FE dengan bahan elastis plastik adalah valid dan akurat.

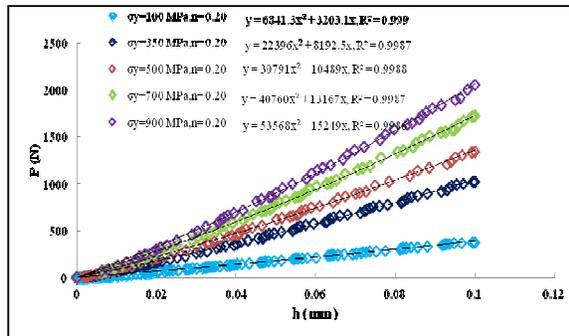
Seperti ditunjukkan dalam Gambar 5 hasil numerik menunjukkan kesesuaian dengan data eksperimen, yang menunjukkan bahwa model yang akurat.

### 3.3 Pendekatan Full curve fitting

Sebuah studi parametrik secara komprehensif menggunakan prosedur yang dikembangkan dilakukan mewakili berbagai parameter perilaku mekanik yang terdapat dalam logam rekayasa umum. Poisson rasio ditetapkan 0.3, modulus Young E =200GPa, kekuatan luluh ( $\sigma_y$ ) 100-900 MPa, dan koefisien pengerasan regang n=0.0-0.3. Hasil simulasi dengan model FE indenter bulat menghasilkan kurva P-h dalam range parameter yang ditetapkan. Setelah evaluasi, dua pendekatan telah ditemukan efektif dalam mewakili kurva dengan akurasi yang dapat diterima. Gmbr. 6 dan Gmbr. 7 menunjukkan dua pendekatan yang diusulkan. Metode pertama adalah dengan menggunakan hubungan second order polynomial fitting dalam bentuk:

$$P = C_1 h^2 + C_2 h \tag{5}$$

Gambar 6. Menunjukkan kurva P-h dan persamaan fitting dengan koefisien korelasi yang sesuai. Dalam sebagian besar kasus persamaan, kesesuaian kurva yang baik adalah memiliki koefisien korelasi lebih dari 99.5%. Data terlihat tidak smoothing adalah karena stabilitas proses simulasi, untuk menunjukkan keaslian data. Semua data melalui domain telah diproses dengan cara yang sama dan nilai-nilai C1 dan C2 diekstraksi dan digunakan untuk menentukan hubungannya dengan sifat material.



Gambar 6 kurva P-h pada pendekatan full curve fitting menggunakan persamaan:  $P = C_1h^2 + C_2h$

Untuk indenter bola, dengan perubahan sudut serta peningkatan kedalaman indentasi, tidak banyak diketahui mengenai representatif stress ( $\sigma$ ). Namun secara umum, berdasarkan mekanisme deformasi proses indentasi, deformasi material dikontrol oleh deformasi elastis dan tegangan luluh ( $\sigma_y$ ), sehingga diusulkan untuk menggunakan ( $\sigma$ ) yang efektif yang berpotensi dapat dikaitkan dengan parameter  $C_1$  dan  $C_2$ , sehingga mewakili kurva P-h penuh. Keadaan linier dalam persamaan,  $C_2$  dihubungkan langsung sebagai  $C_2$  terhadap  $E/\sigma$ , untuk merepresentasikan perbandingan keadaan elastis dan plastic dari properti. Melalui plot  $C_2$  vs  $E/\sigma$  dengan  $\epsilon_r$  yang berbeda untuk  $C_2$ . Diketahui bahwa ada korelasi yang baik antara  $C_2$  dengan dan  $E/\sigma$  dan dipengaruhi oleh fitting representatif strain ( $\epsilon_r$ ) yang digunakan. Pada  $\epsilon_r = 0.01$  memiliki koefisien korelasi terbaik dan memberikan persamaan sebagai:

$$C_2 = 3566.9 (E/\sigma)^{0.855} \quad (6)$$

Secara teoritis,  $C_1$  adalah koefisien orde ke 2, sehingga berpotensi dapat dikaitkan dengan representative stress ( $\sigma$ ) mengikuti  $C_1/\sigma$  vs  $E/\sigma$  menurut Eq. 5 dan Eq. 6, tapi hasilnya tidak begitu baik dengan  $\epsilon_r$  yang efektif dari 0.07. Tingkat regangan lain telah dieksplorasi hasilnya sama-sama tidak memuaskan. Jadi hipotesis berbasis fisik telah dievaluasi, dari sudut pandang energi, ketahanan terhadap lekukan terdiri dari resistensi

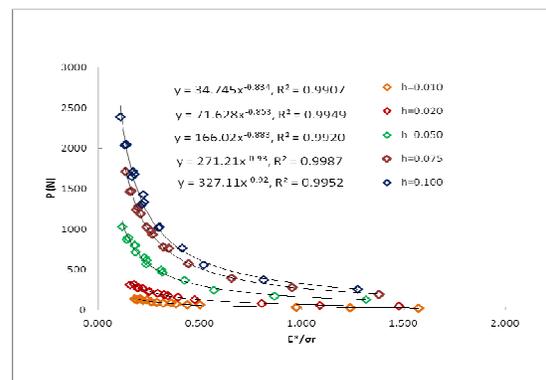
elastis dan plastik. Nonlinier dan linearitas kurva harus mencerminkan keseimbangan antara deformasi elastis dan deformasi plastik, yang dapat diwakili oleh  $E/\sigma$ . Hubungan langsung antara  $C_1$  dan  $E/\sigma$ , telah dieksplorasi dengan  $\epsilon_r$  yang berbeda. Fitting terbaik antara  $C_1/\sigma$  vs  $E/\sigma$ , korelasi dengan  $\epsilon_r$  yang berbeda, referensi strain yang paling efektif adalah  $\epsilon_r = 0.07$  yang memberikan persamaan :

$$C_1 = 3606.8 (E/\sigma)^{-1.252} \quad (7)$$

Koefisien korelasi adalah lebih dari 95% Selanjutnya peningkatan atau penurunan dari  $\epsilon_r$  menunjukkan tidak ada perubahan yang berarti dalam korelasi fitting tersebut. Sehingga prediksi kurva P-h dapat diketahui.

### 3.4 Pendekatan kedalaman indentasi berbasis kurva P-h

Pendekatan kedalaman indentasi berbasis kurva P-h secara fisik dapat dibandingkan lebih mudah dibandingkan pendekatan yang lain. Dalam hal ini, bila kekuatan pada kedalaman indentasi dengan sifat material yang berbeda dapat dirumuskan, maka secara otomatis hubungan antara gaya dan representative stress ( $\sigma$ ) dapat dieksplorasi. Regangan  $\epsilon_r$  optimal dan persamaan ditentukan untuk setiap kedalaman seperti yang ditunjukkan pada Gambar-7. Dengan meningkatnya kekuatan pemodelan komputer, ini secara teknis layak berpotensi memberikan penyelesaian yang lebih sederhana dalam rangka penyelesaian problem deformasi kompleks bahan dari pada pendekatan matematika. Dengan menghitung gaya vs representative stress ( $\sigma$ ) kedalaman indentasi yang berbeda, Regangan  $\epsilon_r$  yang sesuai dapat ditentukan dan kurva P-h penuh dapat dibangun.

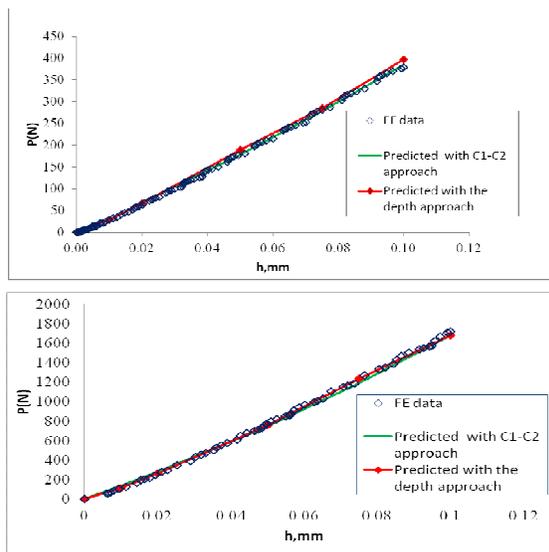


Gambar 7. Hubungan antara gaya (forces) terhadap variasi kedalaman indentasi (h) dan  $E^*/\sigma_r$ .

Gambar 7 menunjukkan data berlaku pada kedalaman yang berbeda diplot terhadap  $E^*/\sigma_r$  data untuk setiap kedalaman didasarkan pada evaluasi dari nilai regangan  $\epsilon_r$  sama seperti proses yang digunakan untuk  $C_v$ ,  $C_1$  dan  $C_2$ . Regangan

optimum pada  $h=0.01$  adalah 0.05,  $h=0.02$  adalah 0.01,  $h=0.05$  adalah 0.033,  $h=0.075$  adalah 0.02 dan  $h=0.1$  adalah 0.045. Persamaan ini kemudian dapat digunakan untuk memprediksi setiap kedalaman pada titik kurva P-h.

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 8, dengan bahan yang dikenal sifat mekanisnya, titik-titik pada kurva dapat diproduksi. Hasil dari pendekatan kedalaman indentasi berbasis kurva P-h berkorelasi dengan kurva FE P-h dan yang diprediksikan dengan Pendekatan Full curve fitting. Dengan pengambilan nilai kedalaman indentasi (depth of indentation) yang terseleksi, mampu menggambarkan konsep dan dapat diterapkan untuk hal-hal lain untuk menghasilkan kurva penuh.



Gambar 8. Prediksi kurva P-h berdasarkan pendekatan kedalaman indentasi dan Pendekatan Full curve fitting dibandingkan dengan data elemen hingga (Finite Element)

### 3.4 Prediksi Hardness berbasis kurva P-h estimasi parameter bahan inverse

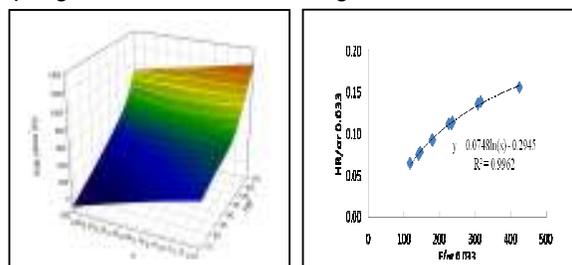
Konsep dan metodologi yang dikembangkan adalah untuk digunakan untuk memprediksi nilai kekerasan (HRB) dari analisis langsung melalui material dan divalidasi dengan data eksperimen pada sampel yang dipilih dari baja. Uji eksperimental telah dilakukan pada 0.1% baja karbon dan Mild steel termasuk uji tarik dan uji kekerasan Rockwell (HRB). Nilai kekerasan diprediksi langsung berdasarkan kurva P-h menggunakan representative stress yang sesuai yaitu kurva P-h dua sampel baja dari pemodelan FE (menggunakan kurva tegangan regangan sebagai sifat material input) dan kurva P-h hasil prediksi dengan menggunakan persamaan (5-7). Seperti terlihat pada gambar, kurva berada dalam korelasi baik dengan satu sama lain. Dari kurva P-h, kedalaman lekukan pada beban 100N dan 1000N yang digambarkan dan digunakan untuk menghitung HRB menggunakan persamaan:

$$HRB = 130 - (h_{1000N} - h_{100N}) / 0.002 \quad (8)$$

Berdasarkan konsep dasar prediksi kekerasan pada kurva P-h, estimasi parameter bahan secara terbalik kemudian dapat dikembangkan, dan nilai kekerasan dapat diprediksi. Serta berpotensi secara langsung dapat dikaitkan secara langsung dengan representative stress ( $\sigma$ ) dan informasi properties selama rentang materi yang dipelajari. Hal ini diselidiki dengan terlebih dahulu menentukan nilai HRB bahan atas berbagai sifat, maka hubungan kekerasan (hardness)-( $\sigma$ ) dapat langsung dieksplorasi menggunakan data proses fitting. Gambar 9(a) Menggambarkan hubungan 3-D antara kekerasan dan parameter bahan ( $\sigma_y$  dan  $n$ ), sedangkan gambar 9(b) menunjukkan korelasi antara  $HRB/\sigma_r$  vs  $E/\sigma_r$  pada regangan  $\epsilon_r = 0.033$ . dalam hubungan yang dapat dirumuskan sebagai :

$$HRB / \sigma_r = 0.0748 \ln (E / \sigma_r) - 0.2945 \quad (9)$$

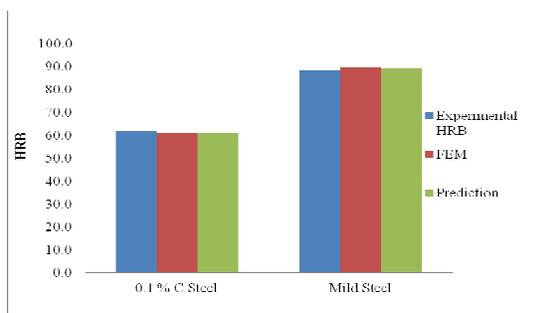
Hubungan ini (Eqs.9) memungkinkan prediksi kekerasan langsung dilakukan dari sifat material. Evaluasi dilakukan menggunakan dua bahan baja sebagai contoh. HRB diprediksi menunjukkan tingkat korelasi yang sama dengan data eksperimen. dalam kasus 0.1 C Steel, nilai-nilai HRB adalah 105% dari nilai yang diukur; dalam kasus Mild Steel, HRB adalah 102% dari nilai yang terukur. Korelasi yang sama juga telah ditemukan di bahan-bahan lain (dalam rentang kesalahan 5%) seperti terlihat pada Gambar 10. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat digunakan untuk memprediksi nilai-nilai kekerasan dengan akurat dengan rentang kesalahan pengukuran kesalahan kurang dari 5%.



Gambar 9(a). Hubungan kekerasan dan parameter bahan ( $\sigma_y$  dan  $n$ ), (b). korelasi antara  $HRB/\sigma_r$  vs  $E/\sigma_r$

Gambar 10 menunjukkan plot nilai HRB dihitung berdasarkan Eq.9 dibandingkan dengan hasil eksperimen. Dalam semua kasus untuk prediksi berdasarkan pada pendekatan Tegangan representatif (Eq.5-7) menunjukkan kesesuaian dengan data uji dan data FE. Penelitian juga telah dilakukan pada bahan lain, dan hasil prediksi menunjukkan tingkat konsistensi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis kurva

P-h untuk memprediksi nilai-nilai HRB valid dan akurat.



Gambar 10. Perbandingan antara eksperimen dan prediksi nilai kekerasan Rockwell (HRB) dengan FE pemodelan untuk Carbon Steel 0.10% C dan Mild Steel

#### 4. Simpulan

Dalam penelitian ini hubungan antara parameter bahan konstitutif ( $\sigma_y$  dan  $n$ ) pada bahan elasto-plastik, kurva P-h indentasi dan kekerasan dengan indenter bola telah diselidiki secara sistematis dengan menggabungkan analisis tegangan representatif dan pemodelan FE menggunakan baja sebagai kelompok sistem model. Hasil utama dari penelitian ini telah membentuk kerangka kerja model untuk memprediksi kurva indentasi P-h dari sifat material konstitutif yang telah terbukti menjadi alat yang berguna untuk memprediksi nilai kekerasan Rockwell (HRB). Dalam penelitian ini, Model FE indentasi bulat (spherical) telah dikembangkan. Model ini divalidasi terhadap data uji yang telah terpublikasi. Sebuah pendekatan untuk memprediksi kurva P-h dari sifat material konstitutif telah dikembangkan dan diuji berdasarkan hubungan antara kelengkungan dan sifat-sifat material dan representative stress. Dua pendekatan baru untuk mengkarakterisasi kurva P-h indentasi bulat telah dikembangkan dan dievaluasi. Salah satunya adalah Pendekatan Full curve fitting sedang yang lain adalah pendekatan berdasarkan kedalaman indentasi. Dalam pendekatan full curve fitting, hubungan antara representative stress yang efektif dengan 1<sup>st</sup> dan 2<sup>nd</sup> orde koefisien pada polynomial fitting line P-h ditemukan. Dalam pendekatan kedalaman indentasi hubungan antara gaya dan representative stress dengan berbagai representative strain telah ditetapkan. Kedua pendekatan tersebut terbukti memadai / efektif dalam memprediksi kurva Ph lekukan. Pendekatan untuk memprediksi kekerasan berdasarkan kurva P-h FE model ditemukan dan telah berhasil digunakan untuk menghasilkan nilai-nilai kekerasan dari berbagai sifat material, yang kemudian digunakan untuk membangun hubungan antara nilai-nilai kekerasan (*Hardness value*) (HRB) dengan Tegangan representative ( $\sigma_r$ ).

#### Daftar Pustaka

- [1] Dao M., Chollacoop N., Van Vliet K. J., Venkatesh T. A. and Suresh S., *Computational modelling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation*, Acta Materialia, Vol. 49, pp. 3899–3918, 2001.
- [2] N. Budiarsa, A. Norbury, X. X. Su, G. Bradley, X. J. Ren, "Analysis of Indentation Size Effect of Vickers Hardness Tests of Steels", *Advanced Materials Research*, Vols. 652-654, pp. 1307-1310, 2013.
- [3] N. Budiarsa, "Indentation Size Effect (ISE) of Vickers Hardness in Steels: Correlation with H/E", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 391, pp. 23-28, 2013.
- [4] I. N. Budiarsa, M. Jamal, "P-h Curves and Hardness Value Prediction for Spherical Indentation Based on the Representative Stress Approach", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 493, pp. 628-633, 2014.
- [5] Taljat B., Zacharia T. and Kosel F. *New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical indentation data*, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35(33), pp. 4411-4426 .1998.
- [6] Kucharski S. and Mroz Z., *Identification of plastic hardening parameters of metals from spherical indentation tests*, *Materials Science and Engineering*, Vol. 318, pp. 65-76. 2001.