

# STUDI PENGARUH LAJU REGANGAN LINIER PADA UJI TARIK BAHAN BAJA KARBON RENDAH

**Handoko**<sup>1)</sup>

Program Diploma Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada<sup>1</sup>  
Jl. Yacarana Sekip Unit IV, Yogyakarta, Telepon (0274) 649130, Fax. (0274) 580990  
E-mail : hanformal@yahoo.com<sup>1)</sup>

## Abstrak

*Uji tarik merupakan jenis pengujian bahan yang paling banyak dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik suatu bahan teknik. Dalam prakteknya masih sedikit para praktisi pengujian bahan yang memperhatikan aspek dan pengaruh laju regangan terhadap data hasil uji tarik. Untuk itu penelitian ini dilaksanakan dengan mempelajari pengaruh variasi laju regangan linier ( $\dot{\epsilon}$ ) pada pengujian tarik.*

*Pengujian dilakukan dengan menguji kekuatan tarik bahan baja karbon rendah dengan tiga variasi laju regangan linier yaitu 0,0005, 0,0062 dan 0,0165 detik<sup>-1</sup>. Spesimen disiapkan mengikuti standar ASTM E8M dengan gauge length 50 mm. Data beban dan elongation direkam untuk setiap interval waktu pengujian hingga spesimen putus.*

*Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju regangan linier mempengaruhi kekuatan tarik bahan. Semakin tinggi laju regangan linier, tegangan tarik maksimum dan tegangan luluhnya akan semakin rendah. Pada laju regangan linier 0,0165 detik<sup>-1</sup> nilai tegangan tarik maksimum paling rendah yaitu mencapai penurunan 2,79 % dari tegangan tarik maksimum pada laju regangan linier 0,0005 detik<sup>-1</sup>. Hal yang sama juga terjadi pada tegangan tarik luluh dengan penurunan hingga 4,05 %. Sedangkan data regangan daerah elastis tidak menunjukkan pengaruh yang berarti dengan selisih data terukur 0,1 hingga 0,4 %. Untuk regangan total terjadi penurunan hingga 2,5 % saat bahan mengalami laju regangan tertinggi.*

*Kata Kunci : laju regangan linier, kekuatan tarik, regangan.*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Pada ilmu bahan teknik, uji tarik merupakan jenis pengujian yang paling banyak dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik. Data hasil uji tarik dijadikan patokan dalam menentukan parameter kekuatan dan sifat yang lain. Sebagai contoh ketika merancang *tool* dari bahan baja, *tool designer* dapat memperkirakan bahwa kekuatan geser sekitar 50 – 60 % dari data kekuatan luluh hasil uji tarik (Nee, 1998). Terhadap kekerasan, untuk baja karbon dapat diambil perkiraan bahwa kekerasan Brinell (*Brinell Hardness Number*) tiga kali kekuatan tarik (Schaffer *et al*, 1999). Dengan demikian dapat dimengerti akan perlunya pemahaman yang baik dan lengkap atas pengujian tarik bagi *engineer* di bidang aplikasi mekanika dan teknik material serta manufaktur.

Dalam prakteknya masih sedikit para praktisi pengujian bahan (terutama baja) yang memperhatikan aspek dan pengaruh *strain rate* (laju regangan) terhadap data hasil uji tarik. Untuk itu penelitian ini dilaksanakan dengan mempelajari perilaku mekanik

bahan ketika mengalami laju regangan linier ( $\dot{\epsilon}$ ) yang berbeda – beda selama pengujian tarik berlangsung.

### Tinjauan Pustaka

Boyce dan Dilmore (2008) meneliti pengaruh *strain rate* (dari 0,0002 detik<sup>-1</sup> hingga 200 detik<sup>-1</sup>) pada empat macam bahan baja *ultrahigh-strength*. Pada bahan AerMet 100 dan HP9-4-20M, mereka melaporkan penurunan keuletan hingga 10% sedangkan bahan ES-1c menunjukkan peningkatan keuletan mencapai 25%. Ditinjau dari kekuatan tarik, tegangan luluh mengalami peningkatan sebesar 10%. Pada bahan kristal tunggal fcc (*face centered cubic*), Wang *et al* (2008) menemukan bahwa pada *strain rate* tinggi (10<sup>4</sup> hingga 10<sup>6</sup> detik<sup>-1</sup>) terjadi peningkatan pembentukan densitas dislokasi dan *flow stress* pada semua arah dimulai dari arah [111]. Selanjutnya pada bahan getas, Mastilovic dkk. (2007) mendapatkan hasil bahwa peningkatan *strain rate* menyebabkan peningkatan kekuatan dinamik dengan transisi dari evolusi kerusakan acak menjadi pola kerusakan deterministik.

Untuk bahan non metalik berbagai penyelidikan mengenai pengaruh *strain rate* telah dilakukan. Sebagai contoh adalah bahan polimer (Chaléat *et al*,

2008), komposit serat gelas/epoxy (Shokrieh dan Omid, 2008), karet styrene butadiene (Hoo Fatt dan Ouyang, 2008) dan keramik (Deshpande dan Evans, 2008).

**Dasar Teori**

Suatu proses uji tarik dengan gaya tarik  $F$ , penampang mula – mula  $A_0$ , panjang mula – mula dari spesimen  $L_0$  serta elongation  $\Delta L$  maka ketika parameter waktu dipertimbangkan, engineering stress ( $S$ ) dan engineering strain ( $e$ ) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$S(t) = \frac{F(t)}{A_0}; e(t) = \frac{\Delta L(t)}{L_0} \tag{1}$$

Sedangkan true stress dan true strain dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$\sigma = S(1 + e); \varepsilon = \ln(1 + e) \tag{2}$$

Dari definisi di atas didapat hubungan sebagai berikut (Costa Mattos et al, 2008):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{e}}{1 + e} \tag{3}$$

Persamaan umum flow stress  $\sigma$  dengan sensitivitas terhadap strain rate adalah:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^n \tag{4}$$

dengan  $K$  adalah konstanta bahan dan  $n$  merupakan faktor sensitivitas terhadap strain rate. Untuk bahan logam ferro, persamaan (4) diperbaiki lewat hubungan semi logaritma berikut ini (Boyce dan Dilmore, 2008):

$$\sigma = \beta \cdot \log(\dot{\varepsilon}) + K' \tag{5}$$

dengan  $\beta$  merupakan parameter sensitivitas strain rate semi logaritma dan  $K'$  adalah konstanta bahan.

**Tujuan Penelitian**

Mengetahui pengaruh laju regangan linier ( $\dot{\varepsilon}$ ) terhadap kekuatan tarik dan regangan pada bahan baja karbon rendah.

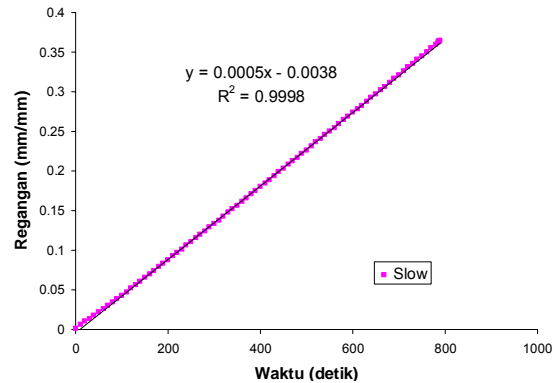
**CARA PENELITIAN**

Mula – mula bahan baja karbon rendah dengan 0,1%C dibuat spesimen sesuai standar ASTM E8M dengan panjang uji (gauge length) 50 mm. Kemudian dilakukan uji tarik pada tiga variasi laju regangan linier. Mengingat bahwa mesin uji tarik yang digunakan memerlukan operasi manual untuk mengatur kecepatan loading lewat bukaan katup hidrolik maka selama pengujian data gaya tarik dan elongation direkam dengan camcorder. Setelah tiga variasi kecepatan loading selesai dilakukan, video rekaman (25 frames per second, fps) dianalisa tiap frame untuk mendapatkan data gaya tarik dan elongation versus waktu. Pengambilan data dimungkinkan dengan menggunakan perangkat lunak open source yaitu Media Player Classic yang memiliki kemampuan navigasi tiap frame gambar dengan

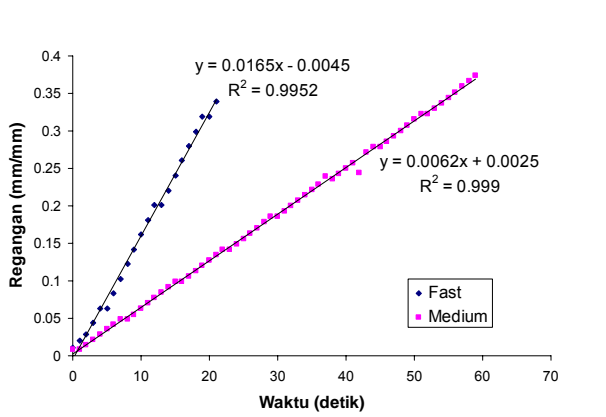
mudah. Dari data elongation versus waktu kemudian diolah dengan regresi statistik untuk mendapatkan besaran laju regangan linier. Pengaruh variasi laju regangan linier dapat dipelajari ketika membandingkan data kekuatan tarik dan regangan dari tiap variasi.

**HASIL PENELITIAN**

Dari data hasil pengujian mula – mula dilakukan penentuan laju regangan linier untuk tiga kategori berdasarkan laju pembebanan yang lambat (slow) untuk laju regangan linier rendah, sedang (medium) untuk laju regangan linier sedang dan cepat (fast) untuk laju regangan linier tinggi sebagai berikut:



Gambar 1. Penentuan laju regangan linier kategori lambat dengan teknik regresi linier.



Gambar 2. Penentuan laju regangan linier kategori sedang dan cepat dengan teknik regresi linier.

Hasilnya diperoleh tiga besaran kuantitatif laju regangan linier yaitu 0,0005, 0,0062 dan 0,0165 detik<sup>-1</sup> untuk ketiga kategori. Berikutnya berdasarkan kategori laju regangan linier tersebut, kekuatan tarik bahan berbeda sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1. Data Kekuatan Tarik (*Engineering Stress*)

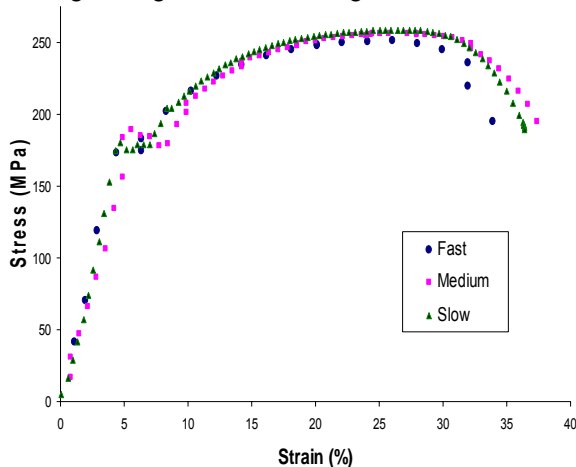
Laju regangan linier (detik <sup>-1</sup> )	Kategori	Tegangan Luluh, $\sigma_y$ (MPa)	Tegangan Maksimum, $\sigma_u$ (MPa)	Tegangan Putus, $\sigma_B$ (MPa)
0,0005	Rendah	179,771	258,201	189,228
0,0062	Sedang	179,037	255,918	195,098
0,0165	Tinggi	173,248	251,027	194,690

Untuk regangan rekayasa (*engineering strain*) diperoleh data (Tabel 2):

Tabel 2. Data Regangan Rekayasa (*Engineering Strain*)

Laju regangan linier (detik <sup>-1</sup> )	Kategori	Regangan elastis (%)	Regangan Total (%)
0,0005	Rendah	4,32	36,42
0,0062	Sedang	4,72	37,38
0,0165	Tinggi	4,42	33,92

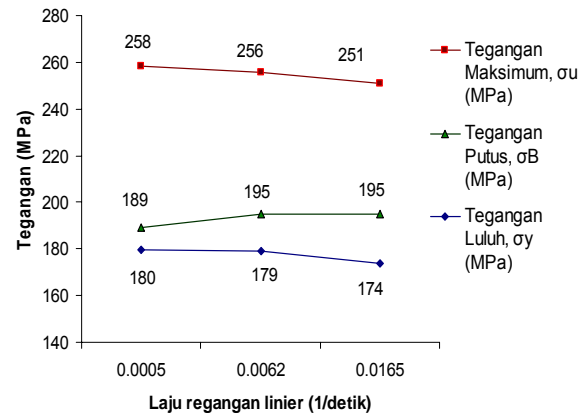
Setelah data diolah, hubungan antara engineering stress dan engineering strain adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Kurva Tegangan ( $S$ ) vs Regangan ( $e$ ) untuk ketiga variasi laju regangan linier.

## PEMBAHASAN

Agar lebih mudah dalam meninjau pengaruh laju regangan linier terhadap tegangan dan regangan, data penelitian diolah kembali dalam bentuk grafik (Gambar 4 dan Gambar 5) agar tren data nampak lebih jelas. Hal ini dirasa perlu mengingat perbedaan nilai kuantitatifnya tidak begitu besar.



Gambar 4. Pengaruh laju regangan linier terhadap tegangan ( $S$ ).

Dari Gambar 4 nampak bahwa peningkatan laju regangan linier akan menurunkan kekuatan tarik maksimum bahan. Penurunan tersebut mencapai 2,79 % dari laju regangan linier paling rendah (0,0005 detik<sup>-1</sup>). Pada tolak ukur yang lain, kekuatan tarik putus bahan meningkat sebesar 3,17 % serta kekuatan tarik luluh menurun 4,05 % dari kondisi pembebanan dengan laju regangan linier terendah. Hal ini menunjukkan bahwa laju regangan linier berpengaruh terhadap perilaku plastis bahan.

Secara sederhana hubungan tegangan dan regangan pada uji tarik pada kondisi plastis dapat dinyatakan dengan persamaan (4). Masalah timbul ketika disadari dalam pengujian dengan variasi laju regangan linier cukup sulit mengukur diameter benda uji (untuk mendapatkan nilai  $\sigma$ ) mengingat pada laju regangan linier tertinggi benda kerja putus hanya dalam waktu 21 detik (Gambar 2). Meskipun pada variasi yang lain cukup waktu untuk mengambil data, tanpa adanya data untuk laju regangan linier tertinggi akan menyebabkan komparasi seluruh variasi menjadi tidak memadai. Namun untuk menghitung konstanta  $K$  dan  $n$  dari persamaan (4) masih dapat dilakukan secara analitik. Nilai  $\epsilon$  tidak menjadi masalah karena *elongation* terukur secara cermat.

Pada bahan logam ulet, penyempitan lokal terjadi mulai pada beban maksimum. Apabila persamaan penyempitan lokal:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \quad (6)$$

digabungkan dengan persamaan (4) maka akan didapatkan (Dieter, 1992):

$$\epsilon_u = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = n \quad (7)$$

dengan  $\epsilon_u$  = true strain saat beban maksimum, sehingga:

$$\sigma_u = K \cdot \epsilon_u^n = K \cdot n^n$$

Karena  $\sigma_u$  juga dapat dinyatakan sebagai (Dieter, 1992):

$$\sigma_u = S_u \cdot e^{\epsilon_u}$$

maka:

$$S_u \cdot e^{\epsilon_u} = K \cdot n^n$$

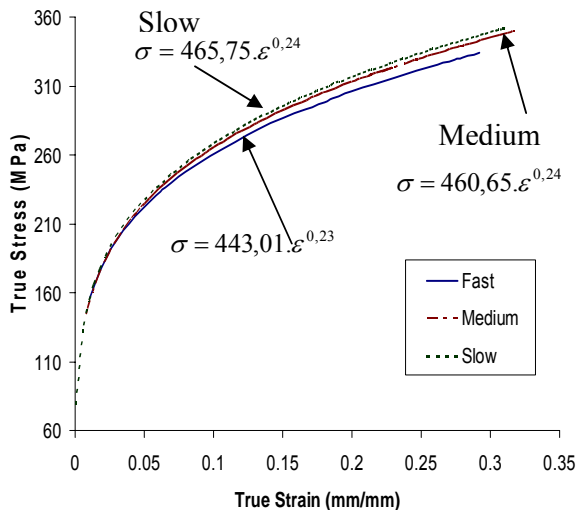
$$K = \frac{S_u}{\left(\frac{n}{e}\right)^n} \quad (8)$$

dengan  $e$  = bilangan natural = 2,718.

Berdasarkan persamaan (7) dan (8) maka diperoleh:

Tabel 3. Kalkulasi konstanta  $K$  dan  $n$  persamaan (4) ( $Gage\ Length = L_0 = 50\ mm$ )

Laju regangan linier (detik-1)	$S_u$ (MPa)	Elongation (mm)	$n = \epsilon_u$	$K$ (MPa)
0,0005	258,201	13,68	0,24	465,75
0,0062	255,918	13,59	0,24	460,65
0,0165	251,027	13	0,23	443,01

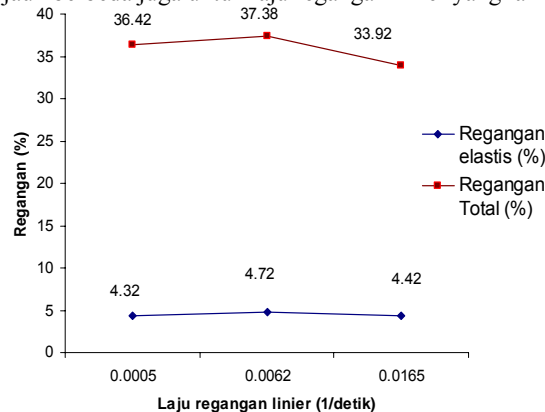


Gambar 5. Kurva *True Stress vs True Strain* untuk ketiga variasi laju regangan linier berdasarkan data pengujian dan parameter analitik pada Tabel 3.

Dari Tabel 3 diketahui bahwa peningkatan laju regangan linier menyebabkan penurunan nilai  $K$  dan nilai konstanta *strain hardening* ( $n$ ) relatif tetap. Konstanta  $K$  dapat juga disebut sebagai koefisien kekuatan (Dieter, 1992) sehingga penurunan nilai  $K$  menjelaskan mengapa kekuatan tarik dan kekuatan luluh bahan menurun. Karena data awal berupa  $L_0 = 50\ mm$  dan data pengujian berupa *elongation* dapat digunakan untuk menghitung  $\epsilon$  dan serta parameter

analitik pada Tabel 3 digunakan untuk menghitung  $\sigma$  maka kurva *True Stress vs True Strain* dapat digambar. Hasilnya nampak pada Gambar 5 yang juga dengan jelas menunjukkan pengaruh laju regangan linier terhadap tren dari *flow stress*,  $\sigma$ . Sebaliknya kekuatan tarik putus nampaknya lebih tergantung banyak aspek daripada sekedar koefisien kekuatan. Aspek – aspek tersebut meliputi sifat anisotropi bahan, ketangguhan bahan dan sebagainya sehingga memerlukan studi lebih komprehensif. Namun secara sederhana dapat dijelaskan bahwa meskipun energi kinetik dan energi potensial deformasi yang dibutuhkan adalah sama untuk semua variasi laju regangan, pola pemanfaatannya berbeda. Pada laju regangan linier yang rendah, energi kinetik lebih rendah daripada energi potensial deformasi. Masukan energi lebih banyak diubah menjadi energi potensial deformasi. Respon dinamik material berupa kluster tunggal patahan, dapat dibedakan dengan retak mikro terlokalisir pada laju regangan yang tinggi (Mastilovic *et al*, 2007). Dengan demikian besarnya energi potensial deformasi mengakibatkan bahan menyerap energi lebih banyak sebelum patah. Proses penyempitan lokal (*necking*) berlangsung lebih lama dan bahan akan patah pada titik dengan tegangan  $S$  yang lebih rendah dari kurva Kurva Tegangan vs Regangan (Gambar 3).

Meninjau bahwa konstanta  $n = 0$  untuk benda padat plastis ideal,  $n = 1$  untuk benda padat elastis dan  $n$  antara 0,1 hingga 0,5 pada bahan logam maka Tabel 3 menunjukkan bahwa benda yang diuji lebih menonjol sifat plastisnya. Pada Gambar 6 dapat dihitung bahwa regangan elastis hanya 13,03 % saja dari regangan total untuk laju regangan linier tertinggi (angka yang tidak jauh berbeda juga untuk laju regangan linier yang lain).



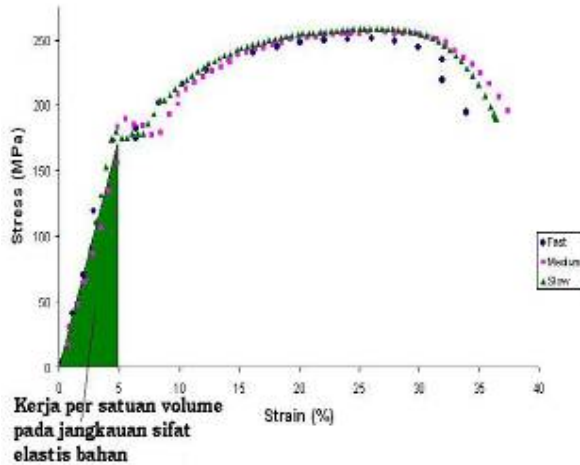
Gambar 6. Pengaruh laju regangan linier terhadap regangan ( $\epsilon$ ).

Dari Gambar 6 pada batas elastis bahan, perubahan regangan tidak signifikan yaitu hanya 0,1 % hingga 0,4 %. Meskipun data regangan pada batas elastis ini penting untuk perencanaan elemen mesin namun perubahan yang kecil tersebut tidak perlu dirisaukan.

Jika  $\dot{W}$  adalah kerja per satuan volume bahan atau luas daerah dibawah kurva tegangan vs regangan (Gambar

7),  $e_e$  regangan elastis serta  $S$  sebagai tegangan bahan tepat dibawah  $S_y$  (tegangan luluh) sesuai persamaan:

$$\dot{W} = \int_0^{e_e} S(e) de = \frac{1}{2} S e_e \quad (9)$$



Gambar 7. Kerja per satuan volume bahan pada batasan sifat elastis bahan.

maka  $\dot{W}$  relatif sama untuk semua variasi laju regangan linier yang diuji. Untuk jangkauan laju regangan linier dalam penelitian ini, pada daerah elastis, sifat bahan baja yang diuji independen terhadap laju regangan linier serta parameter tersebut tidak mempengaruhi transisi elastis plastis bahan. Mengingat bahwa pada daerah elastis hukum Hooke masih berlaku dan kemiringan kurva  $S = f(e)$  yaitu modulus elastisitas ( $E$ ) adalah sama atau konstan maka ketika persamaan:

$$S = E \cdot e \quad (10)$$

diturunkan terhadap waktu ( $t$ ) akan menjadi:

$$\frac{dS}{dt} = E \cdot \frac{de}{dt}$$

$$\dot{S} = E \cdot \dot{e} \quad (11)$$

Dengan demikian dapat dikatakan bahwa laju tegangan sebanding dengan laju regangan linier meskipun tegangan luluh menurun. Hal ini berani disimpulkan dengan melihat pola kemiringan dari Gambar 3 yang mirip untuk ketiga variasi laju regangan linier (berarti  $E$  konstan, independen terhadap  $\dot{e}$ ), perbedaan nilai  $e_e$  tidak signifikan serta bahwa tegangan luluh sudah bukan lagi tegangan pada batasan sifat elastis bahan.

Ditinjau dari regangan total, data menunjukkan selisih maksimal 3,46% dengan kecenderungan penurunan regangan dari laju regangan linier sedang ke laju regangan linier tinggi. Terhadap laju regangan linier rendah penurunan regangan pada laju regangan linier tinggi juga terjadi yaitu sebesar 2,5 %. Nilai kuantitatif tersebut relatif jauh lebih rendah dibandingkan dengan data Boyce dan Dilmore yang mencapai penurunan 10 %. Penyebabnya terletak pada jangkauan variasi *strain rate* yang digunakan. Boyce dan Dilmore menguji dari kondisi pembebanan quasi-statik hingga dinamik.

Membandingkan jangkauan Boyce dan Dilmore ( $0,0002 \text{ detik}^{-1}$  hingga  $200 \text{ detik}^{-1}$ ) dengan penelitian ini ( $0,0005$  hingga  $0,0165 \text{ detik}^{-1}$ ) dapat diperkirakan bahwa kondisi pembebanan yang digunakan tidak jauh dari kondisi pembebanan quasi-statik sehingga data penurunan regangan tidak menonjol.

Penurunan regangan total ini ketika dibandingkan dengan daerah elastis menunjukkan bahwa bahan baja dependen terhadap *strain rate* pada daerah plastis. Penyebabnya diduga karena ketangguhan retak diperlemah oleh *strain rate* (Boyce dan Dilmore, 2008). Mekanisme atau interaksi antara sifat ketangguhan dengan *strain rate* membutuhkan studi penelitian lebih lanjut.

## KESIMPULAN

Dari data hasil pengujian pengaruh *strain rate* pada uji tarik bahan baja 1045, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kekuatan tarik maksimum menurun 2,79 %, kekuatan (tarik) luluh menurun 4,05 % seiring dengan peningkatan laju regangan linier.
2. Kekuatan tarik putus meningkat 3,17 % dengan peningkatan laju regangan linier.
3. Perubahan regangan pada batas elastis bahan tidak signifikan (hanya 0,1 – 0,4 %). Kerja per satuan volume bahan relatif sama untuk semua variasi laju regangan linier yang diuji.
4. Regangan total bahan hanya turun 2,5 % pada laju regangan linier tinggi untuk jangkauan kondisi pembebanan quasi-statik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Triyono, ST dan Puji Priyana, SST untuk operasional mesin uji tarik serta Ir. And. Surjaka Isp., MT atas penyediaan fasilitas penelitian di Laboratorium Bahan Teknik Program Diploma Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Terima kasih juga disampaikan kepada komunitas pengembang perangkat lunak *open source* multimedia dengan produk Media Player Classic yang memungkinkan dilakukannya analisa gambar tiap detik interval waktu dengan mudah dan murah.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Boyce, B.L., Dilmore, M.F., 2008, The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from  $0.0002 \text{ s}^{-1}$  to  $200 \text{ s}^{-1}$ , *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier Ltd.
- [2] Chaléat et al, 2008, Properties of a plasticised starch blend – Part 2: Influence of strain rate, temperature and moisture on the tensile yield behaviour, *Journal of Carbohydrate Polymers*, Vol. 74, Elsevier Ltd., pp. 366 – 371.
- [3] Costa Mattos, H.S. et al, 2008, Modeling the superplastic behavior of Mg alloy sheets under tension using a continuum damage theory, *Journal of Materials and Design*, Vol. 7, Elsevier Ltd.

- [4] Deshpande, V.S., Evans, A.G., 2008, Inelastic deformation and energy dissipation in ceramics: A mechanism-based constitutive model, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 56, Elsevier Ltd., pp. 3077– 3100.
- [5] Dieter, G.E., 1992, *Mechanical Metallurgy*, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill, Inc.
- [6] Hoo Fatt, M.S., Ouyang, X., 2008, Three-dimensional constitutive equations for Styrene Butadiene Rubber at high strain rates, *Mechanics of Materials*, Vol. 40, pp. 1–16, Elsevier Ltd.
- [7] Mastilovic, S., et al., 2007, Ordering effect of kinetic energy on dynamic deformation of brittle solids, *Mechanics of Materials*, Vol. 40, Elsevier Ltd., pp. 407– 417.
- [8] Nee, Mike S., J.G., 1998, *Fundamentals of Tool Design*, Society of Manufacturing Engineers, 4<sup>th</sup> edition, p.25
- [9] Schaffer, J.P., et al, 1999, *The Science And Design of Engineering Materials*, 2<sup>nd</sup> edition, The McGraw-Hill Co., Inc., p.380
- [10] Shokrieh, M.M., Omid, M.J., 2008, Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under different strain rates, *Journal of Composite Structures*, Vol. 06, Elsevier Ltd.
- [11] Wang, Z.Q., et al., 2008, Plastic anisotropy in fcc single crystals in high rate deformation, *International Journal of Plasticity*, Elsevier Ltd.