



## Karakterisasi Sifat Mekanik Mild Steel St37 dan High Strength Steel CR420LA pada Laju Regangan Menengah

Leonardo Gunawan\*, Agustinus Dimas, Annisa Jusuf, Tatacipta Dirgantara, Ichsan Setya Putra

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung  
Gedung Labtek II Lantai 2, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia

\*Email: gun@ftmd.itb.ac.id

**Abstrak.** Untuk mendapatkan prediksi respon yang cukup akurat dalam analisis tabrakan kendaraan darat, dimana terjadi pembebanan dan deformasi struktur dalam waktu yang cepat, diperlukan data sifat mekanik material pada berbagai laju regangan. Makalah ini menyajikan pengukuran sifat mekanik *Mild Steel* St37 dan *High Strength Steel* CR420LA pada kondisi kuasi-statik dengan laju regangan  $0.001 \text{ s}^{-1}$  dan pada kondisi dinamik dengan laju regangan  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,  $1 \text{ s}^{-1}$ ,  $10 \text{ s}^{-1}$ , dan  $100 \text{ s}^{-1}$ . Dalam pengujian, data beban terhadap waktu direkam menggunakan *load cell*, sedangkan data perpindahan terhadap waktu diperoleh menggunakan ekstensometer untuk uji kuasi-statik dan menggunakan kamera kecepatan tinggi diikuti dengan perhitungan regangan berdasarkan metode Korelasi Citra Digital (KCD) untuk kondisi dinamik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa baja St37 dan CR420LA termasuk ke dalam jenis material yang sensitif terhadap laju regangan, dimana tegangan luluh material meningkat dengan naiknya laju regangan pada material.

**Kata kunci:** *dinamik; kuasi-statik; laju regangan menengah; uji tarik.*

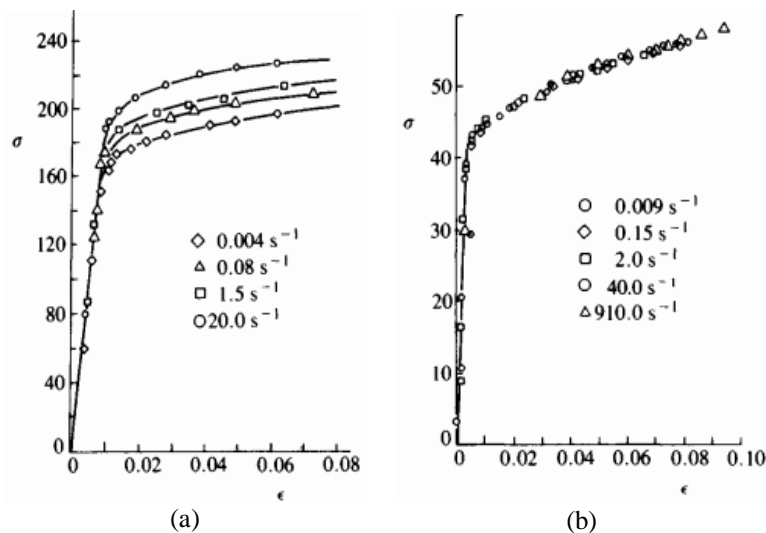
### 1 Pendahuluan

Dalam analisis struktur laik tabrak kendaraan darat, dimana selama tabrakan struktur kendaraan umumnya mengalami deformasi secara dinamik, diperlukan data sifat mekanik material pada laju regangan  $1 \text{ s}^{-1}$  hingga  $105 \text{ s}^{-1}$  [1] agar mendapatkan hasil prediksi respon struktur dengan tingkat akurasi yang baik. Pengujian sifat material hingga laju regangan  $100 \text{ s}^{-1}$  dapat dilakukan menggunakan mesin uji hidrolis sedangkan untuk laju regangan yang lebih tinggi biasanya digunakan sistem Split Hopkinson Bar [2]. Makalah ini melaporkan uji tarik uniaksial material *Mild Steel* St37 dan *High Strength Steel* CR420LA guna mendapatkan sifat mekanik kedua material tersebut pada laju regangan hingga  $100 \text{ s}^{-1}$ . Tiap material diuji pada kondisi kuasi-statik (laju regangan  $0.001 \text{ s}^{-1}$ ) untuk mendapatkan sifat dasarnya dan pada beberapa laju regangan menengah, yaitu  $0.1 \text{ s}^{-1}$ ,  $1 \text{ s}^{-1}$ ,  $10 \text{ s}^{-1}$ , dan  $100 \text{ s}^{-1}$ , untuk mengkaji efek laju regangan terhadap sifat mekanik dua material tersebut.

Semua uji tarik dilakukan di *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (KAIST), Korea Selatan. Uji kuasi-statik dilakukan menggunakan INSTRON STATIC UTM 5583 dengan kapasitas beban maksimum 150 kN dan kecepatan *cross head* maksimum  $8.3 \text{ mm s}^{-1}$ , sedangkan uji tarik dinamik dilakukan menggunakan *High Speed Material Testing Machine* (HSMTM) milik *Computational Solid Mechanics and Design* (CSMD) Laboratory dengan kapasitas beban maksimum 30 kN dan kecepatan *crosshead* maksimum  $7800 \text{ mm s}^{-1}$ .

## 2 Kurva Tegangan-Regangan dan Laju Regangan

Beberapa material memiliki sensitivitas terhadap laju regangan, yaitu menunjukkan respon yang berbeda ketika dibebani secara dinamik dengan laju regangan berbeda. Gambar 1 menunjukkan kurva tegangan-regangan hasil uji tekan untuk material yang sensitif terhadap laju regangan (titanium) dan yang tidak sensitif (aluminum). Perbedaan respon ini disebabkan oleh adanya slip yang muncul akibat gerak dislokasi dimana mekanisme ini dominan untuk aliran plastis pada material logam [3]. Jika pengaruh laju regangan tidak dimasukkan dalam analisis, maka prediksi kinerja struktur kendaraan yang didesain menjadi tidak akurat. Akibatnya penyerapan energi jika terjadi tabrakan tidak seperti yang telah dirancang dan dapat membahayakan penumpang kendaraan.

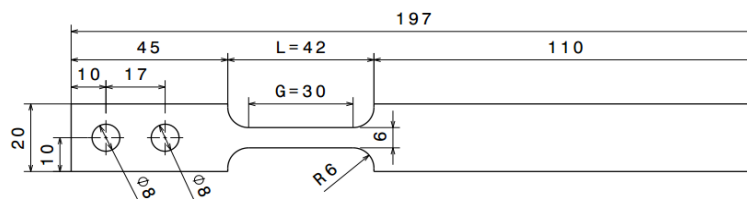


**Gambar 1** Kurva tegangan (ksi)-regangan hasil uji tekan dinamik untuk: (a) Titanium 6Al-4V dan (b) Aluminum 6061-T6 [4].

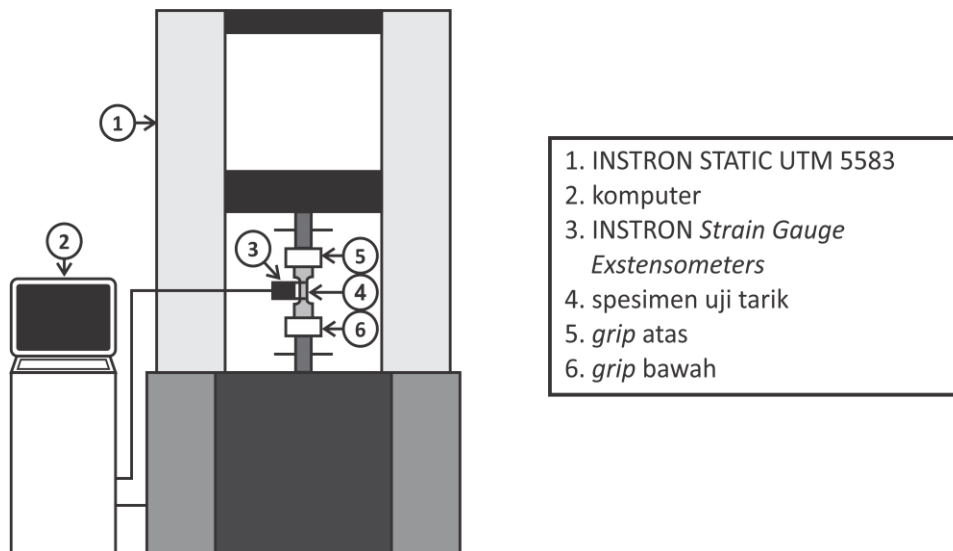
### 3 Prosedur Pengujian

#### 3.1 Spesimen

Ukuran spesimen uji tarik yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2. Spesimen dibuat mengikuti standar geometri yang dikembangkan oleh CSMD [5,6]. Ketebalan spesimen St37 adalah 1.15 mm dan untuk CR420LA 1.5 mm. Pada tiap laju regangan, pengujian dilakukan menggunakan 3 spesimen, kecuali pengujian material St37 pada laju regangan  $10 \text{ s}^{-1}$  yang menggunakan 6 spesimen. Pada awalnya semua spesimen dibuat di Indonesia, namun spesimen St37 kemudian dibuat ulang di Korea Selatan karena geometri spesimen St37 yang dibuat di Indonesia kurang baik dan dapat mempengaruhi hasil pengujian.



**Gambar 2** Ukuran spesimen uji tarik [5].



**Gambar 3** Mesin uji tarik kuasi-statik.

#### 3.2 Uji Tarik Kuasi-Statik

Gambar 3 menunjukkan *setup* eksperimen dimana spesimen dipasang pada *grip* atas dan bawah mesin uji tarik. Untuk mendapat laju regangan  $0.001 \text{ s}^{-1}$ , *upper*

*head* digerakkan ke atas dengan kecepatan  $0.03 \text{ mm s}^{-1}$ . Data gaya tarik dideteksi menggunakan *load cell* yang terpasang pada mesin, sedangkan pertambahan panjang spesimen diukur menggunakan INSTRON 25 mm *Strain Gauge Extensometers* yang dipasang di bagian tengah spesimen. Data gaya dan perpindahan kemudian diproses menjadi kurva *engineering stress-engineering strain*.

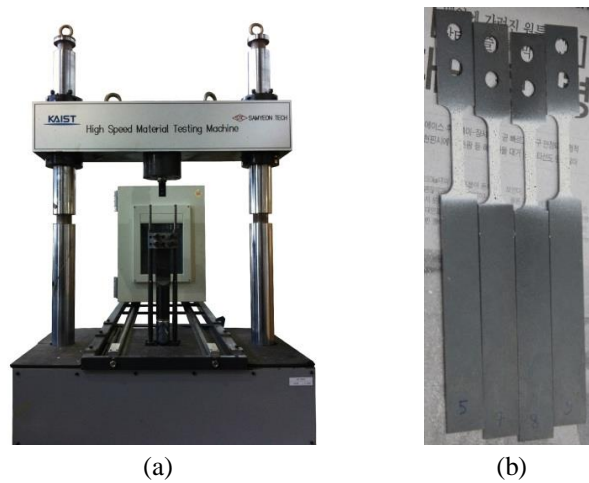
### 3.3 Uji Tarik Dinamik

Setup uji tarik dinamik ditunjukkan pada Gambar 4. Kecepatan *crosshead* mesin uji tarik diatur berdasarkan besar laju regangan dan geometri spesimen. Data beban terhadap waktu direkam menggunakan *load cell* yang terdapat pada mesin uji dan dicuplik dengan *sampling rate* yang cukup. Data perpindahan terhadap waktu diperoleh menggunakan kamera kecepatan tinggi Photron FASTCAM SA4. Untuk mengolah data perpindahan menjadi regangan, digunakan metode Korelasi Citra Digital (KCD). Untuk itu spesimen uji tarik dinamik dicat dengan latar belakang putih dan *speckles* hitam. Sebuah komputer digunakan untuk merekam dan mensinkronkan data beban dan kamera. Tabel 1 menunjukkan kecepatan, laju sampling data dan kecepatan kamera pada tiap pengujian.

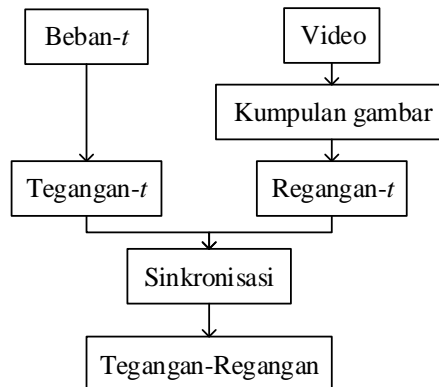
Data regangan terhadap waktu diperoleh dengan cara mengubah video menjadi gambar-gambar menggunakan perangkat lunak Phantom 630 dilanjutkan dengan menganalisa kumpulan gambar tersebut menggunakan perangkat lunak ARAMIS v6.3.0. Data tegangan terhadap waktu diperoleh dari data gaya tiap saat dibagi dengan penampang spesimen. Dengan melakukan sinkronisasi waktu terhadap data tegangan dan regangan, maka didapat kurva tegangan-regangan. Data yang didapat dari setiap proses yang dilakukan diilustrasikan oleh Gambar 5.

**Tabel 1** Pengaturan kecepatan, *sampling rate* data gaya dan kamera.

Laju regangan ( $\text{s}^{-1}$ )	Kecepatan ( $\text{mm s}^{-1}$ )	<i>Load cell</i> (data $\text{s}^{-1}$ )	Kamera (FPS)
0.1	3	1000	125
1	30	10000	1000
10	300	100000	5000
100	3000	500000	12500



**Gambar 4** (a) Mesin uji tarik dinamik dan (b) spesimen uji yang diberi speckles.



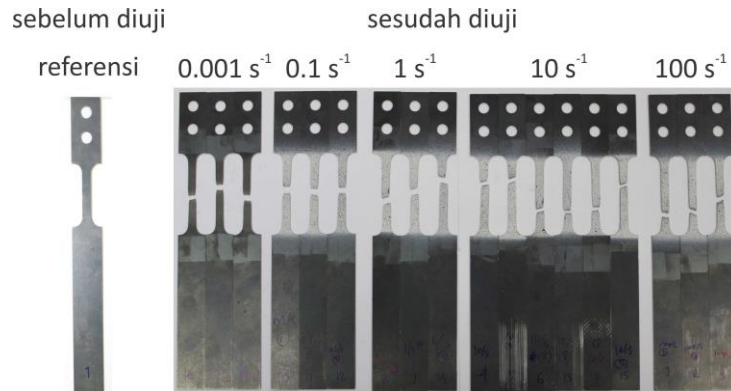
**Gambar 5** Urutan data dalam proses pembuatan kurva tegangan-regangan.

#### 4 Hasil dan Diskusi

Uji tarik dilakukan untuk semua spesimen hingga putus. Gambar 6 menunjukkan spesimen St37. Pada posisi paling kiri ditunjukkan contoh salah satu spesimen sebelum pengujian dan di sebelah lainnya semua spesimen setelah pengujian pada berbagai laju regangan. Gambar 7 menunjukkan hal yang sama untuk spesimen CR420LA. Dapat dilihat bahwa lokasi putus spesimen terjadi di daerah yang berbeda-beda.

Tabel 2 dan 3 menunjukkan luas penampang setiap spesimen yang didapat berdasarkan pengukuran lebar dan tebal spesimen pada 3 posisi: atas (U),

tengah (M), dan bawah (L) menggunakan jangka sorong. Perbedaan penampang spesimen aktual terhadap penampang spesimen rata-rata untuk St37 adalah maksimum 1.6% dan untuk CR402LA maksimum 4.6%. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas geometri spesimen cukup baik dan dapat diterima.



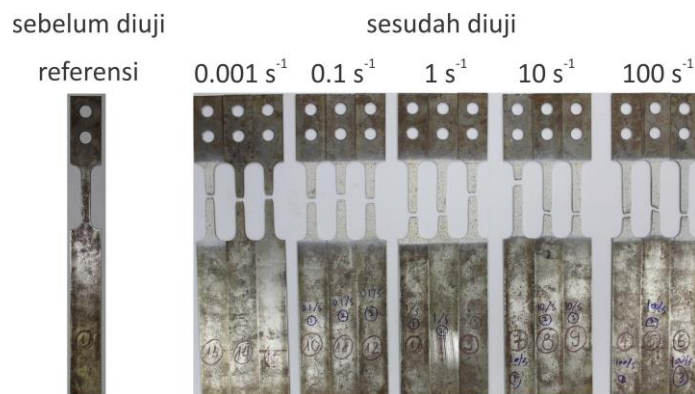
**Gambar 6** Spesimen St37 setelah uji tarik.

**Tabel 2** Luas penampang dan daerah putus spesimen St37.

No.	Spesimen	A (mm <sup>2</sup> )			Daerah Putus
		U	M	L	
1	MS-QS-1	6.90	6.90	<b>6.88</b>	M
2	MS-QS-2	6.90	<b>6.84</b>	6.85	M
3	MS-QS-3	<b>6.94</b>	6.95	6.95	M
4	MS-D0.1-1	<b>6.95</b>	6.96	6.96	M
5	MS-D0.1-2	<b>6.79</b>	6.81	<b>6.79</b>	M
6	MS-D0.1-3	<b>6.84</b>	6.88	6.88	M
7	MS-D1-1	<b>6.79</b>	6.83	6.84	M
8	MS-D1-2	<b>6.89</b>	6.90	6.90	M
9	MS-D1-3	6.93	<b>6.88</b>	6.89	U
10	MS-D10-	<b>6.93</b>	6.96	7.02	U
11	MS-D10-1	6.90	6.90	6.90	U
12	MS-D10-2	<b>6.95</b>	6.97	7.03	L
13	MS-D10-3	6.97	<b>6.96</b>	6.97	L
14	MS-D10-4	6.84	6.84	6.84	L
15	MS-D10-5	<b>6.83</b>	6.89	6.90	U
16	MS-D100-1	6.91	<b>6.89</b>	6.90	L
17	MS-D100-2	6.90	<b>6.89</b>	<b>6.89</b>	L
18	MS-D100-3	<b>6.89</b>	6.90	<b>6.89</b>	M

Penampang yang paling kecil untuk tiap spesimen ditandai dengan *font* tebal. Lokasi penampang minimum pada tiap spesimen kemudian dibandingkan dengan lokasi putus spesimen, dimana lokasi putus yang sesuai dengan lokasi penampang minimum dituliskan dengan *font* tebal. Terlihat bahwa

spesimen putus tidak selalu pada lokasi dengan penampang minimum. Untuk St37, hanya 6 dari 18 spesimen yang putus di daerah penampang minimum dan 12 sisanya tidak. Hal ini kemungkinan terjadi akibat pengaruh faktor lain seperti cacat mikroskopik, dudukan spesimen, atau pemasangan spesimen pada mesin uji. Untuk CR420LA, penampang spesimen lebih seragam seperti terlihat pada Tabel 3. Proses pemesinan spesimen CR420LA lebih baik daripada St37. Hal ini bisa menjelaskan lebih banyak kesesuaian antara lokasi putus dengan lokasi penampang minimum. 11 dari 15 spesimen putus di daerah minimum.



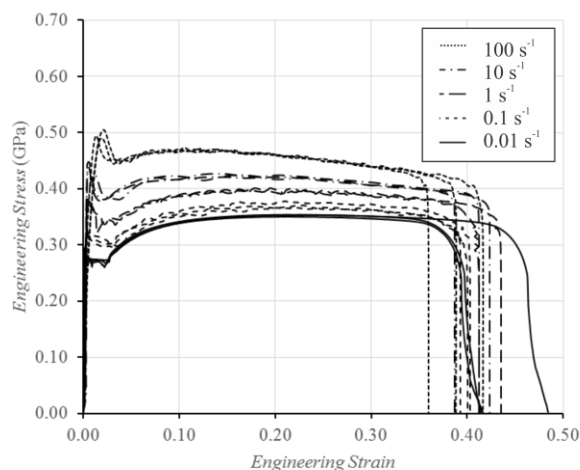
**Gambar 7** Spesimen CR420LA setelah uji tarik.

**Tabel 3** Luas penampang dan daerah putus spesimen CR420LA.

No	Kode Spesimen	A (mm <sup>2</sup> )			Daerah Putus
		U	M	L	
1	HSS-QS-1	<b>9.05</b>	9.06	<b>9.05</b>	M
2	HSS-QS-2	9.03	9.03	9.03	<b>M</b>
3	HSS-QS-3	<b>9.02</b>	9.05	9.05	M
4	HSS-D0.1-1	9.03	9.03	9.03	<b>M</b>
5	HSS-D0.1-2	9.05	<b>9.03</b>	<b>9.03</b>	<b>M</b>
6	HSS-D0.1-3	9.03	9.03	9.03	<b>M</b>
7	HSS-D1-1	9.06	9.06	9.06	<b>L</b>
8	HSS-D1-2	9.06	<b>9.05</b>	<b>9.05</b>	<b>L</b>
9	HSS-D1-3	<b>9.02</b>	9.03	9.05	M
10	HSS-D10-1	<b>8.65</b>	8.71	8.76	<b>U</b>
11	HSS-D10-2	9.03	9.03	9.03	<b>L</b>
12	HSS-D10-3	9.03	9.03	<b>9.02</b>	<b>L</b>
13	HSS-D100-1	9.05	<b>9.03</b>	9.05	L
14	HSS-D100-2	9.06	9.06	<b>9.05</b>	<b>L</b>
15	HSS-D100-3	9.05	9.05	9.05	<b>L</b>

Tidak semua pengujian menghasilkan data yang dapat diolah. Untuk spesimen St37 terdapat 4 spesimen yang datanya tidak dapat terekam akibat kegagalan perekaman video, kegagalan perekaman data gaya dan data yang jauh berbeda dibandingkan dengan data lainnya (*out-liar*). Untuk spesimen CR420LA, terjadi kegagalan perekaman video pada uji tarik dengan laju regangan  $1 \text{ s}^{-1}$  sehingga data untuk laju regangan ini tidak didapat.

Kurva *engineering stress-strain* untuk kondisi kuasi-statik dan dinamik ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9. Dari kurva yang untuk uji kuasi-statik, sifat dasar mekanik material St37 dan CR420LA dapat ditentukan, sebagaimana ditunjukkan berturut-turut pada Tabel 4 dan 5. Kedua tabel menunjukkan bahwa untuk kedua material didapat dua *yield strength*, *upper* ( $\sigma_{yu}$ ) dan *lower* ( $\sigma_{yl}$ ). Nilai *yield strength* yang lebih rendah dipilih sebagai acuan untuk mendapatkan prediksi respon struktur yang lebih konservatif. Kedua tabel juga menunjukkan bahwa sifat mekanik kedua material yang diperoleh konsisten, kecuali Modulus Young ( $E$ ) yang agak berbeda antara satu dengan lainnya. Untuk material St37, dengan merujuk pada data St37 hasil penelitian Santosa [7], didapat perbedaan Modulus Young antara 5%-20% dan perbedaan *yield strength* antara 5%-9%. Untuk CR420LA, perbedaan Modulus Young dengan referensi antara 12%-55% dan perbedaan *yield strength* antara 10%-12%.

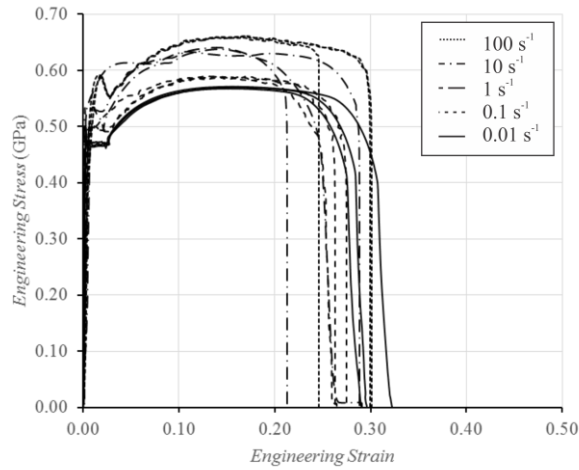


**Gambar 8** *Engineering stress-engineering strain* material St37 pada berbagai laju regangan.

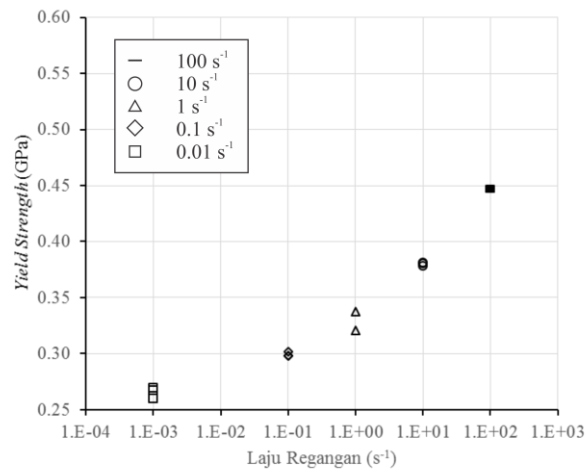
Selanjutnya, dengan membuat plot harga *yield strength* kedua material terhadap laju regangan (dalam skala logaritmik), dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11 bahwa *yield strength* material semakin tinggi dengan meningkatnya laju



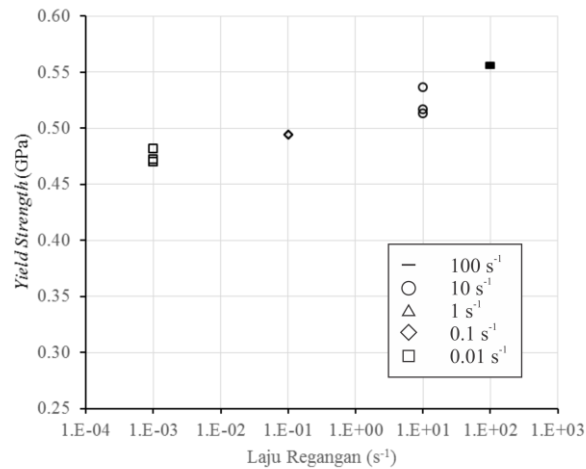
regangan. Kenaikan *yield strength* untuk St37 terlihat lebih besar dibandingkan dengan kenaikan *yield strength* CR420LA.



**Gambar 9** *Engineering stress-engineering strain* material CR420LA pada berbagai laju regangan



**Gambar 10** *Yield strength* St37 yang didapat pada berbagai laju regangan.



**Gambar 11** Yield strength CR420LA yang didapat pada berbagai laju regangan.

**Tabel 4** Sifat mekanik St37 (kuasi-statik).

Spesimen	$E$ (GPa)	$\sigma_{yu}$ (GPa)	$\sigma_{yl}$ (GPa)	$\sigma_u$ (GPa)	$\sigma_f$ (GPa)	$\epsilon_f$ (%)
MS-QS-1	222	0.29	0.27	0.35	0.24	0.46
MS-QS-2	240	0.29	0.27	0.35	0.25	0.40
MS-QS-3	210	0.30	0.26	0.35	0.24	0.39
RSt37 [7]	200		0.25			

**Tabel 5** Sifat mekanik CR420LA (kuasi-statik).

Spesimen	$E$ (GPa)	$\sigma_{yu}$ (GPa)	$\sigma_{yl}$ (GPa)	$\sigma_u$ (GPa)	$\sigma_f$ (GPa)	$\epsilon_f$ (%)
HSS-QS-1	309	0.49	0.47	0.57	0.40	0.31
HSS-QS-2	223	0.48	0.47	0.57	0.42	0.28
HSS-QS-3	250	0.50	0.46	0.57	0.40	0.28
Ref	200		0.42			

## 5 Kesimpulan

Efek laju regangan terhadap kekuatan *Mild Steel* St37 and *High Strength Steel* CR420LA telah dievaluasi menggunakan uji tarik. Sifat mekanik kedua material sensitif terhadap laju regangan, dimana kekuatan kedua material semakin tinggi dengan meningkatnya laju regangan yang dialami kedua material tersebut.

### **Acknowledgement**

Penelitian ini terselenggara berkat dukungan dana dari Direktorat Jendral Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Republik Indonesia melalui program Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi 2015-2016. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada Prof. Hoon Huh dari Computational Solid Mechanics and Design Laboratory-Korea Advanced Institute of Science and Technology (CSMD Lab-KAIST) yang telah memfasilitasi pengujian tarik kuasi-statik dan dinamik.

### **Referensi**

- [1] M. Macaulay, *Introduction to Impact Engineering*, London: Chapman and Hall Ltd, 1987.
- [2] J. D. Campbell, "Dynamic Plasticity: Macroscopic and Microscopic Aspects," *Materials Science and Engineering*, vol. 12, pp. 3-21, 1973.
- [3] J. D. Campbell, *Dynamic Plasticity of Metals*, Vienna and New York: Springer, 1972.
- [4] N. Jones, *Structural Impact*, Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [5] H. Huh, S. B. Kim, J. H. Song, J. H. Yoon, J. H. Lim and S. H. Park, "Investigation of Elongation at Fracture in a High Speed Sheet Metal Forming Process," *Steel Research International*, vol. 80, no. 5, pp. 316-322, 2009.
- [6] H. Huh, S.-B. Kim, J.-H. Song and J.-H. Lim, "Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-Type and DP-Type Steel Sheets for an Auto-Body," *International Journal of Mechanical Sciences*, no. 50, pp. 918-931, 2008.
- [7] S. P. Santosa, T. Wierzbicki, A. G. Hanssen and M. Langseth, "Experimental and Numerical Studies of Foam-Filled Sections," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, pp. 509-534, 2000.