

## ANALISA KECEPATAN SISA PROYEKTIL BERHIDUNG TUMPUL YANG DITEMBAKKAN PADA BAJA WELDOX 460 E

\*Prasetyo Adi Prabowo<sup>1</sup>, Ismoyo Haryanto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: [prasetyoadi21@gmail.com](mailto:prasetyoadi21@gmail.com)

### Abstrak

Pengujian balistik dimaksudkan untuk mengetahui fenomena yang terjadi akibat penetrasi peluru pada suatu material target. Pada saat ini pengembangan uji balistik ditujukan untuk merancang suatu material anti peluru agar mampu mereduksi semaksimal mungkin energi peluru yang dihasilkan oleh proses penembakan. Pada penelitian ini simulasi numerik tiga dimensi dilakukan untuk mempelajari ketahanan balistik pada target ulet yang bertumbukan dengan proyektil dengan tumbukan normal. Pelat target baja Weldox 460 E dengan diameter 500 mm dan tebal 12 mm disimulasikan bertumbukan dengan proyektil hardened Arne tool steel berhidung tumpul berdiameter 20 mm dan panjang 80 mm dengan kecepatan awal tumbukan antara 185 sampai 303.5 m/s. Permasalahan simulasi numerik ini diselesaikan menggunakan kode elemen hingga Abaqus-*Explicit*. Untuk menentukan perilaku *thermoviscoplastic* dari material pelat target digunakan model Johnson-Cook. Perilaku homogen ini telah digabungkan dengan kriteria kegagalan Johnson-Cook untuk memprediksi proses perforasi. Hasil simulasi numerik tiga dimensi berupa kecepatan batas balistik selanjutnya dibandingkan dengan kecepatan batas balistik dari hasil eksperimen dan simulasi numerik dua dimensi LS-DYNA. Ditemukan bahwa kecepatan batas balistik simulasi tiga dimensi melebihi 22.7% terhadap hasil eksperimen dan 10.73% terhadap simulasi dua dimensi LS-DYNA. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan untuk mempelajari dan menggunakan *Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) adaptive meshing* pada simulasi Abaqus agar hasilnya dapat diharapkan mendekati hasil eksperimen.

**Kata kunci:** Simulasi numerik, Penetrasi, Tumbukan, Batas Balistik, Perforasi.

### Abstract

*Ballistic test was conducted for studying the penetration phenomenon of a given bullet at a target material. At this time the development of ballistic tests are intended for collecting data as a design base of bulletproof material which is able to reduce the maximum energy generated by the bullet in a shooting process. In this study, three-dimensional numerical simulations were conducted to study the ballistic resistance of ductile targets due to normal impact of projectile. Weldox 460 E steel plate with 500 mm diameter and 12 mm thickness is collided by hardened Arne tool steel blunt-nosed projectile with diameter of 20 mm and length of 80 mm with an initial velocity between 185 to 303.5 m/s. The numerical simulation of this problem have been performed using finite element code i.e. Abaqus-Explicit. To define the thermoviscoplastic behavior of the material constituting the plate, the Johnson-Cook model has been used. This homogeneous behavior has been coupled with the Johnson-Cook fracture criterion to predict completely the perforation process. The results showed that comparing to the experimental results and the results of numerical simulations of two-dimensional LS-DYNA the ballistic limit velocity of present three-dimensional simulation exceeds 22.7 % and 10.73 %, respectively. For further studies it is suggested to implement the Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) adaptive meshing in simulation using subsequent Abaqus simulation that the result is closer to the experimental results.*

**Keywords:** Numerical simulations, Penetration, Impact, Ballistic Limit, Perforation.

## 1. PENDAHULUAN

Pengujian balistik merupakan pengujian yang bertujuan untuk melihat fenomena peluru yang ditembakkan pada pelat target sehingga dapat mengetahui karakteristik peluru. Kemudian dapat dikembangkan material anti peluru yang dapat mereduksi energi dari proses penembakan semaksimal mungkin. Material yang digunakan dalam uji balistik adalah logam dan non logam yang ringan namun mahal harganya. Pada saat ini para peneliti berlomba mencari material non baja yang ringan dan mampu menahan tumbukan dan penetrasi dari peluru. Karena teknologi material belum secanggih negara-negara lain dan di Indonesia baja mudah diperoleh dengan harga relatif murah dan sifat sangat

bervariatif, maka sebaiknya pengujian balistik di awali dengan menggunakan material baja. Se jauh ini observasi eksperimental mengalami kemajuan yang signifikan. Namun karena rumit dan biaya yang sangat mahal dan hasil percobaan tidak optimal dalam pengujian balistik, maka diperlukan solusi untuk mengatasi permasalahan ini.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan pendekatan numerik atau sering disebut metode elemen hingga (*finite element method*) yaitu metode penyelesaian dengan membagi objek yang rumit menjadi bagian kecil dan sederhana. Pendekatan numerik pada permasalahan balistik ini adalah penggambaran distribusi tegangan-regangan pada material yang mengalami pembebanan *impact*. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui distribusi tegangan-regangan pada material yang mengalami pembebanan *impact* sehingga dapat dapat diketahui dimensi optimal untuk mengurangi kegagalan dan mencapai rancangan terbaik. Kelebihan dari simulasi numerik adalah kita dapat memvariasikan parameter-parameter seperti jenis material, properti material, dimensi pelat target dan peluru serta biaya yang lebih murah dan hasil yang optimal.

Kebanyakan simulasi numerik pada permasalahan uji balistik menggunakan pemodelan dua dimensi dan jarang menggunakan pemodelan tiga dimensi. Oleh karena itu penulis mencoba untuk menganalisa permasalahan uji balistik tersebut dengan menggunakan pemodelan tiga dimensi dengan bantuan *software* Abaqus 6.10-1 untuk menganalisa kecepatan sisa yang terjadi pada proses penetrasi dan perforasi peluru terhadap pelat target.

## 2. METODOLOGI

### 2.1 Flow Chart Penelitian

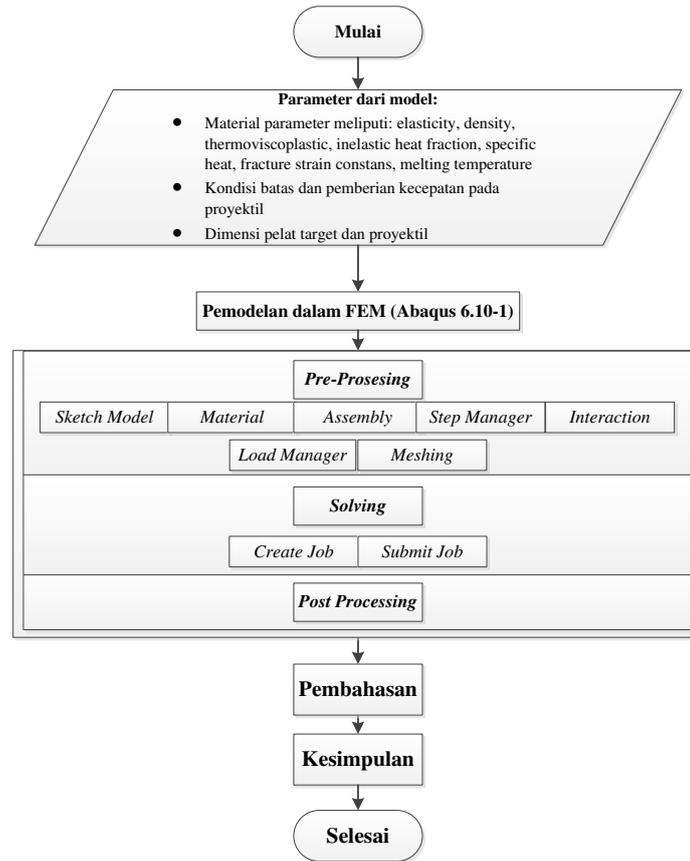
Dalam sebuah penelitian diperlukan diagram alir untuk menggambarkan bagaimana jalannya proses penelitian tersebut mulai dari awal hingga akhir yang dilakukan. Pada Gambar 1 adalah diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

### 2.2 Flow Chart Pemodelan dalam Abaqus 6.10-1

Berikut ini adalah *flowchart* pemodelan simulasi dalam Abaqus 6.10-1 dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Flow chart pemodelan dalam Abaqus 6.10-1.

### 2.3 Teori Johnson-Cook

Material solid pada awalnya akan mengalami respon elastis ketika sebuah beban mengenainya. Namun, ketika mengalami beban *shock* yang ekstrim, maka material tersebut akan mengalami tegangan yang melebihi *yield stress* sehingga terjadi deformasi secara plastis. Teori ini mewakili perilaku kekuatan bahan yang mengalami regangan yang besar, laju regangan dan temperatur yang tinggi. Perilaku tersebut timbul dalam masalah pembebanan karena kecepatan tumbukan yang tinggi. Dalam model ini, nilai tegangan tergantung pada regangan, laju regangan dan temperatur. Perumusan dari model Johnson-Cook didefinisikan dalam tegangan seperti persamaan berikut ini.

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}^p, \dot{\bar{\epsilon}}^p, T) = [C_1 + C_2(\bar{\epsilon}^p)^n] \left[ 1 + C_3 \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right] [1 - T^{*m}] \quad (1)$$

dimana,  $C_1$  adalah *yield stress*,  $C_2$  adalah konstanta material,  $C_3$  adalah *strain rate sensitivity*,  $n$  adalah *hardening parameter*,  $m$  adalah *temperature sensitivity parameter*,  $\bar{\epsilon}^p$  adalah regangan,  $\dot{\bar{\epsilon}}^p$  = laju regangan,  $\dot{\epsilon}_0$  adalah *lower limit of the constitutive relation*,  $T^*$  adalah *homologous temperature* yaitu  $(T - T_{\text{room}}) / (T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})$ . Pernyataan pada kurung pertama menyatakan bahwa tegangan sebagai fungsi dari regangan ketika  $\bar{\epsilon}^p = 1.0 \text{ sec}^{-1}$  dan  $T^* = 0$  (yaitu untuk percobaan laboratorium pada temperatur kamar). Pernyataan pada kurung kedua dan ketiga menyatakan efek dari laju regangan dan temperatur masing-masing [1].

### 2.4 Johnson-Cook Fracture Model

Model ini dibangun dengan cara yang sama dengan model Johnson-Cook. Dalam hal ini terdiri dari tiga istilah independen yang menentukan yaitu regangan patah dinamis sebagai fungsi dari laju tekanan, laju regangan dan temperatur. Johnson-Cook menyatakan bahwa *fracture strain* didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$\bar{\epsilon}_f^p = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 + D_5 T^*] \quad (2)$$

$D_1$ - $D_5$  adalah *fracture criterion constants*,  $\sigma^* = \sigma_m / \bar{\sigma}$  adalah *stress triaxiality ratio* dimana  $\sigma_m$  adalah tegangan rata-rata dan  $\bar{\sigma}$  adalah persamaan tegangan dari model Johnson-Cook serta  $T^*$  adalah *homologous temperature*. Pernyataan pada kurung pertama menyatakan bahwa regangan patah sebagai fungsi dari tekanan. Pernyataan pada kurung kedua

menyatakan bahwa regangan patah sebagai fungsi dari *strain rate*. Sedangkan pernyataan pada kurung ketiga menyatakan bahwa regangan patah sebagai fungsi dari temperatur [1].

## 2.5 Kecepatan Batas Balistik ( $V_{bl}$ )

Kecepatan batas balistik adalah batas kecepatan minimum dimana peluru mampu melakukan perlubangan penuh pada pelat target [2]. Kecepatan balistik setiap parameter berbeda-beda, semua tergantung dari jenis peluru, kecepatan tembak, jarak tembak, sudut tembak ketebalan material target, dan parameter-parameter lainnya.

## 2.6 Kecepatan Sisa ( $V_r$ )

Kecepatan sisa ini adalah kecepatan peluru setelah peluru tersebut melakukan perlubangan. Kecepatan sisa disini menunjukkan besarnya energi yang diserap oleh material target. Menurut teori Ipson-Richert [2] kecepatan sisa dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$V_r = \frac{m_p}{m_p + m_{pl}} \sqrt{v_i^2 - v_{bl}^2} \quad (3)$$

Dimana  $m_p$  adalah massa peluru,  $m_{pl}$  adalah massa material lepas (*plugging*,  $v_i$  adalah kecepatan awal peluru,  $v_{bl}$  adalah kecepatan batas balistik).

## 2.7 Peluru dan Pelat Target

Peluru yang digunakan berbentuk silinder berhidung tumpul dengan diameter 20 mm, panjang 80 mm dan massa 0.197 kg, bermaterialkan hardened Arne tool steel memiliki *modulus Young*  $E_p = 204000$  MPa, *poisson ratio*  $\nu_p = 0.33$ ,  $\rho = 7850$  kg/m<sup>3</sup>, *yield stress*  $\sigma_y = 1900$  MPa [3]. Material ini memiliki kekerasan 550 HV [4]. Material ini dipilih karena sering dipelajari dan beberapa hasil eksperimen dari material ini telah diterbitkan [5], yang memungkinkan untuk divalidasikan dengan hasil numerik. Dan juga telah diamati selama ini jenis tumbukan proyektil-pelat (logam-logam) [6] bahwa bentuk hidung proyektil yang digunakan mengubah energi yang diserap, modus kegagalan dan batas balistik [6]. Hal ini dilaporkan dalam [6] bahwa proyektil tumpul pada kecepatan tumbukan rendah lebih baik untuk perlubangan penuh pelat karena modus kegagalan.

Pelat target berdiameter 500 mm dan tebal 12 mm dengan material Weldox 460 E yang merupakan baja berstruktur *rolled ferritic* memiliki kekuatan (*strength*) yang tinggi dikombinasikan dengan daktilitas (*ductile*) yang tinggi  $\bar{\epsilon}_{max}^p \approx 1$  [6]. *Yield stress* dari baja Weldox 460 E sekitar  $\sigma_y \approx 500$  MPa dengan *failure stress*  $\bar{\sigma}_{failure} \geq 1$  GPa. Material ini memiliki nilai kekerasan 180-190 HV [4]. Material ini dipilih karena sering dipelajari dan beberapa hasil eksperimen dari material ini telah diterbitkan, yang memungkinkan untuk divalidasikan dengan hasil numerik. Untuk mendefinisikan analitis seperti ini pada perilaku *thermoviscoplastic*, beberapa pendekatan digunakan, yaitu pendekatan fisik atau formulasi *phenomenological*. Dalam kasus ini, model Johnson-Cook (JC) dan model fraktur Johnson-Cook (JC) digunakan untuk menggambarkan perilaku tersebut, dan diamati pada kecepatan tumbukan tinggi karena memperhitungkan tingkat sensitivitas regangan yang tinggi, deformasi yang besar dan pelunakan (*softening*) termal. Berikut ini disertakan material properties dari proyektil dan pelat target pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Properti material dari proyektil [7]

Material	Young modulus (Mpa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield stress (Mpa)	Plastic Strain
hardened Arne tool steel	204000	0.33	7850	1900	0.0215

Tabel 2. Properti material dari pelat target baja Weldox 460 E [6]

Elasticity		Thermoviscoplastic behavior					
$E$ (GPa)	$\nu$ (-)	$C_1$ (MPa)	$C_2$ (MPa)	$n$ (-)	$\dot{\epsilon}_0$ (s <sup>-1</sup> )	$C_3$ (-)	$m$ (-)
200	0.33	490	807	0.73	$5 \times 10^{-4}$	0.012	0.94

Other physical constants				
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\beta$ (-)	$C_p$ (J/kgK)	$T_m$ (K)	$T_{transition}$ (K)
7850	0.9	452	1800	293

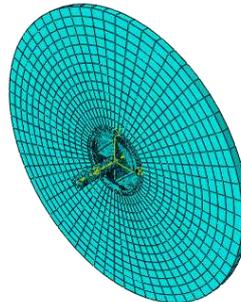
  

Fracture criterion constans				
$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
0.0705	1.732	-0.54	-0.0123	0

## 2.8 Spesifikasi Masalah

Simulasi numerik telah didasarkan pada set-up eksperimen diusulkan oleh Borvik dkk [5]. Gambaran dari eksperimennya ialah menembakkan proyektil dengan pistol gas terkompresi, langsung pada pelat baja yang dijepit pada sisi ketebalannya. Dalam kasus ini hanya tumbukan normal  $\theta = 90^\circ$ . Hal ini jelas, seperti yang telah dilaporkan dalam literatur bahwa peristiwa sudut pelat-proyektil  $\theta$  mempengaruhi modulus kegagalan secara langsung, batas balistik dan kekuatan penetrasi [6]. Selama pengujian eksperimental tumbukan awal dan kecepatan sisa diukur dengan menggunakan perangkat laser optik [5]. Dengan menggunakan kamera berkecepatan tinggi pada peristiwa perforasi, dan direkam memungkinkan untuk memperkirakan kecepatan proyektil selama perforasi [5]. Teknik ini memungkinkan untuk memperkirakan modulus kegagalan. Hasil eksperimen yang diperoleh dengan teknik ini dipublikasikan dalam literatur dan merupakan acuan yang sering digunakan untuk memvalidasi semua jenis aplikasi. Kecepatan tumbukan selama percobaan bervariasi dari  $185 \leq V_0 \leq 303.5$  m/s memungkinkan untuk menentukan batas balistik untuk bentuk hidung tumpul.

*Meshing* dari target dilakukan dengan elemen kontinum 3D (C3D8R) menggunakan pengurangan integrasi selama integrasi titik tunggal. *Mesh* sangat halus dekat dengan zona tumbukan, namun, dalam rangka untuk mengurangi waktu komputasi, dibuat agak kasar pada pinggiran pelat target. Pada tumbukan normal, 20 elemen diberikan pada ketebalan target sepanjang daerah tengah target yang berkontak langsung dengan proyektil dengan jumlah elemennya yaitu 197900 elemen. Di luar daerah tengah tersebut, tidak diberi elemen pada ketebalan target yang bertujuan untuk mengurangi waktu komputasi, dengan jumlah elemennya yaitu 819 elemen. *Mesh* pada wilayah tengah dan luar dihubungkan dengan *mesh* transisi dengan elemen kontinum (C3D4) dengan jumlah elemennya yaitu 29164 elemen. Sedangkan pada proyektil menggunakan elemen kontinum (C3D4) dengan jumlah elemennya yaitu 7564 elemen. Gambaran tentang *meshing* ditunjukkan pada Gambar 3. Kontak antara proyektil dan pelat telah didefinisikan dengan *penalty contact algorithm* dan *hard contact model*, keduanya tersedia dalam ABAQUS-Explicit [8]. Opsi “hard contact” memungkinkan untuk menyesuaikan secara otomatis kekakuan (*stiffness*), yang dihasilkan oleh “*penalty contact algorithm*”, untuk meminimalkan penetrasi tanpa merugikan interval waktu. Sehubungan dengan efek gesekan, beberapa nilai telah digunakan dalam literatur untuk menentukan koefisien dinamika gesekan  $\mu$  [6]. Dalam simulasi ini nilai koefisien gesek untuk proyektil berhidung tumpul adalah 0, dan 0.5 untuk proyektil berhidung kerucut (*conical*) dan setengah bola (*hemispherical*) [6].



Gambar 3. *Assembly meshing* antara pelat target dan proyektil.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

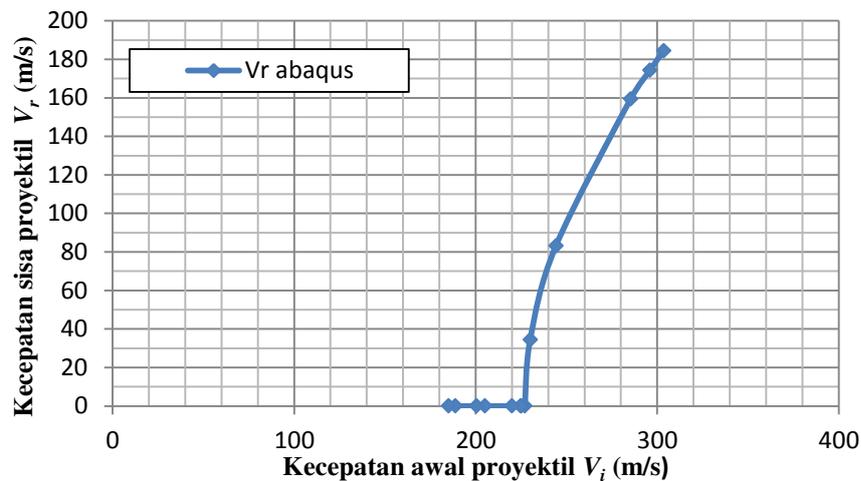
Berikut ini merupakan hasil dari simulasi tiga dimensi dengan menggunakan Abaqus 6.10-1 yang berupa kecepatan sisa peluru setelah proses penetrasi dan perforasi dimana kecepatan sisa pada proyektil diperoleh dengan menggunakan persamaan kecepatan sisa (3) dan hasilnya disajikan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil simulasi Abaqus 6.10-1.

No	$V_i$ (m/s)	$m_p$ (gr)	$m_{pl}$ (gr)	$V_r$ (m/s)	$V_{rpl}$ (m/s)
1	303.5	196.965	18.194	164.979	308.465
2	296	196.965	17.766	153.439	301.405
3	285.4	196.965	16.767	136.126	293.032
4	244.2	196.965	16.293	83.148	258.089
5	230	196.965	15.526	34.322	235.029
6	227	196.965	16.293	0	232.194
7	225	196.965	15.856	0	232.147
8	224.7	196.965	15.206	0	230.825
9	220	196.965	15.531	0	222.354
10	205	196.965	15.008	0	206.533

11	200.4	196.965	15.965	0	205.181
12	188.8	196.965	15.275	0	194.670
13	185	196.965	15.504	0	189.465

Pada tabel di atas  $V_i$  adalah kecepatan awal proyektil,  $m_p$  ialah massa proyektil,  $m_{pl}$  merupakan massa *plugging*,  $V_r$  adalah kecepatan sisa proyektil dan  $V_{rpl}$  ialah kecepatan sisa *plugging*. Dari tabel simulasi tersebut didapatkan kecepatan batas balistik  $V_{bl}$  antara tumbukan pelat-proyektil adalah 227 m/s. Dan kecepatan sisa *plugging*  $V_{rpl}$  kecepatannya melebihi kecepatan awal proyektil  $V_i$  dan kecepatan sisa proyektil  $V_r$ . Hal tersebut terjadi dikarenakan pada simulasi proyektil tampak menumbuk *plug* beberapa kali saat penetrasi. Pada saat tumbukan, massa *plug* dipercepat oleh gelombang tegangan dengan kecepatan lebih tinggi dari proyektil. Namun, karena ditahan oleh zona geser, *plug* dicegah meninggalkan target. Proyektil menangkap *plug*, memberikan tumbukan yang baru dan kontak antara benda hilang sekali lagi. Saat atau sangat dekat dengan fraktur atau patahan, tumbukan ini menjadi tumbukan antara dua benda yang bebas, dan *plug* meninggalkan pelat target dengan kecepatan yang lebih tinggi [5]. Hal ini mungkin menjelaskan perbedaan yang diamati pada kecepatan sisa proyektil dan kecepatan residual *plug*, di mana kecepatan residual *plug* lebih besar dari kecepatan sisa proyektil. Dari tabel tersebut kemudian diplotkan antara kecepatan awal dan kecepatan sisa proyektil, dan hasilnya dituangkan dalam grafik pada Gambar 4 di bawah ini. Dari hasil grafik tersebut menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kecepatan awal proyektil maka meningkat pula hasil dari kecepatan sisa proyektil.



**Gambar 4.** Grafik perbandingan kecepatan awal  $V_i$  dan kecepatan sisa proyektil  $V_r$  pada simulasi tiga dimensi Abaqus 6.10-1.

Selain itu juga terdapat data hasil eksperimen dan simulasi dua dimensi LS-DYNA Borvik dkk [5] sebagai perbandingan dengan data hasil simulasi numerik tiga dimensi menggunakan Abaqus-Explicit. Dalam jurnal tersebut [5] didapatkan kecepatan batas balistik  $V_{bl}$  yang di hasilkan oleh eksperimen dan LS-DYNA yaitu 185 m/s dan 205 m/s. Hal tersebut menunjukkan hasil simulasi Abaqus lebih besar 22.7% dari kecepatan batas balistik eksperimen dan lebih besar 10.73% dari simulasi dua dimensi LS-DYNA. Perbedaan yang cukup besar antara hasil kecepatan batas balistik simulasi tiga dimensi menggunakan Abaqus 6.10-1 dengan hasil kecepatan batas balistik eksperimen dan simulasi dua dimensi LS-DYNA mungkin akan berkurang jika menggunakan *Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) adaptive meshing* dalam simulasi tiga dimensi Abaqus pada penelitian selanjutnya. Dan juga diharapkan untuk meneliti efek dari gesekan pada observasi berikutnya.

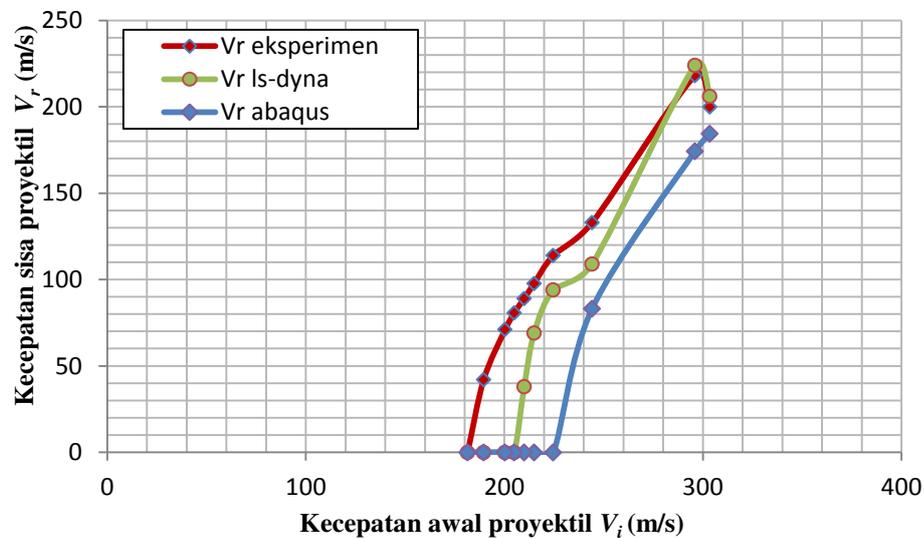
Hasil kecepatan sisa dari eksperimen, LS-DYNA dan simulasi Abaqus di sajikan pada Tabel 4, serta grafik perbandingan tersebut juga disajikan dalam Gambar 5. Dari tabel dan grafik tersebut terlihat adanya penyimpangan data yang diberikan oleh jurnal [5], dimana hasil kecepatan sisa eksperimen dan LS-DYNA pada kecepatan awal proyektil  $V_i$  303.5 m/s hasilnya lebih rendah dibandingkan hasil kecepatan sisa pada kecepatan awal proyektil  $V_i$  296 m/s. Dan dari hasil grafik tersebut disimpulkan bahwa hasil antara eksperimen dan LS-DYNA dengan hasil simulasi memang berbeda, tetapi dari plot perbandingan kurva ketiganya memiliki pola yang sama yaitu kecepatan sisa pada proyektil mengalami kenaikan seiring dengan naiknya kecepatan awal proyektil.

Pengamatan terhadap simulasi pada proses penetrasi uji balistik ini dapat dilihat pada Gambar 6, dimana pada gambar tersebut merupakan proses perlubangan atau perforasi proyektil terhadap pelat target. Dimana prosesnya adalah sebagai berikut. Pada tahap pertama proyektil mengindentasi atau masuk ke target. Selama periode singkat ini, massa target di depan proyektil dipercepat, dan perubahan mekanisme ke zona geser sangat dibatasi di sekitar hidung proyektil. Kerusakan berkembang pesat dalam zona geser karena tarik plastis yang sangat berat pada elemen paling

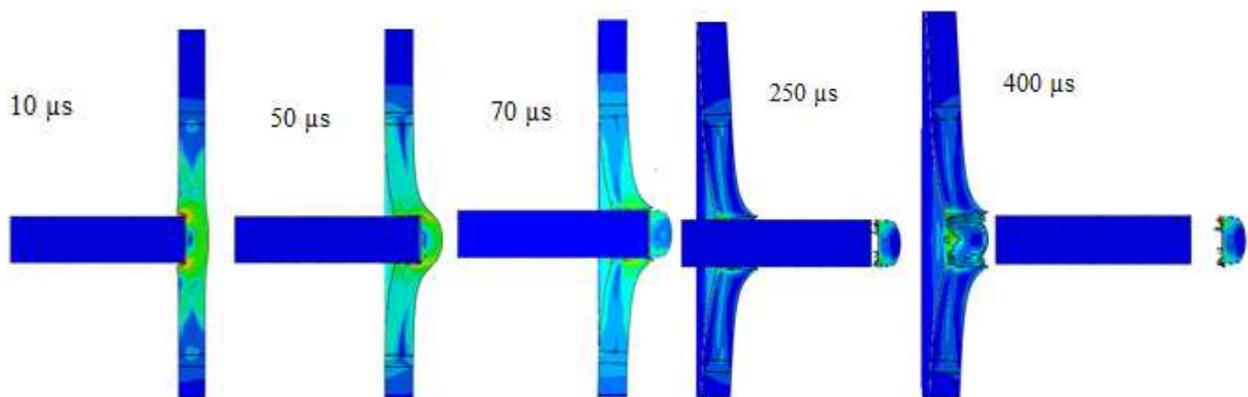
dekat dengan permukaan proyektil-target. Kerusakan kritis tercapai, elemen mulai terkikis, dan retak merambat ke arah sisi belakang target. Pada tahap terakhir, model kegagalan dikombinasikan dengan kegagalan geser dan tarik, seperti juga yang diperoleh selama pengujian [5], menyebabkan terjadinya perforasi proyektil terhadap pelat target, dan juga terjadi fenomena *plugging* yaitu material pelat target yang terbawa oleh ujung proyektil, dimana diameter *plug* atau material yang terbawa tersebut hampir sama dengan diameter ujung proyektil berhudung tumpul yang menumbuk pelat target.

**Tabel 4.** Perbandingan hasil eksperimen dan LS-DYNA Borvik dkk [5] dengan hasil simulasi Abaqus 6.10-1.

No	$V_i$ (m/s)	$V_r$ Eksperimen (m/s)	$V_r$ LS-DYNA(m/s)	$V_r$ Abaqus (m/s)
1	303.5	200	206	184.42
2	296	218	224	174.25
3	244.2	133	109	83.15
4	224.7	114	94	0
5	215	98	69	0
6	210	89	38	0
7	205	81	0	0
8	200.4	71	0	0
9	189.6	42	0	0
10	181.5	0	0	0

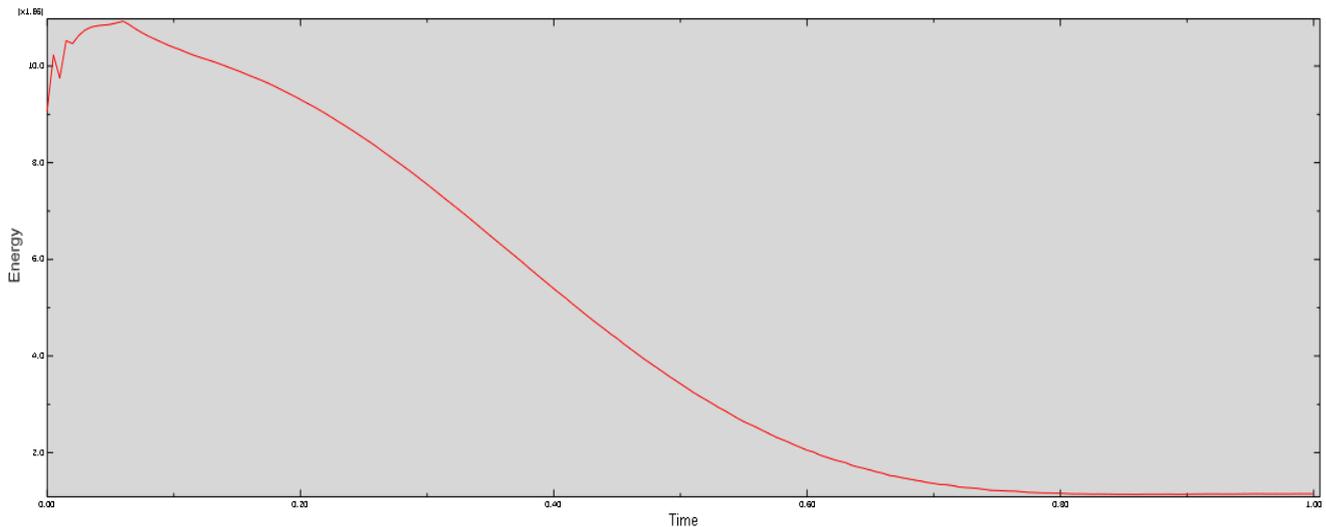


**Gambar 5.** Grafik perbandingan hasil eksperimen dan LS-DYNA Borvik dkk [5] dengan hasil simulasi Abaqus 6.10-1.



**Gambar 6.** Proses penetrasi dan perforasi proyektil terhadap pelat target dalam simulasi.

Berikut ini adalah grafik yang menunjukkan energi kinetik peluru ketika terjadi proses perforasi pada pelat target yang ditunjukkan pada Gambar 7 berikut ini.



**Gambar 7.** Grafik energi kinetik peluru pada perforasi pelat target pada kecepatan 303.5 m/s.

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa terjadi kenaikan energi kinetik peluru pada awal penetrasi. Kenaikan energi kinetik tersebut dikarenakan massa dari *plug* masih melekat dengan ujung peluru sehingga kenaikan dari energi kinetik diakibatkan oleh penambahan massa peluru dengan massa *plug*. Penurunan energi kinetik terjadi akibat pelat target mengalami fraktur atau patahan oleh penetrasi peluru, dimana *plug* tersebut terpisah dari pelat target dan ujung hidung peluru dan penurunan drastis energi kinetik terjadi setelah peluru menembus pelat target. Energi kinetik ini diubah menjadi energi untuk melakukan penetrasi dan perforasi pada pelat target. Pada grafik tersebut didapatkan nilai energi kinetik awal sebesar 9.07 kJ dan energi kinetik maksimum sebesar 10.9 kJ pada 0.065 s kemudian turun secara signifikan dan mulai konstan pada energi kinetik sebesar 1.15 kJ saat 0.805 s.

#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil simulasi tiga dimensi dengan menggunakan Abaqus 6.10-1 adalah sebagai berikut.

- 1) Nilai kecepatan batas balistik pada simulasi tiga dimensi Abaqus adalah 227 m/s dan nilai pada eksperimen dan simulasi LS-DYNA adalah 185 m/s dan 205 m/s. Hal tersebut menunjukkan hasil simulasi Abaqus lebih besar 22.7% dari kecepatan batas balistik eksperimen dan lebih besar 10.73% dari simulasi dua dimensi LS-DYNA.
- 2) Hasil antara eksperimen dan simulasi LS-DYNA dengan simulasi Abaqus memang berbeda, tetapi dari plot perbandingan kurva ketiganya memiliki pola yang sama yaitu kecepatan sisa pada proyektil mengalami kenaikan seiring dengan naiknya kecepatan awal proyektil.

#### 5. REFERENSI

- [1] Rizkiawan, Andi. 2011. Analisa balistik *impact* dengan variasi kecepatan awal proyektil menggunakan metode elemen hingga. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [2] Ipson, T.W., Recth, R.F. 1975. Ballistic penetration resistance and its measurement.
- [3] Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A. 2002. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part II: Numerical study. *International journal of impact engineering* 27, pp. 37–64.
- [4] Borvik, T., Leinum, J.R., Solberg, J.K., Hopperstad O.S. Observations on shear plug formation in Weldox 460 E steel plates impacted by blunt-nosed projectiles. *International Journal of Impact Engineering* 25 (2001) 553-572.
- [5] Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A. 1999. Ballistic penetration of steel plates. *International journal of impact engineering* 22, pp. 855-886.
- [6] Arias, A., Rodriguez, J.A., Martinez, Rusinek, A. 2008. Numerical simulations of impact behaviour of thin steelplates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles. *Engineering Fracture Mechanics* 75, pp. 1635-1656.
- [7] Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A. 2002. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part II: Numerical study. *International journal of impact engineering* 27, pp. 37–64.
- [8] Hibbitt HD, Karlsson BI, Sorensen P. Abaqus User's manual, ABAQUS/EXPLICIT 6.5; 2005.