

# Pemodelan dan Simulasi Fragmentasi Bom Menggunakan Metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH)

Handoko<sup>1</sup>, Fachri Muhammad<sup>2</sup>, Sapta Jengkar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dinas Penelitian dan Pengembangan TNI AU, Indonesia

<sup>2</sup>Institut Teknologi Bandung, Indonesia

<sup>1</sup>e-mail : handoko.khanza@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail : fachri.1998@gmail.com

**Abstrak** — *Unguided bomb* merupakan amunisi udara yang sering digunakan untuk keperluan latihan dan pertempuran. *Typical top level requirement* dari desain bom tersebut antara lain *target requirement* dan *safety requirement*. Salah satu bagian penting dalam *target requirement* yang perlu dipertimbangkan dalam suatu desain bom *live* adalah kemampuan daya hancur. Kemampuan daya hancur bom *live* ditentukan oleh fragmentasi yang dihasilkan bom untuk menghancurkan sasaran, sehingga misi penghancuran dapat terlaksana dengan efektif dan mematikan. Untuk memperoleh fragmentasi yang mampu menghancurkan sasaran baik saat misi maupun latihan ditentukan oleh dua aspek yaitu daya ledak dari isian bom/*main charge* dan dampak fragmentasi struktur bom itu sendiri. Untuk memprediksi fragmentasi yang diperoleh dari bom *live*, perlu dilakukan analisis fragmentasi dari struktur bom yang di desain. Simulasi fragmentasi dilakukan menggunakan *finite element method* untuk memperoleh kecepatan awal fragmentasi, bentuk fragmentasi dan sebarannya sebagai prediksi awal. Dalam studi kali ini, analisis dilakukan secara numerik pada bom MK-82 dimana struktur bodi bom/kulit dibuat menggunakan bahan *steel*, isian *explosive* menggunakan Trinitrotoluena (TNT) dan *initial detonation* dimulai dari bagian depan (*nose*) bom. Analisis dilakukan menggunakan *Software ABAQUS* dimana metode yang digunakan adalah *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) secara *Explicit*. Variasi dan bentuk *element/mesh* dilakukan untuk membandingkan dan memperoleh hasil yang mendekati dengan kondisi sebenarnya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa bentuk elemen *tetrahedron* berukuran 0,0085 menghasilkan bentuk dan sebaran fragmentasi yang merata sepanjang penampang struktur bodi/kulit bom MK-82 dan menghasilkan kecepatan fragmentasi berkisar 682-958 m/s.

**Kata Kunci:** *unguided bomb*, fragmentasi, *live*, *explosive*, TNT, SPH, *explicit*

## I. PENDAHULUAN

Kemampuan kerusakan dari bom seperti MK series diakibatkan oleh dua hal yaitu daya ledak dari bahan peledak dan dampak dari fragmentasi struktur bom itu sendiri. Cara untuk mempelajari daya rusak dari bom biasanya dilakukan dengan cara eksperimen langsung di lapangan kemudian dari hasil penyebaran fragmentasi dan hasil tangkapan kamera kecepatan tinggi dapat diperoleh data seperti kecepatan awal dari fragmentasi

pasca-ledakan, besar dan massa dari fragmentasi, kecenderungan penyebaran fragmentasi dan lainnya. Akan tetapi proses eksperimen tersebut membutuhkan biaya yang mahal akibat perlunya benda uji dalam jumlah tertentu. Maka dari itu, pendekatan melalui simulasi secara numerik mulai dilakukan untuk mendapatkan data sebagai hipotesis dan prediksi awal. Bom MK-82 memiliki daerah mematikan sebesar

80x30 m dengan jumlah fragmentasi hingga 3000 pecahan.

Versi MK-82 dengan kulit yang sudah diberikan *trigger mechanism* berupa retak atau torehan awal dapat memperbesar kemampuan perusakannya. Salah satu varian yang diberi *trigger mechanism* yaitu varian PFB-82 dapat menghasilkan 17.000 fragmen dan area mematikan sebesar 240x80 m [1].

Dari segi simulasi numerik sendiri, metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH)

sangat sensitif terhadap jumlah partikel, ukuran, dan penyebaran partikel. Pada ABAQUS, metode pemodelan SPH dilakukan dengan mengubah *elemen lagrangian* berupa *mesh* menjadi bentuk partikel. Hal ini membuat *mesh* merupakan salah satu parameter penting untuk memperoleh pemodelan SPH. Maka dari itu, dalam studi ini simulasi dilakukan menggunakan metode SPH untuk memprediksi hasil simulasi dan analisis fragmentasi pada desain bom *live* dengan massa 250 kg atau sekelas MK-82.

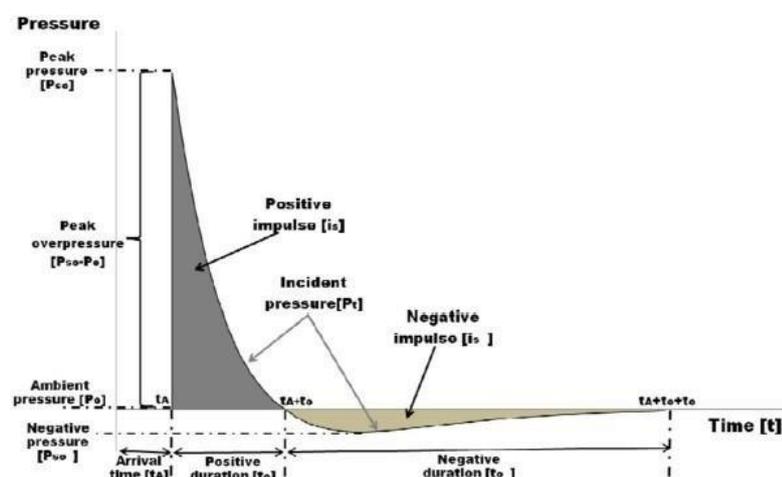
## II. LANDASAN TEORI

### A. Bom MK-82

Bom MK-82 adalah jenis bom tanpa kendali/*unguided* dan *low-drag general purpose bomb* yang termasuk dalam *MK series*. Bom MK-82 memiliki berat 500 lb atau sekitar 227 kg, akan tetapi dengan penambahan sirip dan peralatan lainnya, massa dari MK-82 dapat bervariasi dari 232 kg hingga 259 kg. Bom MK-82 memiliki bahan peledak seberat 87-89 kg dengan kulit terbuat dari *steel alloy*. Kecepatan dari fragmen MK-82 juga dipengaruhi dari sudut jatuhnya (*impact angle*) dengan rentang kecepatan fragmentasi yang dihasilkan berkisar antara 600 m/s hingga 1900 m/s [2].

### B. Fenomena Ledakan

Fenomena ledakan adalah suatu fenomena proyeksi berbentuk tekanan yang berlangsung secara sangat cepat dan besar yang diikuti proses penurunan tekanan hingga bernilai negatif yang biasa disebut sebagai *fase decay*. Karakteristik dari gelombang ledakan biasa digambarkan dalam bentuk kurva dari fungsi tekanan dan waktu yang mendeskripsikan besar tekanan pada waktu tertentu dalam kejadian ledakan.



Gambar 1 Kurva Ledakan (Fungsi Tekanan dan Waktu) [3]

Ketika terjadi ledakan, tekanan akan naik secara sangat cepat hingga mencapai nilai puncak yang biasa ditulis sebagai  $P_{s0}$ . Kemudian tekanan akan menurun hingga mencapai nilai negatif yang biasa disebut sebagai  $P^-$ . Tekanan udara berangsur akan

mencapai nilai tekanan atmosfer kembali. Besar dari  $P_{s0}$  diformulasikan dalam persamaan dengan fungsi dari jarak terskala  $Z$  yang menghubungkan jarak sebenarnya dengan massa ekuivalen peledak dengan TNT ( $W_e$ ).

$$P_{s0} = \frac{(77777)(1111.77 p_{s0}) [11 + (11.55) Z^{22}]}{\sqrt{11 + (ss. ss1100) Z^{22}} \sqrt{11 + (ss. ss0022) Z^{22}} \sqrt{11 + (11.0055) Z^{22}}} (p_{s0})$$

$$Z = \frac{\text{jarak}}{\sqrt[00]{WW}} e$$

Terdapat banyak alternatif bahan peledak yang bisa dipakai. Maka dari itu diperlukan

sebuah satuan global yang dipakai untuk menggambarkan besar bahan peledak. Massa ekuivalen dari TNT umumnya dipakai sebagai satuan global untuk menggambarkan besarnya bahan peledak. Berat dari bahan peledak yang dipakai dapat dikonversikan menjadi massa ekuivalen dari TNT ( $W_e$ )

melalui persamaan berikut dengan  $W_{ex}$  (kg) adalah massa dari bahan peledak yang

dipakai,  $H_d$  (MJ/kg) adalah panas dari ledakan bahan peledak, dan  $H_d$  adalah panas

dari ledakan TNT [3], [4].

$$W_e = \frac{H_{ex}^d}{H_{tnt}^d}$$

Tabel berikut berisikan data mengenai jenis peledak yang umum dipakai dan besar panas dari ledakan yang dihasilkan.

**Tabel 1 Jenis Bahan Peledak [3]**

Jenis Peledak	Panas dari Ledakan (MJ/kg)
TNT	4.1 – 4.55
C4	5.86
RDX	5.13 – 6.19
PETN	6.69
PENTOLITE 50/50	5.86
NITROGLYCERINE	6.3
NITROMETHANE	6.4
NITROCELLULOSE	10.6
AMON./NIT.(AN)	1.59

### C. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) adalah sebuah metode diskritisasi tanpa *mesh* yang melakukan pembagian struktur kontinu menjadi partikel kecil yang memiliki sifat fisik dan karakteristik tersendiri yang dapat bergerak bebas tergantung dari *governing equation* yang memenuhi kondisinya [Liu,

2003]. Keuntungan unik dari SPH adalah sifatnya yang adaptif. Formulasi dari SPH tidak akan dipengaruhi oleh perubahan struktur atau distribusi partikelnya sehingga metode ini sangat baik untuk memodelkan deformasi yang ekstrem dan detail [3], [5], [6].

### D. Jones-Wilkins-Lee (JWL) Equation of State

Metode SPH memodelkan kejadian ledakan langsung seperti kejadian sebenarnya, sehingga diperlukan *Equation of State (EoS)* untuk menggambarkan nilai tekanan dari

ledakan yang memiliki fungsi dari volume relatif reaktan ( $V$ ), parameter tekanan ( $A$  dan  $B$ ), parameter persamaan tanpa dimensi ( $R1$  dan  $R2$ ), dan Koefisien Gruneisen ( $\omega$ ) [7]-[11].

$$P (Mbar) = A \left(1 - \frac{\omega}{R1V}\right) e^{-R1V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R2V}\right) e^{-R2V} + \frac{\omega E}{V}$$

$$P(\Delta) = Ae^{-R1V} + Be^{-R2V} + \frac{C}{V\omega+1}$$

Terdapat Batasan nilai untuk semua parameter yaitu  $R1 > R2 > 0$  dan  $\omega > 0$ . Sedangkan untuk bahan ledakan yaitu  $A > B > 0$ , tapi jika digunakan sebagai reaktan maka  $A > -B > 0$  [7].

### III METODOLOGI DAN DATA MASUKAN

#### A. Pemodelan Material (Model Material dan Kerusakan Johnson-Cook)

Model Material *Johnson-Cook* dapat menggambarkan besar tegangan dan regangan dari material yang memiliki sifat sensitif terhadap laju regangan dalam fase plastisnya. Efek dari beban ledakan memberikan beban yang sangat cepat sehingga material berdeformasi secara sangat cepat. Material yang umum dipakai sebagai kulit bom juga umumnya memiliki sifat sensitif terhadap laju regangan. Efek dari laju regangan yang semakin tinggi pada material dengan

sifat ini adalah menaikkan nilai kekakuan dan kekuatan dari material dibandingkan jika material yang sama menerima laju regangan yang lambat. Tegangan ( $\sigma$ ) yang terjadi dituliskan dalam persamaan dengan fungsi dari *equivalent plastic strain* ( $\epsilon_p$ ), kekuatan luluh ( $A$ ), koefisien penguatan akibat regangan  $B$  dan  $n$ , sensitivitas laju regangan ( $C$ ), temperatur ruang ( $T_r$ ), temperatur kerja ( $T$ ), dan temperatur leleh dari material ( $T_m$ ) [12]-[15].

$$\sigma = [A + B(\epsilon_p)^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0})][1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r}]$$

Model kerusakan *Johnson-Cook* menggambarkan regangan pada kegagalan ( $\epsilon_f$ ) dengan fungsi dari parameter kegagalan ( $D1 - D5$ ), rasio tekanan ( $\sigma^*$ ), dan *equivalent strain rate* ( $\dot{\epsilon}^*$ ).

#### B. Mie Gruneisen Equation of State

*Mie Gruneisen Equation of State* adalah persamaan kondisi yang menghubungkan tekanan dan volume dari sebuah struktur pada temperatur tertentu. Persamaan ini menggambarkan bahwa sebuah tekanan dapat difungsikan sebagai fungsi linear dari energi dalam. Parameter persamaan *Mie-*

*Gruneisen* ( $\Gamma$ ) dituliskan dalam persamaan dengan fungsi dari volume ( $V$ ), tekanan ( $p$ ), dan energi dalam ( $e$ ) [11], [16]. Persamaan kondisi ini dibutuhkan untuk memodelkan material dengan model material seperti *Johnson-Cook*.

$$\Gamma = V \left( \frac{dp}{de} \right)_v$$

### C. Pendefinisian Kasus Permasalahan

Dalam studi ini, pemodelan kasus ledakan dan fragmentasi dilakukan dalam dua kasus yaitu kasus berbentuk bola dan dalam bentuk balok berlubang. Peledak yang dipakai pada

tiap kasus adalah sama untuk kedua metode. Material yang digunakan adalah *Steel* AISI 4340 dengan parameter material seperti ditampilkan pada tabel 2.

**Tabel 2 Pendefinisian Material [17]**

<i>Johnson-Cook Damage</i>	
D1	0.05
D2	3.44
D3	2.12
D4	0.00 2
D5	0.61
Melting Temperature	152 0
Transition Temperature	0
Reference Strain Rate	1
<i>Johnson-Cook Damage &gt; Damage Evolution</i>	
Fracture Energy	400
<i>Density</i>	
Density	785 0
<i>Elastic, type = Shear</i>	
Shear Modulus	80e 9
<i>Equation of State</i>	
C0	357 4
S	1.92
Gamma0	1.69
<i>Plastic, hardening = Johnson-Cook</i>	

A	792 e6
B	51e 7
N	0.26
M	1.02
Melting Temp	152 0
Transition Temp	0
<i>Plastic &gt; Rate Dependent</i>	
C	0.01 4
Epsilon dot zero	1
<i>Specific Heat</i>	
Specific Heat	480

Karakteristik dari material TNT yang dipakai adalah seperti tabel 3. Parameter *Detonation Point* menggambarkan titik awal ledakan akibat picu ledakan yang terdiri dari fungsi lokasi ledakan awal dan waktu peledakan.

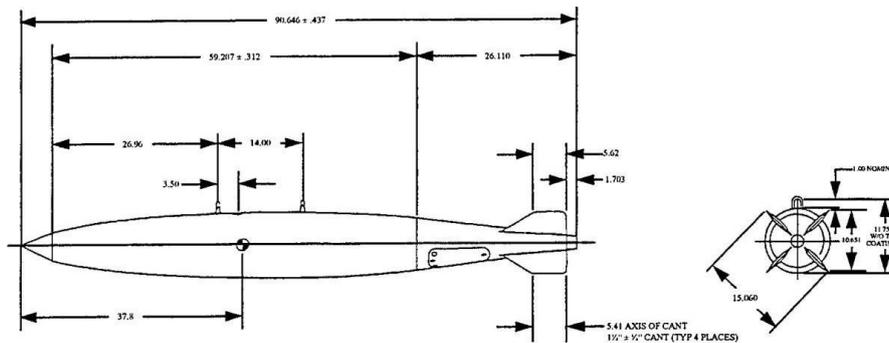
**Tabel 3 Pendefinisian TNT [3]**

<i>Density</i>	
Density	165 0
<i>Equation of State, type = JWL</i>	
Detonation Wave Speed	693 0
A	373 e9
B	374 e7
Omega	0.35
R1	4.15
R2	0.9
Detonation Energy Dens	65e 5
Pre-deton Bulk Modulus	0
<i>Equation of State &gt; Detonation Point</i>	
X	0
Y	0
Z	0
Detonation Delay Time	0

## D. Geometri

Bom yang digunakan dalam studi ini adalah Bom *Mark 82 General Purpose Bomb (MK-82)* yang merupakan salah satu jenis bom konvensional tanpa pemandu yang digunakan untuk sasaran umum dengan

gaya hambat rendah. Bom ini merupakan bom standar yang digunakan dalam operasi dan latihan serangan udara-ke-darat oleh pesawat standar NATO

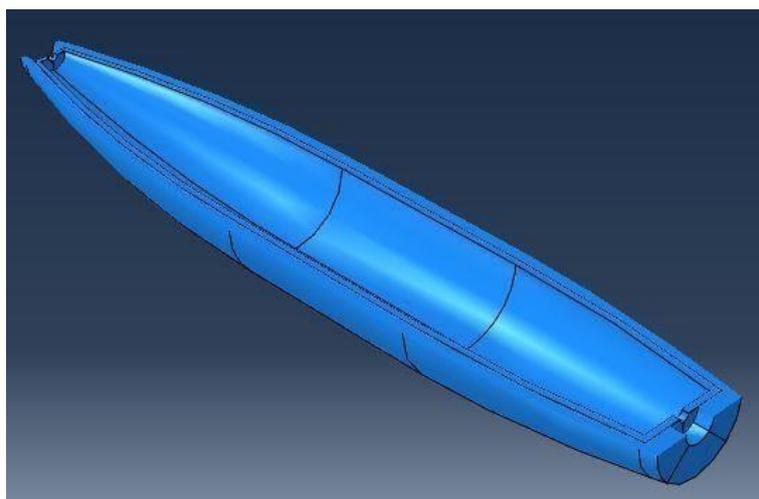


**Gambar 2. Data Geometri Bom MK-82 (inch) [18]**

## E. Pemodelan

Model yang dipakai dalam simulasi ini adalah bentuk simplifikasi struktur bom berdasarkan ukuran sebenarnya. Pemodelan dilakukan langsung menggunakan software SIMULIA

ABAQUS dengan membuat model simplifikasi berbentuk silinder berbentuk seperti peluru. Model pada simulasi fragmentasi ini hanya dilakukan pada bagian struktur bodi bom.

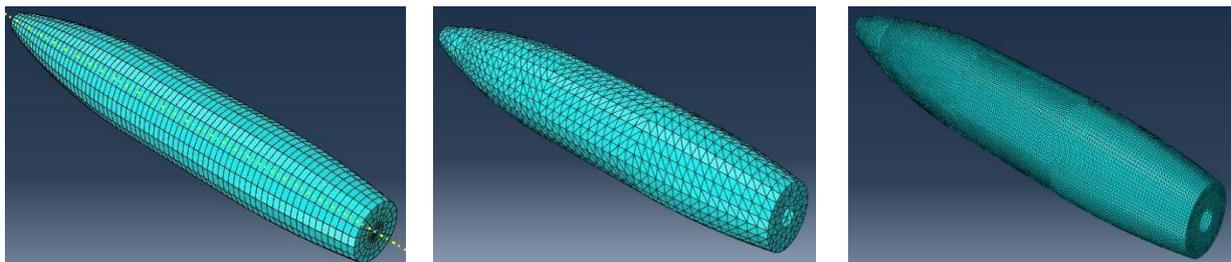


**Gambar 3. Struktur Kulit/Bodi Bom MK-82**

Akibat sensitivitas *meshing* pada bentuk yang tidak rata, beberapa alternatif bentuk bahan peledak dipelajari dalam studi ini. Alternatif yang dipakai adalah peledak yang berbentuk silinder sempurna dan bentuk peluru yang berongga tengahnya. Bentuk silinder diharapkan akan menghasilkan diskritisasi *mesh* yang paling baik karena konturnya yang rata. Rongga pada bahan peledak diberi untuk meningkatkan kualitas *mesh* karena hasil *mesh* pada bagian tengah cenderung sangat kecil dibandingkan pada bagian luar. Hal ini dapat menyebabkan penyebaran partikel kurang baik bahkan dapat mengakibatkan galat pada saat analisis oleh ABAQUS. Dampak dari bentuk elemen juga dipelajari pada penelitian ini. Dalam analisis elemen hingga dengan bentuk *mesh*,

elemen *hexahedron* dapat memberi akurasi yang sangat baik, akan tetapi elemen tiga dimensi jenis ini membutuhkan kualitas dari bentuk elemen yang lebih baik. Maka dari itu, jenis elemen *tetrahedron* akan dipelajari sebagai pembandingan akibat sifatnya yang lebih adaptif terhadap bentuk dari struktur.

Bahan peledak berbentuk peluru dengan elemen *tetrahedron* dimodelkan dengan ukuran 0,02 m. Model dengan elemen hexahedron divariasikan dengan ukuran 0,025 m; 0,01 m; dan 0,0085 m. Model dengan elemen *tetrahedron* pada model yang dipakai tidak bisa lebih kecil dari 0,02 m karena akan menghasilkan galat dan proses komputasi akan dihentikan paksa oleh ABAQUS.



(a) Bentuk *mesh* *hexahedron*

(b) Bentuk *mesh tetrahedron* (kasar)

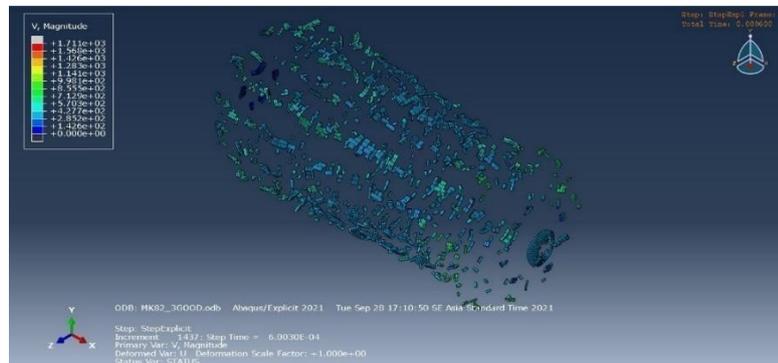
(c) Bentuk *mesh tetrahedron* (halus)

**Gambar 4. Tipe dan Ukuran *Mesh/Element* pada *Explosive Model***

### III. HASIL DAN ANALISIS

Simulasi fragmentasi pada struktur bom telah berhasil dilakukan. Alternatif dari semua parameter numerik baik dari geometri bahan

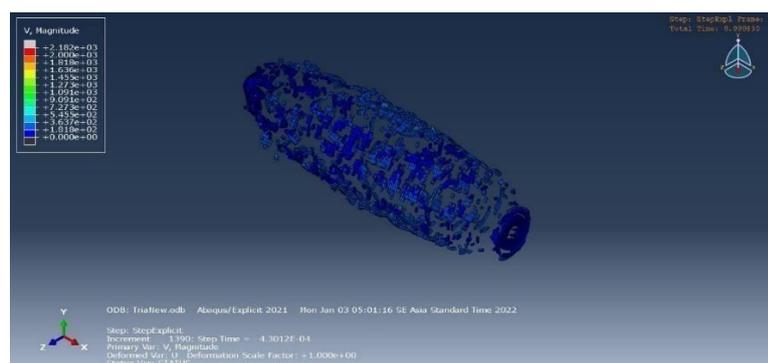
peledak, bentuk elemen, dan ukuran *mesh* menghasilkan kejadian fragmentasi yang berbeda.



**Gambar 5. Fragmentasi Hasil Simulasi Struktur Bom dengan Isian Berbentuk Peluru(Ukuran *Mesh* 0,02)**

Gambar 5 merupakan hasil fragmentasi dari bahan peledak berbentuk peluru dengan ukuran *mesh* 0,02. Fragmentasi dari kulit terbentuk dengan baik dan tersebar secara merata. Kecepatan dari fragmen beragam dari 140-998 m/s.

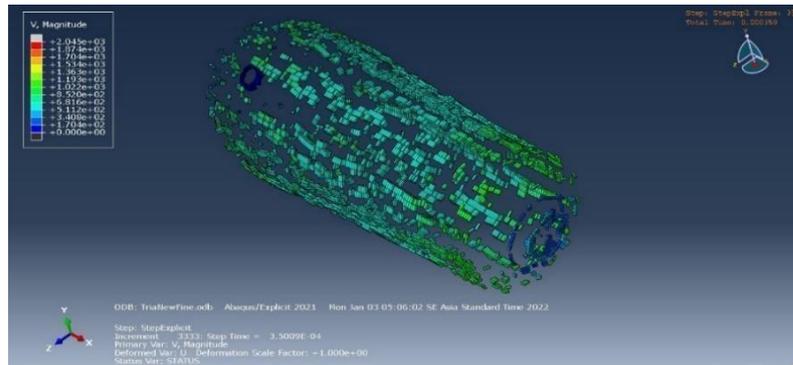
Akan tetapi bentuk bahan peledak seperti ini memiliki kekurangan dari segi *meshing* yang lebih sulit sehingga untuk geometri dan teknik *meshing* yang dipakai pada studi ini, ukuran terkecil yang bisa dipakai adalah 0,02.



**Gambar 6. Fragmentasi Hasil Simulasi Struktur Bom dengan Isian Berbentuk Peluru(Ukuran *Mesh* 0,025)**

Gambar 6 adalah hasil fragmentasi dari peledakan dengan bentuk peluru dengan bentuk elemen *tetrahedron* berukuran 0,025. Fragmentasi terbentuk dengan baik dengan

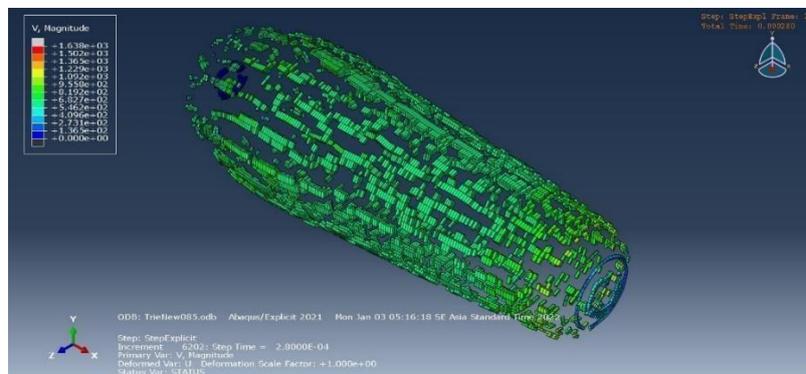
kulit terpecah secara sempurna dan merata. Kecepatan dari fragmentasi berkisar antara 181-363 m/s.



**Gambar 7. Fragmentasi Hasil Simulasi Struktur Bom dengan Isian Berbentuk Peluru(Ukuran Mesh 0,01)**

Gambar 7 adalah hasil fragmentasi dari peledakan dengan bentuk peluru dimana elemen *tetrahedron* berukuran 0,01. Fragmentasi terbentuk dengan baik dengan kulit terpecah secara sempurna dan merata. Kecepatan dari fragmentasi meningkat dibandingkan dari ukuran mesh 0,025 yaitu 511-1193 m/s. Hal ini wajar karena dengan penambahannya jumlah elemen pasti akan

semakin mendekati titik konvergensi. Nilai konvergensi dari suatu hasil analisis elemen hingga dapat bertambah atau berkurang dibandingkan dengan ukuran *mesh* yang lebih besar. Nilai dari kekonvergenan akan didapatkan dengan semakin menurunkan ukuran *mesh* untuk menambah jumlah elemen.



**Gambar 8. Fragmentasi Hasil Simulasi Struktur Bom dengan Isian Berbentuk Peluru(Ukuran Mesh 0,0085)**

Gambar 8 adalah hasil fragmentasi dari peledakan dengan bentuk peluru dengan bentuk elemen *tetrahedron* berukuran 0,0085. Fragmentasi terbentuk dengan baik dengan kulit terpecah secara sempurna dan merata. Kecepatan dari fragmentasi pada model dengan *mesh* 0,0085 adalah berkisar 682-958 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa nilai dari kecepatan semakin konvergen.

Variasi dari kecepatan pada simulasi ini tidak dapat dihindari karena kejadian ledakan yang tidak terjadi secara serentak. Akan tetapi nilai tersebut dapat dijadikan acuan karena besar fragmentasi yang terjadi dapat dibilang terbentuk secara ideal. Perbandingan kecepatan fragmentasi dari simulasi dan referensi dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 4 Kecepatan Fragmentasi Hasil Simulasi**

Jenis/Ukuran [Mesh/Element]	Kecepatan Fragmentasi [m/s]
	<b>Referensi 609 – 1828 [2]</b>
Hex 0.02	140 – 998
Tet 0.025	181 – 363
Tet 0.01	511 – 1193
Tet 0.0085	<b>682 – 958</b>

Pada kejadian sebenarnya, besar kecepatan dari fragmentasi bisa saja bernilai sangat tinggi karena terdapat ukuran fragmentasi yang sangat kecil dibanding pecahan lainnya dari struktur yang sama. Hal ini disebabkan oleh bahan peledak yang tidak memberi

beban ledak yang seragam dan geometri dari kulit bom yang tidak sempurna akibat baik kecacatan produksi dan penyesuaian untuk pemasangan peralatan seperti *mounting*, *fuze*, dan *fin*.

#### IV. KESIMPULAN

Simulasi framnetasi Bom MK-82 telah dilakukan menggunakan *Finite Element Method* dengan metode SPH. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan awal fragmentasi yang memenuhi referensi [2] yaitu bom MK-82 adalah menggunakan *mesh/element tetrahedron* berukuran 0,0085 yaitu

sekitar 682 s.d 958 m/s. Secara umum dari hasil simulasi, fragmentasi terbentuk dengan baik dengan kulit terpecah secara sempurna dan sebaran fragmentasi terjadi secara merata sepanjang penampang struktur bodi bom MK-82.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD), *Mk 82 aircraft bomb*. Geneva, 2016.
- [2] F. Mvleskey, F. Mtleskey, K. George, and K. George, "FRAGMENTATION CHARACTERISTICS by For Information Contact : 25a DOD Explosives Safety Seminar," no. August, 1992.
- [3] M. R. Sitompul, "EXPERIMENT AND NUMERICAL STUDY ON BLAST LOADING OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER
- BY USING LOAD BLAST ENHANCED AND SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMIC METHOD," Institut Teknologi Bandung, 2018.
- [4] A. N. Pratomo, "DESAIN DAN ANALISIS PELINDUNG TAMBAHAN KENDARAAN TEMPUR UNTUK MEMENUHI KELAIKAN-LEDK STRUKTUR (STRUCTURAL BLASTWORTHINESS)," Institut Teknologi Bandung, 2020.

- [5] P. W. Randles, L. D. Libersky, T. C. Carney, and F. W. Sandstrom, "SPH simulation of fragmentation in the MK82 bomb," vol. 331, pp. 331-334, 2008, doi: 10.1063/1.50717.
- [6] J. Trajkovski, R. Kunc, and I. Prebil, "Blast response of centrally and eccentrically loaded flat-, U-, and V-shaped armored plates: comparative study," *Shock Waves*, vol. 27, no. 4, pp. 583-591, 2017, doi: 10.1007/s00193-016-0704-6.
- [7] R. Menikoff, "JWL Equation of State," vol. 1, p. 20, 2017, [Online]. Available: <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-15-29536>.
- [8] S. B. Segletes, "An Examination of the JWL Equation of State (ARL-TR-8403)," 2018.
- [9] S. Koli, P. Chellapandi, L. Bhaskara Rao, and A. Sawant, "Study on JWL equation of state for the numerical simulation of near-field and far-field effects in underwater explosion scenario," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 758-768, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2020.01.007.
- [10] E. L. Lee, H. C. Hornig, and J. W. Kury, "Adiabatic Expansion Of High Explosive Detonation Products," Livermore, 1968. doi: <https://doi.org/10.2172/4783904>.
- [11] Abaqus, "Equation of State, Abaqus." <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-eos.htm#simamat-c-eos-mg> (accessed Oct. 22, 2021).
- [12] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 21, no. 1, pp. 31-48, 1985, doi: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [13] J. O. Hallquist and LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (LSTC)., *LS-DYNA Keyword User ' S Manual Volume II: Material Models*, vol. II, no. October. 2018.
- [14] Abaqus, "Johnson - Cook plasticity, Abaqus." <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-johnsoncook.htm> (accessed Oct. 22, 2021).
- [15] J. W. Hancock and A. C. Mackenzie, "On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 24, no. 2-3, pp. 147-160, 1976, doi: 10.1016/0022-5096(76)90024-7.
- [16] Y. Wang, X. Zeng, H. Chen, X. Yang, F. Wang, and J. Ding, "Hugoniot States and Mie-Grüneisen Equation of State of Iron Estimated Using Molecular Dynamics," 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst11060664>.
- [17] T. Mabrouki and J. F. Rigal, "A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 176, no. 1-3, pp. 214-221, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.159.
- [18] Khrisnamoorthy, L.V., Kirk, D.R., and Glass, R., "An Aerodynamic Database for The MK-82 General Purpose Low Drag Bomb", Melbourne: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTO- TR-0554, 1997.