

Simulasi Numerik Perilaku Tumbukan Pelat Baja Terhadap Proyektil

Ismoyo Haryanto, Rusnaldy, Prasetyo Adi Prabowo, Achmad Widodo, Toni Prahasto

Jurusan Teknik Mesin, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang, 50275
E-mail: ismoyo_h@undip.ac.id, pras_ady@yahoo.com

Abstrak

Simulasi numerik tiga dimensi untuk mempelajari ketahanan balistik pada target ulet yang bertumbukan dengan proyektil normal telah dilakukan. Pada penelitian ini target pelat baja Weldox 460 E dengan tebal 12 mm dimodelkan bertumbukan dengan proyektil berhidung tumpul dengan diameter 20 mm. Permasalahan simulasi numerik ini dilakukan dengan menggunakan kode elemen hingga ABAQUS-Explicit. Sedangkan perilaku *thermoviscoplastic* material pelat target ditentukan dengan pendekatan model Johnson-Cook. Selanjutnya perilaku homogen ini digabungkan dengan kriteria kegagalan Johnson-Cook untuk memprediksi proses perforasi. Dibandingkan dengan hasil observasi eksperimental pemodelan simulasi numerik dalam penelitian ini memberikan hasil dengan tendensi yang sesuai berkenaan dengan kegagalan *plugging* dalam penetrasi balistik.

Keywords: ketahanan balistik, model Johnson-Cook, perforasi, *plugging*, *thermoviscoplastic*

Pendahuluan

Masalah yang terkait dengan tumbukan telah menjadi topik penelitian yang cukup banyak selama beberapa dekade. Upaya yang intensif telah dilakukan untuk memahami fenomena yang terjadi selama penetrasi balistik [1-7]. Sejauh ini, investigasi eksperimental sudah mengalami kemajuan yang signifikan dalam upaya memahami perforasi normal pelat logam. Akan tetapi karena kompleksitas dan biaya yang berkaitan dengan percobaan balistik untuk mendasari semua studi terkait tumbukan sangat mahal maka pendekatan matematis digunakan sebagai pelengkap guna mengurangi kebutuhan eksperimental agar menjadi semurah mungkin.

Sejumlah model analitis telah diusulkan selama bertahun-tahun, namun karena kompleksitas dan banyaknya permasalahan terkait dengan peristiwa tumbukan sering membatasi penggunaan secara umum solusi analitis ini. Oleh karena itu kecenderungan penelitian mengarah pada penggunaan pendekatan dengan metode numerik menjadi semakin luas. Meskipun demikian, studi numerik yang melibatkan tumbukan dan penetrasi persenjataan masih sedikit ditemukan dalam literatur, meskipun metode elemen hingga (FEM) telah diadopsi sebagai alat umum dalam sebagian besar penelitian. Kondisi ini disebabkan karena solusi yang diperoleh dari FEM tidak memiliki akurasi yang dapat diandalkan untuk mendeskripsikan materi dan perhitungan kegagalan selama perforasi [8]. Menurut

Belytschko [8] simulasi FEM yang melibatkan geometri dengan ketidakstabilan material yang dikombinasikan dengan diskontinuitas dalam ruang dan waktu masih sangat sulit untuk dikomputasikan.

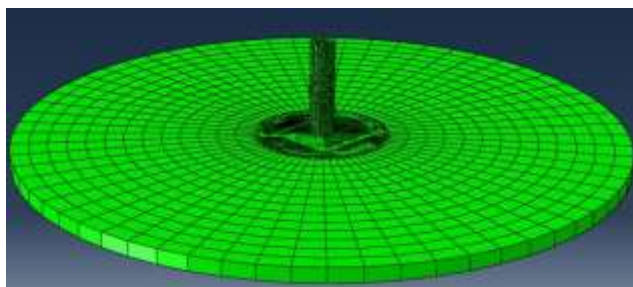
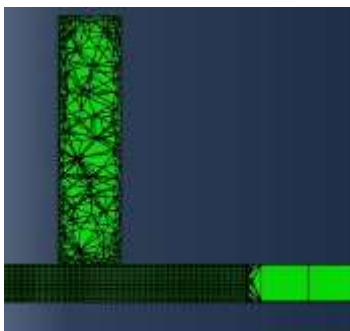
Penelitian ini dimaksudkan untuk melakukan simulasi numerik guna mempelajari perilaku pelat baja yang bertumbukan dengan proyektil berhidung tumpul. Hasil yang diperoleh diharapkan mampu membuat kemajuan dalam rangka memahami fenomena fisik yang diperlukan untuk mengendalikan masalah penetrasi. Data-data eksperimental digunakan untuk memvalidasi apakah model komputasi *viscoplasticity* dan kerusakan ulet dapat digunakan untuk prediksi numerik respon target saat penetrasi.

Metode Analisis

Analisis dilakukan dengan Simulasi Numerik Menggunakan FEM (ABAQUS-Explicit). Simulasi numerik dibuat berdasarkan susunan eksperimen yang diusulkan oleh Borvik dkk [9]. Pada eksperimen tersebut proyektil ditembakkan dengan pistol gas terkompresi langsung pada pelat baja dengan ketebalan $h = 12$ mm dan diameter eksternal $\phi = 500$ mm [9][10]. Dalam kasus ini hanya tumbukan normal $\theta = 90^\circ$. Proyektil yang digunakan dari jenis hardened Arne tool-steel yang memiliki kekuatan yang tinggi dibandingkan dengan pelat untuk mengurangi deformasi plastis proyektil. Proyektil berhidung tumpul dan memiliki diameter $\phi_{\text{proyektil}} = 20$ mm dan massa $m \approx 196$ g.

Meshing pada pelat menggunakan elemen kontinum 3D (C3D8R). Di daerah dekat zona tumbukan mesh dibuat sangat halus, namun untuk mengurangi waktu

komputasi pada zona pinggiran pelat meshing dibuat agak kasar. Pada tumbukan normal sejumlah 20 elemen diberikan pada ketebalan target sedangkan elemen di daerah tengah target yang berkontak langsung dengan proyektil sebanyak 197900 elemen. Di luar daerah tengah tersebut jumlah elemennya berjumlah 819 elemen sedangkan pada arah ketebalan tidak diberi elemen dengan tujuan untuk mengurangi waktu komputasi. Mesh pada wilayah tengah dan luar dihubungkan dengan mesh transisi dengan elemen kontinum (C3D4) berjumlah 29164 buah. Adapun pada proyektil digunakan elemen kontinum (C3D4) dengan jumlah 7564 elemen. Gambaran tentang meshing ini ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah.



Gambar 1. Pendefinisian mesh yang digunakan dalam simulasi numerik.

Proyektil yang digunakan didefinisikan bersifat elastis dengan tegangan luluh (yield stress) $\sigma_y = 1900$ MPa, modulus Young $E_p = 204$ GPa, ratio Poisson $\nu_p = 0.33$ dan massa jenis $\rho = 7850$ kg/m³ [10]. Karakteristik ini memungkinkan mampu mengurangi deformasi plastis pada proyektil. Kontak antara proyektil dan pelat didefinisikan dengan *penalty contact algorithm* dan *hard contact model*. Keduanya tersedia dalam ABAQUS-Explicit [11]. Opsi “hard contact” memungkinkan untuk menyesuaikan secara otomatis kekakuan (*stiffness*), yang dihasilkan oleh “*penalty contact algorithm*”, untuk meminimalkan penetrasi tanpa merugikan interval waktu. Dalam simulasi ini nilai koefisien gesek yang digunakan adalah berharga 0 (untuk proyektil berhidung tumpul) [12].

Penentuan Kecepatan Sisa

Untuk menentukan kecepatan sisa V_r dengan parameter tertentu dari plug dan proyektil digunakan pers berikut:

$$V_r = a \sqrt{V_0^2 - V_{bl}^2} \quad (5)$$

$$a = \frac{m_p}{m_p + m_{pl}} \quad (6)$$

di mana a adalah rasio massa, m_{pl} adalah massa plug, m_p adalah massa proyektil, V_0 adalah kecepatan awal proyektil sedang V_{bl} adalah kecepatan balistik.

Hasil dan Diskusi

Hasil simulasi menggunakan ABAQUS-Explicit pada permasalahan tumbukan antara pelat material Weldox 460 E yang berdiameter 500 mm dan ketebalan 12 mm dengan proyektil hardened Arne tool-steel yang berdiameter 20 mm dan panjang 80 mm disajikan pada Tabel 1. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa dari simulasi 3D menggunakan ABAQUS-Explicit didapatkan kecepatan balistik V_{bl} antara tumbukan pelat-proyektil adalah 224.7 m/s. Hasil tersebut dituangkan dalam grafik pada Gambar 2. Dari hasil grafik tersebut menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kecepatan awal proyektil V_0 maka kecepatan sisa dari proyektil tersebut akan meningkat pula.

Tabel 1. Hasil simulasi numerik 3D menggunakan ABAQUS-Explicit

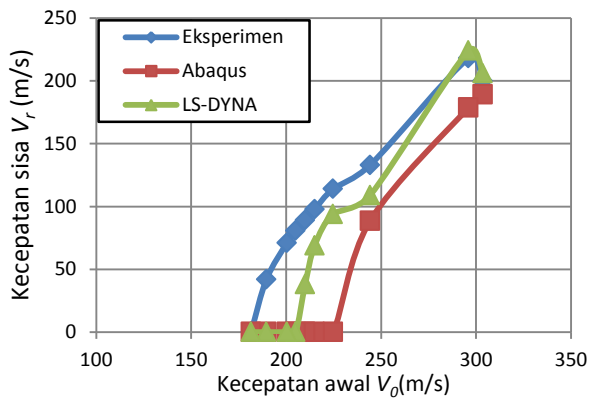
V_0 (m/s)	m_p (gr)	m_{pl} (gr)	a (rasio massa)	V_r (m/s)
303.5	195.9	14.934	0.929	189.26
296.0	195.9	14.803	0.930	178.82
285.4	195.9	13.663	0.935	164.13
244.2	195.9	13.899	0.934	88.63
225.0	195.9	13.669	0.935	0

Data yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan data eksperimen Borvik dkk. [13]. Pada Ref. [13] Borvik melaporkan bahwa dari eksperimen yang telah dilakukan ia mendapatkan kecepatan balistiknya V_{bl} sebesar 181.5 m/s. Selain itu juga terdapat data hasil simulasi LS-DYNA sebagai pembanding data eksperimen Borvik. Pada Ref. [13] dinyatakan bahwa kecepatan batas balistik V_{bl} yang di hasilkan oleh LS-Dyna yaitu 205 m/s, atau melebihi sekitar 10 % dari data eksperimen. Secara lengkap perbandingan ketiga hasil tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi numerik dan eksperimen.

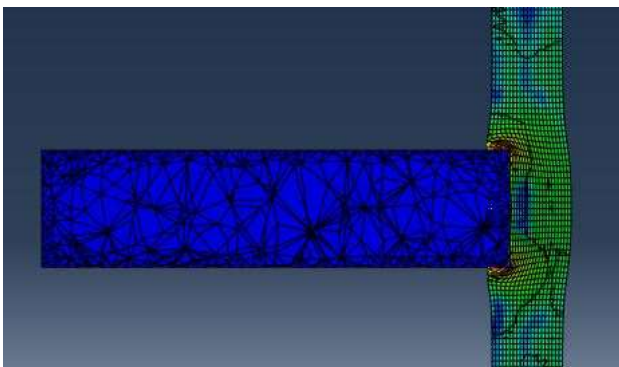
Vo (m/s)	Vr (m/s)		
	Eksperimen	LS-DYNA	ABAQUS
303.5	200	206	189.26
296.0	218	224	178.82
244.2	133	109	88.63
224.7	114	94	0
215.0	98	69	-
210.0	89	38	-
205.0	81	0	-
200.4	71	-	-
189.6	42	-	-
181.5	0	-	-

Secara grafis perbandingan pada Tabel 2 diatas diberikan pada Gambar 2. Dari grafik tampak bahwa dengan meningkatnya kecepatan awal proyektil V_0 maka kecepatan sisa proyektil juga akan meningkat. Dari Gambar 2 juga tampak bahwa kecepatan balistik yang diperoleh dari simulasi 3D ABAQUS-Explicit itu melebihi sekitar 22% dibanding kecepatan balistik eksperimen.

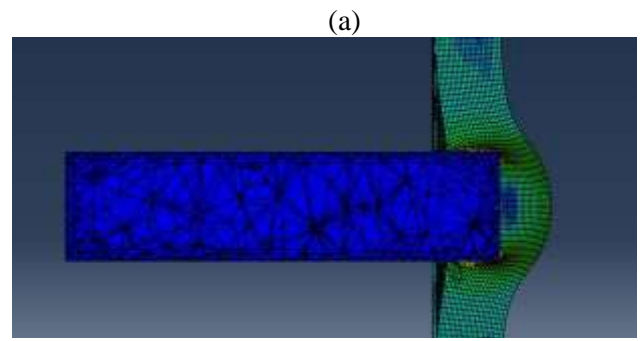


Gambar 2. Perbandingan data Eksperimen dengan LS-DYNA dan ABAQUS-Explicit.

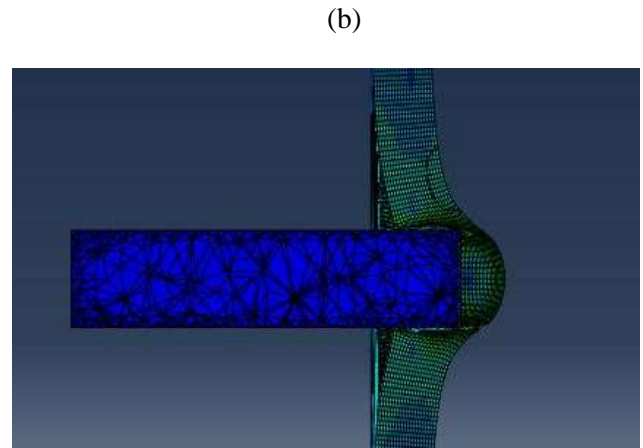
Pada Gambar 3 dan 4 berikut disajikan hasil simulasi 3D ABAQUS-Explicit dari waktu ke waktu pada kecepatan 303.5 m/s.



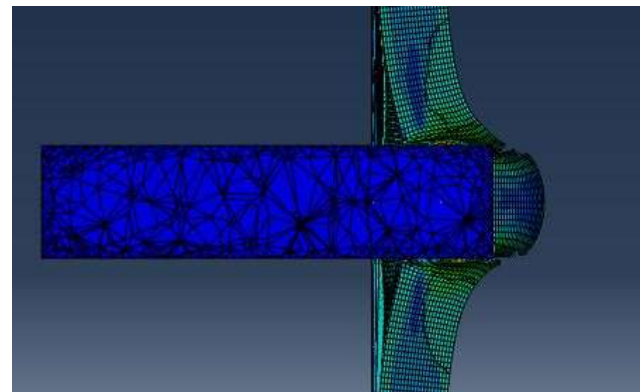
time: 0.01 s



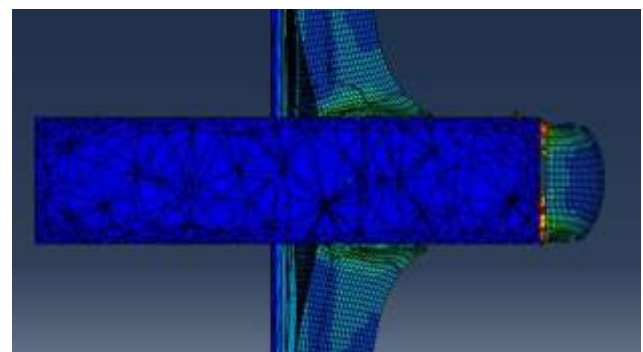
time: 0.04 s



time: 0.06 s

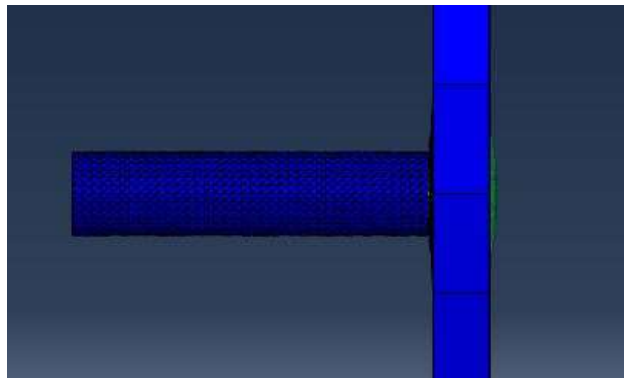


time: 0.07 s



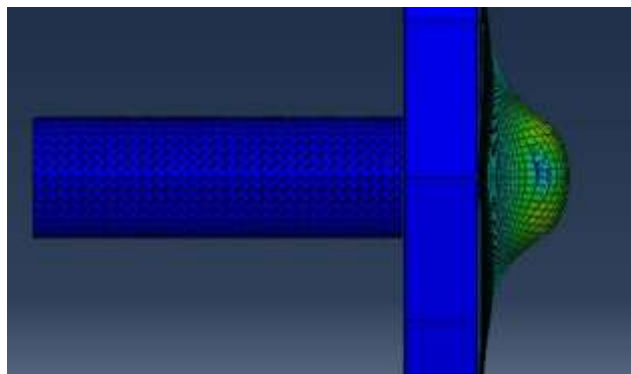
time: 0.14 s

Gambar 3. Simulasi numerik proses perforasi pelat untuk proyektil berhudung tumpul dengan kecepatan $V_0 = 305.5$ m/s pada kondisi dibelah.



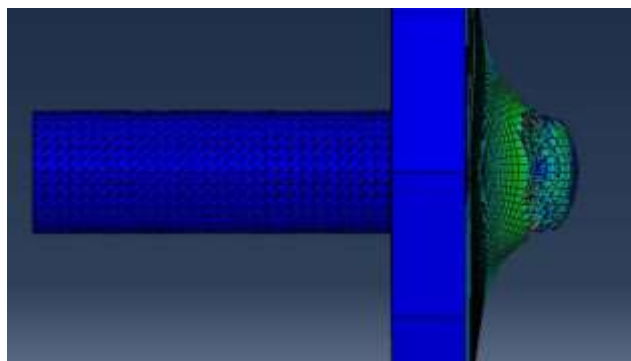
time: 0.01 s

(a)



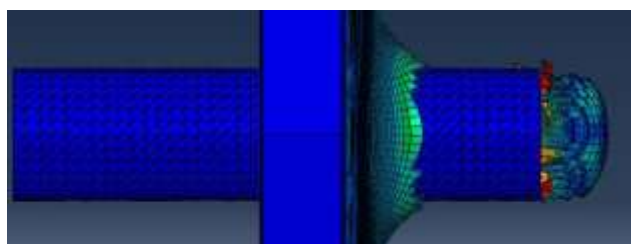
time: 0.06 s

(b)



time: 0.07 s

(d)



time: 0.14 s

(e)

Gambar 3. Simulasi numerik proses perforasi pelat untuk proyektil berhidung tumpul dengan

kecepatan $V_0 = 305.5$ m/s pada kondisi utuh.

Kesimpulan

Simulasi numerik 3D untuk mempelajari ketahanan balistik pada target ulet yang bertumbukan dengan proyektil normal telah dilakukan. Sebagai kaji kasus digunakan pelat baja Weldom 460 E dengan tebal 12 mm. Pelat tersebut dimodelkan bertumbukan dengan proyektil berhidung tumpul dengan diameter 20 mm. Permasalahan simulasi numerik ini dilakukan dengan menggunakan kode elemen hingga ABAQUS-Explicit. Hasil yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan Borvik dkk. [13].

Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa hasil kecepatan sisa proyektil meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan awal proyektil. Sekalipun hasil simulasi memberikan kesesuaian tendensi dengan hasil eksperimen namun kecepatan batas balistik yang diperoleh dari simulasi 3D ABAQUS-Explicit melebihi sekitar 22% dari kecepatan batas balistik hasil eksperimen. Kesalahan yang masih cukup besar ini dikarenakan keterbatasan ABAQUS-Explicit mengingat lisensi program tersebut yang tersedia di Jurusan Teknik Mesin Undip adalah versi untuk student.

Referensi

- [1] Backman M.E., Goldsmith W., The mechanics of penetration of projectiles into targets. *Int J Engng Sci*, 1978,16: 1-99.
- [2] Corbett GG, Reid SR, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectile. *Int J Impact Engng* 1996; 18(2):141-230.
- [3] Anderson Jr CE, Bodner SR. Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling. *Int J Impact Engng*,1988; 7(1): 9-35.
- [4] Zukas JA et al. *Impact dynamics*. Florida: Krieger, 1992.
- [5] Zukas JA, et. al., *High velocity impact dynamics*, New York: Wiley, 1990.
- [6] Brown S.J., Energy release protection for pressurized systems - review of studies into impact/terminal ballistics. *Appl. Mech Rev.*, 1986, 39: 177-201.
- [7] Jonas GH, Zukas JA. Mechanics of penetration: analysis and experiment. *Int J Engng Sci*, 1978, 16: 879-903.

[8] Belytschko T. On difficulty levels in non linear finite element analysis of solids. Bull Int Assoc. Comput. Mech., 1996, (2), 6-8.

[9] Borvik T, Langseth M, Hopperstad OS, Malo KA. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat hemispherical and conical noses Part I: experimental study. Int J Impact Engng., 2002, 27:19–35.

[10] Borvik T, Langseth M, Hopperstad OS, Malo KA. Ballistic penetration of steel plates. Int J Impact Engng 1999;22:855–86.

[11] Hibbitt HD, Karlsson BI, Sorensen P. Abaqus User's manual, ABAQUS/EXPLICIT 6.5, 2005.

[12] Borvik T, Langseth M, Hopperstad OS, Malo KA., Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part II: Numerical study. Int J Impact Engng. 2002, 27:37–64.

[13] Borvik T, Langseth M, Hopperstad OS, Malo KA., Ballistic penetration of steel plates. Int J Impact Engng, 1999, 22: 855–86.