

Perbandingan Karakteristik Hasil Uji *Split-Hopkinson Pressure Bar* antara Geometri Silinder dan Kubus

Muhammad Agus Kariem^{1,*}, Dini Adilah Prabowo¹ dan Iffah Faizah¹

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Insitut Teknologi Bandung - Bandung

*Korespondensi: kariem@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak. Metode *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) digunakan untuk mendapatkan karakteristik dinamis material, dengan spesimen uji silinder melalui proses pembubutan. Sementara, material dengan kekerasan yang tinggi sulit diproses menggunakan mesin bubut. Maka dari itu, untuk mendapatkan karakteristik dinamis pada material tersebut diperlukan bentuk spesimen uji yang berbeda. Dalam riset ini dilakukan simulasi numerik SHPB diameter 14,5 mm dari *maraging steel*, untuk spesimen dari HSS (*High Strength Steel*) berbentuk silinder maupun kubus. Digunakan berbagai dimensi spesimen dengan rasio *length-to-diameter* antara 0,25 hingga 1,5. Didapat kesamaan bentuk pada kurva tegangan-regangan spesimen silinder dan kubus serta harga regangan akhir, dengan variasi kecepatan yang berbeda.

Kata kunci: geometri spesimen kubus, geometri spesimen silinder, SHPB, karakteristik dinamis, HSS

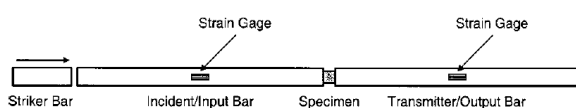
© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Metode *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan karakteristik dinamis material dengan mengukur perubahan sifat mekanik yang dapat bervariasi seiring dengan laju regangan yang diberikan [1]. Tujuan utama pengujian ini adalah untuk mendapatkan hubungan dasar antara tegangan, regangan, laju regangan, dan kondisi tegangan yang mempengaruhi sifat material.

Pada umumnya, teknik SHPB ini menggunakan spesimen uji silinder yang diletakkan diantara batang *input* dan batang *output* (gambar 1). Di mana spesimen uji yang digunakan diproduksi dengan proses pembubutan. Sementara dalam aplikasi teknik, salah satu material yang kini banyak digunakan adalah material dengan kekerasan yang tinggi (material HSS) yang sulit diproses dengan mesin bubut. Maka dari itu, untuk mendapatkan karakteristik dinamis pada material HSS diperlukan bentuk spesimen uji yang berbeda. Dalam hal ini, bentuk kubus dipilih untuk mewakili spesimen uji pada SHPB.

Riset ini membuktikan apakah dengan dua bentuk spesimen yang berbeda dapat diperoleh kurva tegangan-regangan yang sama, di mana parameter pengujian yang divariasikan adalah kecepatan impact. Diharapkan spesimen dengan rasio *length-to-diameter* yang sama dapat menghasilkan harga regangan akhir yang sama.



Gambar 1. Skema peralatan SHPB [2]

Dasar Teori

1. *Split-Hopkinson Pressure Bar*

Teknik *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) digunakan untuk pengujian material yang mencapai laju regangan 50 s^{-1} hingga 10^4 s^{-1} , melebihi kemampuan teknik kuasi-statik. Pengujian dengan SHPB dapat mencapai regangan melebihi 100% [3], dengan keberagaman laju regangan maksimum yang dapat dicapai.

Pengujian SHPB melibatkan empat komponen utama: batang *striker*, *pressure bar* berupa batang *input* dan batang *output*, serta spesimen uji. Faktor yang diutamakan dalam memilih *pressure bar* adalah batang tersebut harus tetap elastis selama eksperimennya, dan harus tegak lurus dengan sumbunya. Beberapa persyaratan dibuat agar prinsip gelombang regangan yang diterapkan untuk analisis SHPB diterima keabsahannya [2], yaitu sebagai berikut.

- Terdapat penjalaran gelombang satu dimensi di *pressure bar*.
- Permukaan penampang silang *pressure bar* tetap berorientasi bidang sepanjang waktu.
- Kesetimbangan tegangan di spesimen tercapai setelah periode "*ringing-up*".
- Spesimen uji tidak bersifat kompresibel.
- Digunakan asumsi gesekan dan efek inersia minimum.

2. Produksi Spesimen Uji

Secara umum spesimen uji SHPB yang berbentuk silinder diproduksi melalui proses sebagai berikut.

- Pembubutan material sesuai dimensi yang dibutuhkan.

b. Pemolesan untuk mencapai *surface roughness* yang diharapkan.

Pada spesimen dari material yang lebih kuat proses pembubutan menjadi lebih rumit. Spesimen dari material ini kemudian diproses melalui cara yang berbeda.

3. Analisis Gelombang Satu Dimensi

Pada pengujian SHPB, dihasilkan data berupa regangan terhadap waktu. Regangan diambil dari *strain gage* yang dipasang pada batang *input* dan batang *output*. Prinsip kesetimbangan gaya berlaku pada analisisnya sesuai asumsi yang diterapkan, di mana gaya pada *interface* spesimen-*pressure bar* adalah sama, sehingga berlaku:

$$P_1 = EA(\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t)) \quad (1)$$

$$P_2 = EA(\varepsilon_T(t)) \quad (2)$$

Dengan ekuivalensi kedua gaya tersebut dan dengan memanfaatkan perpindahan dan kecepatan kedua *interface* spesimen-*pressure bar*, didapat:

$$\varepsilon_s(t) = \pm \frac{2C_0}{l_0} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (3)$$

$$\sigma_s(t) = \pm E \left(\frac{A}{A_0} \right) \varepsilon_T(t) \quad (4)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_t(t) = \ln(1 + \varepsilon_s(t)) \quad (6)$$

$$\sigma_t(t) = \sigma_s(1 + \varepsilon_s(t)) \quad (7)$$

dimana,

P_1 : gaya penampang *interface* spesimen-batang *input*

P_2 : gaya penampang *interface* spesimen-batang *output*

ε_I : regangan *incident*

ε_R : regangan *reflected*

ε_T : regangan *transmitted*

C_0 : kecepatan gelombang batang

A : luas penampang batang

A_0 : luas penampang spesimen

ε_s : regangan teknik pada spesimen (*engineering strain*)

σ_s : tegangan teknik pada spesimen (*engineering stress*)

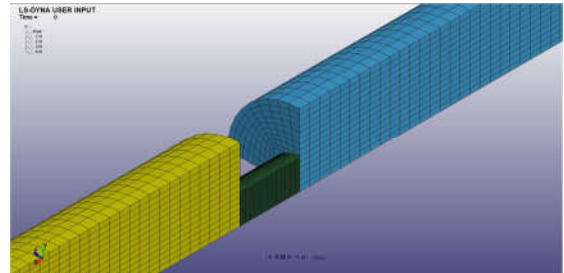
ε_t : regangan sebenarnya pada spesimen (*true strain*)

σ_t : tegangan sebenarnya pada spesimen (*true stress*)

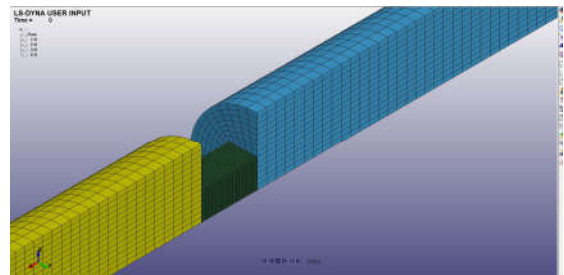
4. Pemodelan Elemen Hingga

Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak *LS-Dyna*[®] menggunakan komponen tiga dimensi seperempat bagian. Komponen yang dimodelkan berupa batang *striker*, *pressure bar* berupa batang *input* dan batang *output*, dan spesimen uji. Simulasi masing-masing geometri spesimen dilakukan pada enam rasio panjang

terhadap diameter (*length-to-diameter*, L/D), untuk spesimen silinder maupun kubus. Pada spesimen kubus berlaku rasio panjang terhadap sisi. Rasio yang dipakai adalah 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, dan 1,5, dengan nilai diameter (atau sisi pada kubus) tetap pada 6 mm. Ukuran *mesh* yang dipakai untuk komponen batang adalah 1 mm, dan untuk spesimen uji adalah 0,1 mm (gambar 2 dan 3).



Gambar 2. Pemodelan SHPB spesimen berbentuk silinder dengan rasio L/D 1,0



Gambar 3. Pemodelan SHPB spesimen berbentuk kubus dengan rasio L/D 1,0

5. Data Material

Permodelan dibuat dengan menggunakan dua jenis material berbeda yaitu (a) material *maraging steel* (AISI Grade 18Ni), untuk komponen batang *striker*, batang *input*, dan batang *output*, serta (b) material AISI 4340, untuk spesimen uji. Sifat mekanik material dijabarkan pada tabel 1 dan 2. Selain itu, pada spesimen uji juga diterapkan parameter model *simplified Johnson-Cook* (tabel 3) untuk merepresentasikan karakteristik material pada laju regangan tinggi.

Tabel 1. Sifat mekanik material *maraging steel* (AISI Grade 18Ni) [3]

Sifat material	Simbol	Nilai	Satuan
Rapat jenis	ρ	8000	Kg/m ³
Modulus elastisitas	E	190	GPa
Rasio poisson	ν	0,3	-

Tabel 2. Sifat mekanik material AISI 4340 [5]

Sifat material	Simbol	Nilai	Satuan
Rapat jenis	ρ	7850	Kg/m ³
Modulus elastisitas	E	210	GPa
Rasio poisson	ν	0,29	-

Tabel 3. Konstanta material Johnson-Cook untuk AISI 4340 [6]

A (MPa)	B (MPa)	n	C
2100	1750	0,65	0,0028

6. Validasi Model Elemen Hingga

Validasi model elemen hingga dilakukan pada semua simulasi dengan membandingkan nilai regangan *incident* hasil simulasi terhadap nilai regangan hasil perhitungan teoretik. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{v}{2C_0} \tag{8}$$

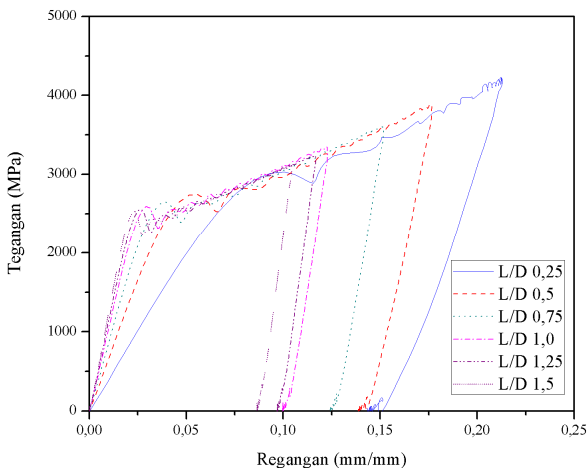
Permodelan dianggap benar jika nilai regangan hasil simulasi mendekati nilai regangan teoretik.

7. Parameter Pengujian

Pada penelitian ini simulasi awal dilakukan dengan kecepatan impact 30 m/s untuk kedua geometri dan semua variasi rasio L/D. Setelah didapat kurva tegangan-regangan, hasil dari simulasi pada spesimen kubus dibandingkan terhadap spesimen silinder, kemudian simulasi diulang untuk spesimen kubus agar setiap hasilnya memiliki nilai regangan akhir yang sama dengan hasil simulasi spesimen silinder. Waktu simulasi diatur hingga 600 μs sesuai kebutuhan jumlah data regangan.

Hasil dan Diskusi

Simulasi awal dilakukan pada spesimen silinder dengan kecepatan impact 30 m/s, menghasilkan kurva tegangan-regangan sebagai berikut (Gambar 4).



Gambar 4. Kurva tegangan-regangan spesimen silinder dengan kecepatan 30 m/s

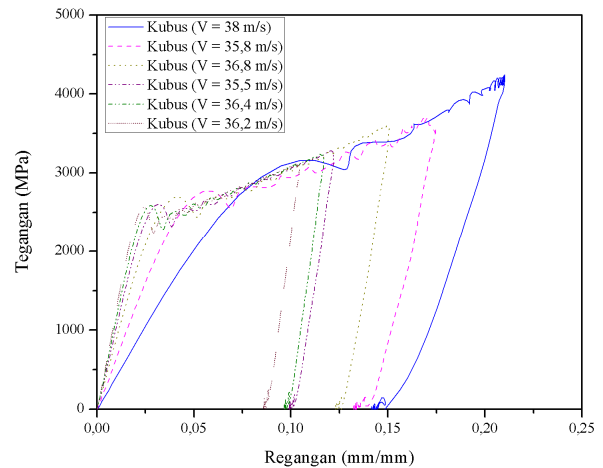
Simulasi menggunakan spesimen kubus dengan kecepatan impact 30 m/s menunjukkan nilai regangan akhir yang berbeda dengan simulasi pada spesimen silinder, dengan rasio L/D yang sama. Untuk menyamakan nilai regangan akhir ini, kecepatan impact ditambah pada simulasi spesimen

kubus. Kecepatan yang memberi hasil yang sesuai ditunjukkan oleh tabel 4.

Tabel 4. Kecepatan impact spesimen kubus yang memberi nilai regangan akhir yang diinginkan

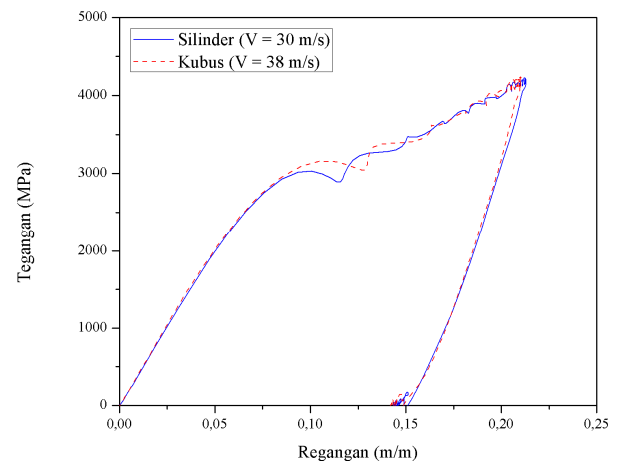
Rasio L/D	Kecepatan (m/s)	Laju Regangan (s ⁻¹)
0,25	38,0	1884,41
0,5	35,8	1555,03
0,75	36,8	1328,04
1	35,5	1055,71
1,25	36,4	1005,92
1,5	36,2	890,645

Menggunakan kecepatan tersebut, didapat kurva tegangan-regangan untuk spesimen kubus sebagai berikut (gambar 5).

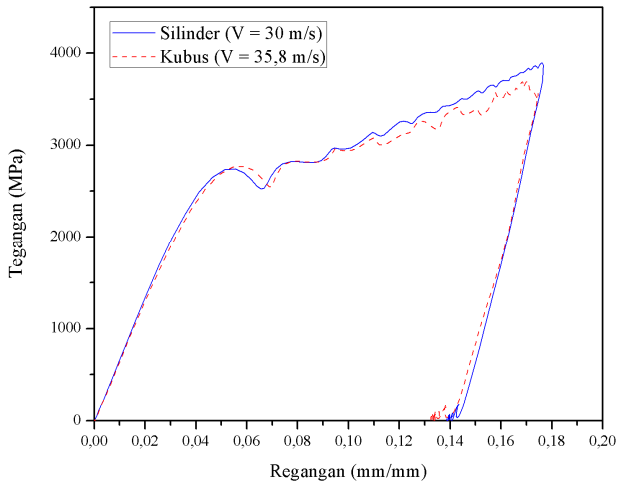


Gambar 5. Kurva tegangan-regangan spesimen kubus dengan kecepatan yang disesuaikan

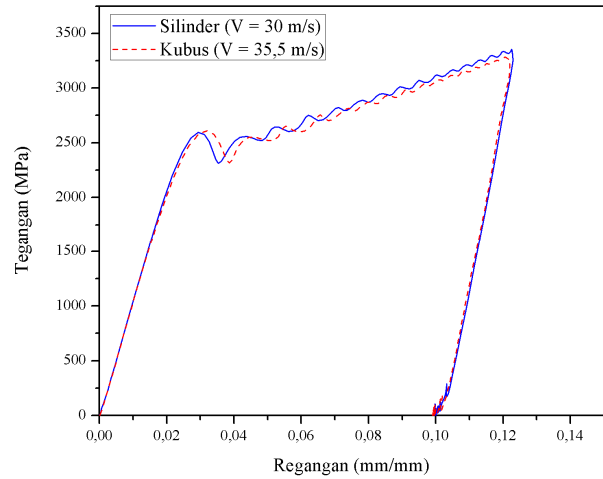
Jika dibandingkan antara geometri kubus dan silinder pada rasio L/D yang sama dengan kecepatan yang berbeda, maka didapatkan nilai regangan akhir yang sama seperti ditunjukkan pada gambar 6 hingga gambar 11.



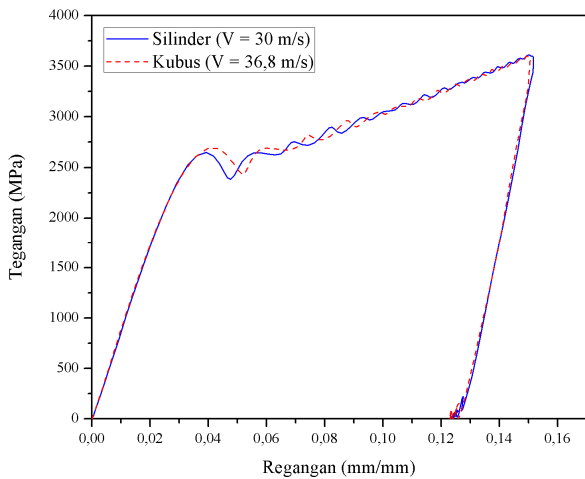
Gambar 6. Kurva tegangan-regangan spesimen silinder dan kubus rasio L/D 0,25 dengan regangan akhir yang sama



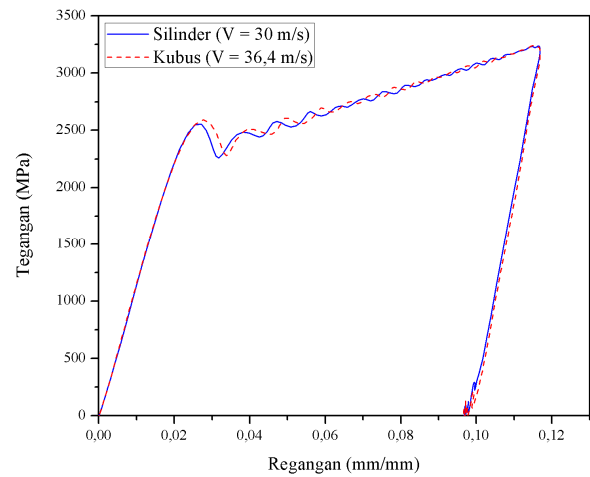
Gambar 7. Kurva tegangan-regangan spesimen silinder dan kubus rasio L/D 0,5 dengan regangan akhir yang sama



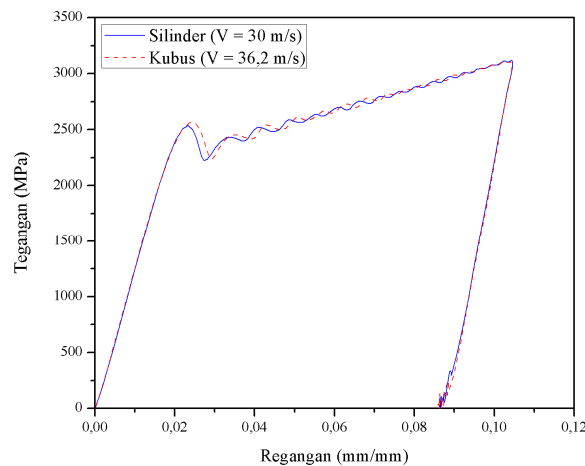
Gambar 9. Kurva tegangan-regangan spesimen silinder dan kubus rasio L/D 1 dengan regangan akhir yang sama



Gambar 8. Kurva tegangan-regangan spesimen silinder dan kubus rasio L/D 0,75 dengan regangan akhir yang sama



Gambar 10. Kurva tegangan-regangan spesimen silinder dan kubus rasio L/D 1,25 dengan regangan akhir yang sama



Gambar 11. Kurva tegangan-regangan spesimen silinder dan kubus rasio L/D 1,5 dengan regangan akhir yang sama

Tampak pada kurva tegangan-regangan di atas bahwa ada rasio L/D spesimen tertentu yang memberi hasil kurang baik, dilihat dari perubahan signifikan tegangan luluh serta peningkatan tegangan maksimum dan regangan akhir. Maka, dimensi spesimen uji yang dinilai baik dalam pe-

nelitian ini adalah spesimen dengan rasio L/D > 0,75.

Gambar 4 dan 5 menunjukkan bahwa semakin kecil rasio L/D spesimen akan menghasilkan regangan akhir yang semakin besar. Selain itu, pada tabel 4 terlihat bahwa semakin kecil rasio L/D

spesimen dibutuhkan laju regangan yang semakin besar untuk mendeformasi spesimen. Dengan tidak ditemukannya hubungan antara perubahan rasio L/D spesimen dengan kecepatan dampak yang dibutuhkan, membuktikan tidak dapat diprediksinya nilai kecepatan tersebut tanpa melakukan simulasi numerik.

Dengan tercapainya regangan akhir yang sama, maka penggunaan spesimen kubus dinilai mampu menggantikan spesimen silinder, jika proses manufaktur untuk spesimen silinder sulit dilakukan.

Kesimpulan

Hasil dari simulasi yang dilakukan pada riset ini menunjukkan bahwa kurva karakteristik material (tegangan-regangan) dapat dihasilkan dengan profil yang sama antara geometri silinder dan kubus dengan kecepatan yang diberikan untuk geometri kubus disesuaikan. Di mana energi dampak yang dibutuhkan untuk mendeformasi geometri kubus lebih besar dibandingkan dengan geometri silinder. Dengan begitu spesimen kubus dapat menggantikan spesimen silinder dalam pengujian SHPB apabila spesimen silinder dengan material yang dibutuhkan sulit untuk diproses, dengan ketentuan kecepatan dampak yang digunakan disesuaikan agar hasil pengujiannya menyerupai hasil pengujian pada spesimen silinder. Untuk itu perlu dilaksanakan simulasi numerik sebelum pengujian langsung agar diketahui nilai kecepatan yang sesuai.

Referensi

- [1] S. Nemat-Nasser, 2000. "Introduction to High Strain Rate Testing," in *ASM Metals Handbook Vol 8 - Mechanical Testing and Evaluation*, University of California, San Diego, p. 939.
- [2] B. A. Gama, S. L. Lopatnikov and J. W. Gillespie Jr, "Hopkinson Bar Experimental Technique: A Critical Review".
- [3] S. Nemat-Nasser, J. B. Isaacs and J. E. Starret, 1991. "Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments," *Proceedings of The Royal Society*, vol. A, pp. 371-391.
- [4] M. A. Kariem and D. Ruan, 2017. "Improving The Split-Hopkinson Pressure Bar Testing Tech," Swinburne University of Technology, Melbourne.
- [5] B. U. Australia, "4340 High Tensile Steel," Bohler Uddeholm Australia Pty Ltd, [Online]. Available: <http://www.ssm.co.nz/sitefiles/4340.pdf>.

[Accessed 19 Juni 2017].

- [6] G. T. Gray III, S. R. Chen, W. Wright and M. F. Lopez, 1994. "Constitutive Equation for Annealed Metals Under Compression at High Strain Rates and High Temperatures," Los Alamos National Laboratory Report, Los Angeles.