Studi Numerik Fragmentasi *Shell Body Mortar Bomb* 120 mm dengan Variasi Bahan *Shell Body* dan Bahan Peledak Menggunakan Metode SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*)

Ragil Pamungkas[1]*, Ardi Noerpamoengkas[2], dan Ahmad Yusuf Ismail[3]
PT. Pindad[1]
Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[2,3]
e-mail: ragil.rp.pamungkas@gmail.com [1]

ABSTRACT

Fragmentation testing serves as a key parameter in evaluating the effectiveness of a 120 mm mortar bomb; however, it entails high costs and strict safety requirements. Therefore, a fragmentation simulation was conducted using the finite element method to determine the influence of varying shell body and explosive materials on fragmentation patterns, specifically the number of fragments, fragment mass, and fragment velocity. The analysis considers four material combinations: combination A (S45C >< RDX), combination B (A36 >< RDX), combination C (S45C >< TNT), and combination D (A36 >< TNT). The study utilized Altait Hyperworks software employing the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method, with detonation initiated at the front section of the mortar bomb. Simulation results show that combination A produced 7,422 fragments, with a maximum fragment mass of 407 grams and a velocity of 2,101.75 m/s. Combination B produced 7,215 fragments, with a maximum fragment mass of 289 grams and a velocity of 2,031.48 m/s. Combination C produced 7,129 fragments, with a maximum fragment mass of 407 grams and a velocity of 1,927.36 m/s. Combination D produced 7,098 fragments, with a maximum fragment mass of 443 grams and a velocity of 1,791.95 m/s. Overall, combination A represents the optimal configuration, as it delivers the highest fragment count and the greatest velocity.
Keywords: *fragmentation, mortar bomb* 120 mm, A36, S45C, TNT, RDX, SPH.

ABSTRAK

Pengujian fragmentasi merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan efektivitas *mortar bomb* 120 mm namun memerlukan biaya yang besar dan tingkat keselamatan yang tinggi. Oleh karena itu dilakukan simulasi fragmentasi menggunakan *finite element method* dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi bahan *shell body* dan bahan peledak terhadap pola fragmentasi yaitu jumlah pecahan, massa pecahan dan kecepatan pecahan dengan 4 kombinasi dari masing-masing bahan *shell body* dan bahan peledak, yaitu kombinasi A (S45C >< RDX), kombinasi B (A36 >< RDX), kombinasi C (S45C >< TNT) dan kombinasi D (A36 >< TNT). Penelitian dilakukan menggunakan perangkat lunak Altair Hyperworks dengan metode SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) dan *initial detonation* dimulai dari bagian depan *mortar bomb*. Hasil simulasi menunjukkan kombinasi A menghasilkan jumlah pecahan sebanyak 7.422 pcs dengan massa pecahan terbesar yaitu 407 gram dan kecepatan yang dihasilkan yaitu 2.101,75 m/s. Kombinasi B menghasilkan jumlah pecahan sebanyak 7.215 pcs dengan massa pecahan terbesar yaitu 289 gram dan kecepatan yaitu 2.031,48 m/s. Kombinasi C menghasilkan jumlah pecahan sebanyak 7.129 pcs dengan massa pecahan terbesar yaitu 407 gram dan kecepatan yaitu 1.927,36 m/s. Kombinasi D menghasilkan jumlah pecahan sebanyak 7.098 pcs dengan massa pecahan terbesar yaitu 443 gram dan kecepatan yaitu 1.791,95 m/s. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa kombinasi A merupakan kombinasi terbaik karena memiliki jumlah pecahan terbanyak dan kecepatan tertinggi.

Kata kunci: fragmentasi, *mortar bomb* 120 mm, A36, S45C, TNT, RDX, SPH.

PENDAHULUAN

Mortar bomb 120 mm merupakan amunisi jenis artileri yang ditembakkan dari senjata mortar dan digunakan dalam operasi militer karena jangkauan tembak dan daya hancurnya yang luas. Salah satu faktor kunci dalam menentukan efektivitas *mortar bomb* adalah fragmentasi *shell body*. Fragmentasi secara langsung dapat melumpuhkan lawan yang berada di radius taget sekitarnya. Karakteristik fragmentasi dipengaruhi oleh beberapa aspek, salah satunya yaitu sifat mekanik dari material *shell body* dan jenis bahan peledak yang digunakan.

Pendekatan eksperimental dengan melakukan uji statis dapat dilakukan untuk mengetahui pola fragmentasi. Akan tetapi, pendekatan tersebut memerlukan biaya yang besar dan tingkat keselamatan yang tinggi. Oleh karena itu, simulasi numerik diperlukan untuk sebagai alternatif untuk memprediksi perilaku fragmentasi

selama tahap awal dan pengembangan. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) merupakan metode yang cocok untuk mensimulasikan proses peledakan dan fragmentasi *shell body*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisa pengaruh perbedaan material *shell body* dan jenis bahan peledak dapat mempengaruhi jumlah fragmen, massa fragmen dan kecepatan fragmen. Serta, untuk mengetahui dan menganlisa kombinasi dari material *shell body* dan bahan peledak yang paling efektif.

TINJAUAN PUSTAKA

Mortar bomb 120 mm

Mortar bomb merupakan salah satu jenis amunisi yang digunakan untuk menetralisir atau menghancurkan target area. *Mortar bomb* terbagi menjadi tiga kategori, yaitu *mortar bomb* ringan (51-60 mm); *mortar bomb* sedang (61-99 mm) dan *mortar bomb* berat (100-120 mm). Secara umum, *mortar bomb* berukuran sedang dapat menembak pada jarak 100 m hingga 5500 m, sedangkan mortir berat memiliki jangkauan sekitar 500 m hingga 7000 m [1],[3],[5].

Komponen utama *mortar bomb* terdiri dari fuze, *shell body*, bahan peledak, ekor, isian tambahan dan isian pokok. Perbedaan jenis mortar terletak pada diameter *mortar bomb* serta berat isian bahan peledak yang digunakan. Gambar 2.1 memperlihatkan komponen utama penyusun *mortar bomb* [10].
Pada komponen yang ada, *shell body* merupakan salah satu komponen penting sebagai wadah bahan peledak dan penentu pola fragmentasi setelah terjadi ledakan [2].

Fragmentasi

Fragmentasi adalah proses terbaginya struktur padat (*shell body*) menjadi potongan kecil akibat energi yang dihasilkan dari detonasi bahan peledak [8]. Pada *mortar bomb*, fragmentasi merupakan faktor penting karena jumlah fragmen yang dihasilkan dapat menimbulkan efek penghancuran pada sasaran musuh di medan perang.

Hasil fragmentasi dipengaruhi oleh sifat mekanik dari material *shell body*. Material dengan tingkat keuletan dan kekuatan tinggi cenderung akan menghasilkan pecahan yang lebih sedikit namun ukuran ukuran yang lebih besar. Sedangkan material dengan karakter getas akan memiliki hasil fragmen yang lebih banyak namun kecil [9].

Simulasi Numerik

Simulasi numerik digunakan untuk menyelesaikan persoalan matematika yang terlalu rumit jika diselesaikan dengan cara analitik seperti pada bidang teknik, fisika, atau ilmu lain. Oleh karena itu, metode numerik dapat digunakan sebagai solusi untuk menyelesaikan masalah-masalah tersebut dengan pendekatan perhitungan berulang menggunakan komputer pada saat metode analitik sudah tidak lagi dapat diterapkan [7].

Tujuan dari metode numerik adalah memperoleh nilai pendekatan melalui langkah perhitungan yang efisien. Tahapan dalam pemecahan masalah meliputi pemodelan, penyederhanaan model, formulasi numerik, pemrograman, operasional dan evaluasi.

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) merupakan metode numerik yang berbasis mesh free yang memodelkan struktur sebagai kumpulan partikel-partikel kecil dengan sifat fisik dan karakteristik masing-masing serta dapat bergerak bebas mengikuti persamaan dasar (governing equation). Keunggulan yang dimiliki pada metode ini adalah memiliki sifat adaptif terhadap perubahan bentuk atau distribusi partikel dan tidak mempengaruhi kestabilan formulasi perhitungannya. Selain itu, metode ini mampu menangani deformasi besar sehingga cocok untuk mensimulasikan fenomena ledakan dan proses fragmentasi [6].

ISSN 2775-5630

Equation of State

Untuk dapat menggambarkan besar tegangan dan regangan dari sifat mekanik material terhadap laju regangan dalam fase plastisnya maka digunakan Model Material Johnson-Cook. Energi dari bahan peledak memberikan gelombang kejut yang sangat cepat terhadap material *shell body* [4].

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n})(1 + \mathrm{C}\ \ln \dot{\varepsilon}^{*})(1 - T^{*m})$$

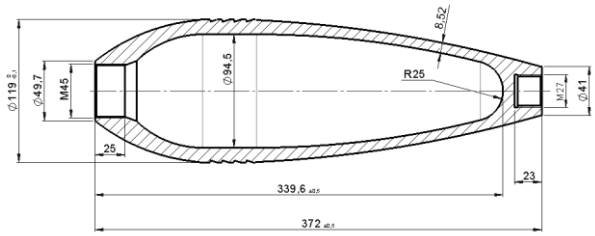
Kecepatan detonasi dan kecepatan pemuaian terjadi dengan sangat cepat, sehingga sifat gas dapat diasumsikan tidak memiliki kekentalan dan adiabatic pada saat ledakan. Persamaan keadaan tekanan untuk ledakan dijelaskan melalui persamaan Jones Wilkins Lee (JWL).

$$p = A\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta{\rho_o}^{e}$$

METODE

Geometri

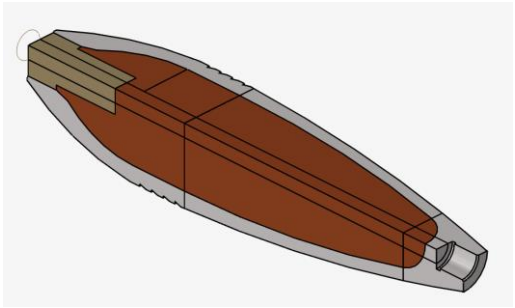
Mortar bomb 120 mm yang digunakan dalam studi ini merupakan *mortar bomb* M62P3 dengan tipe High Explosive (HE). Model geometri *mortar bomb* 120 mm diperoleh melalui hasil reverse engineering dan dilakukan penyederhanaan model untuk mempermudah proses komputasi.



Gambar 1. Geometri *Mortar bomb* 120 mm

Pemodelan

Hasil geometri yang telah didapatkan dilakukan proses pemodelan pada perangkat lunak Altair Hyperworks dengan membagi model menjadi seperempat bagian untuk mempermudah proses komputasi. Selain itu, pemodelan juga dilakukan pada bagian dalam untuk memodelkan bahan peledak yang berada di dalam *shell body*. Pada pemodelan ditentukan bahwa titik awal ledakan berawal dari bagian ujung *mortar bomb* 120 mm.



Gambar 2. Pemodelan *Mortar bomb* 120 mm

Pendefinisan Material *Shell body*

Dalam penelitian ini pemodelan material *shell body* menggunakan dua material yang berbeda yaitu A36 steel dan S45C dengan parameter seperti ditampillkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter material *shell body*

Symbol	Parameter	S45C	A36
ρ	*Density*	7700 kg/m^3	7850 kg/m^3
v	*Poisson Coefficient*	0,27	0,26
E	*Young Modulus*	190 GPa	200 Gpa
A	*Yield Stress*	553 MPa	286,13 MPa
B	*Strain Hardening Constant*	600 MPa	500,14 MPa
n	*Hardening exponent*	0,234	0,2280
C	*Strengthening coefficient of strain rate*	0,0134	0,0170
m	*Thermal softening coefficient*	1	1
S^{-1}	*Reference Strain rate*	0,001	0,001
T_m	*Melting Temperature*	1460 ˚C	1460 ˚C
T_0	*Initial Temperature*	20 ˚C	20 ˚C

Untuk dapat memprediksi inisiasi retakan dan fragmentasi maka diperlukan pula model kerusakan dari material *shell body* sesuai dengan parameter pada tabel 2. Detonasi radial yang besar membuat *shell body* mengembang dan pecah. Sedangkan, arah aksial pada bagian atas tidak tertutup membuat gaya aksial yang terjadi tidak terlalu besar. Dengan menggabungkan gaya radial dan aksial maka patahan fragmen secara radial mendahului retakan aksial.

Tabel 2. *Damage parameter johnson-cook material*

Symbol	Parameter	S45C	A36
d_1	*Intial failure stress*	0,06	0,403
d_2	*Exponen factor*	3,31	1,107
d_3	*Triaxsility factor*	-1,96	-1,899
d_4	*Strain flow factor*	0,0018	0,00961
d_5	*Suhu factor*	0,58	0,3

Pendefinisian Bahan Peledak

Untuk memodelkan fenomena ledakan yang terjadi akibat bahan peledak maka dibutuhkan pemodelan bahan peledak menggunakan model Jones-Wilkins-Lee (JWL) sesuai dengan tabel 3. Pemodelan ini dapat menggambarkan nilai tekanan dari proses ledakan yang terjadi. Karakteristik bahan peledak yang digunakan ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. *JWL Parameter of explosive*

Symbol	Parameter	Value		Unit
		RDX	TNT	
ρ	*Initial Density*	1,842	1,63	$g.cm^{-3}$
D	*Detonation Velocity*	8239	6930	$m.s^{-1}$
P_{CJ}	*CJ Pressure*	32.5	21	GPa
A	*Fitting coefficient*	801,8	371,2	GPa
B	*Fitting coefficient*	52,64	3,23	GPa
R_1	*Fitting coefficient*	5	4,15	-
R_2	*Fitting coefficient*	2,1	0,95	-
ω	*Fitting coefficient*	0,34	0,3	-
e	*Detonation energy per unit mass*	8,5	7,0	j/mm^3

Hasil dan Pembahasan

Simulasi fragmentasi *mortar bomb* 120 mm telah berhasil dilakukan menggunakan perangkat lunak Altair Hyperworks menggunakan metode SPH (Smoother Particle Hydrodynamics) yang dilakukan hingga detik

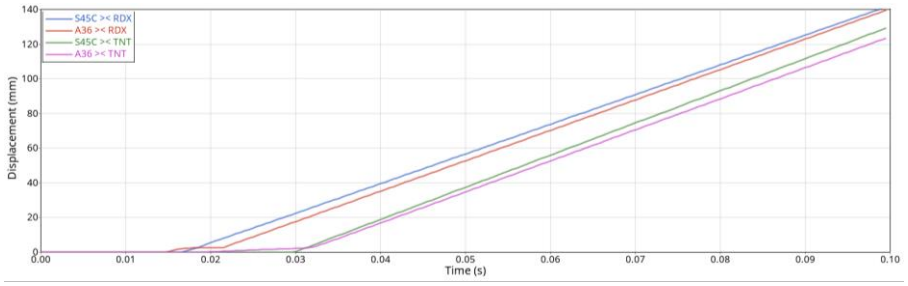
ke 0,1. Hasil simulasi didapatkan 4 kombinasi antara material *shell body* dengan bahan peledak seperti pada tabel 4.

Tabel 4. Kombinasi material

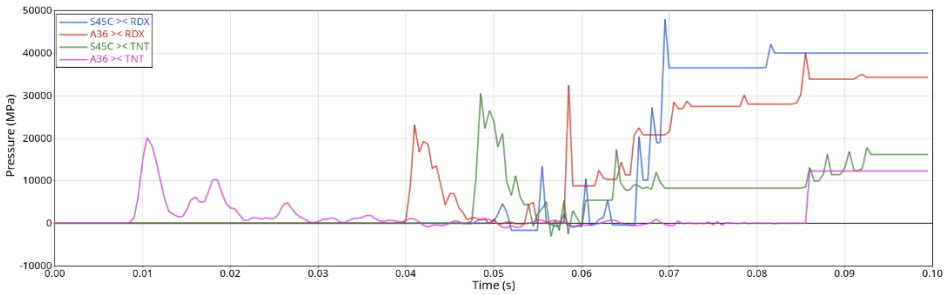
Kombinasi	Material *Shell Body*	Bahan Peledak
A	S45C	RDX
B	A36	RDX
C	S45C	TNT
D	A36	TNT

Hasil Distribusi Fragmentasi

Berdasarkan hasil simulasi, terdapat pengaruh jenis bahan peledak terhadap material *shell body* yang ditunjukkan melalui gambar 3 yang menunjukkan grafik time vs displacement. Selain itu, dapat dilihat pula dari hasil gambar 4 yang menunjukkan grafik time vs pressure.



Gambar 3. Grafik *time vs displacement*



Gambar 4. Grafik *time vs pressure*

Nilai displacement tertinggi terdapat pada kombinasi A dengan nilai 141,489 mm dan nilai pressure sebesar 47.927,68 MPa. Pada kombinasi B menghasilkan nilai displacement sebesar 139,652 mm dengan nilai pressure sebesar 39.949,953 MPa. Kombinasi C menghasilkan nilai displacement sebesar 129,274 mm dan nilai pressure sebesar 30.455,22 MPa. Kombinasi D menghasilkan nilai displacement sebesar 123,447 mm dan nilai pressure sebesar 20.032,314 MPa.

Dari hasil displacement dan pressure menunjukkan bahwa nilai displacement tidak hanya hanya dipengaruhi oleh nilai pressure tetapi juga dipengaruhi oleh sifat mekanik dari material *shell body* dalam menyerap energi yang dihasilkan oleh ledakan.

Hasil Jumlah Fragmentasi

Jumlah pecahan menjadi salah satu parameter untuk dapat melihat sebaran luas area sebaran dan potensi kerusakan yang dihasilkan. Jumlah pecahan dari masing-masing kombinasi menunjukkan hasil yang berbeda. Jumlah pecahan menunjukkan yang tebentuk menunjukkan peningkatan dari interval waktu dari

ISSN 2775-5630

25 μs, 50 μs, 75 μs dan 100 μs. Peningkatan ini terjadi pada waktu awal setelah terjadinya detonasi kemudian melambat dan cenderung stabil pada waktu akhir sesuai pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil jumlah fragmentasi

Kombinasi	Material *Shell Body* >< Bahan Peledak	Jumlah pecahan pada waktu ke-			
		25 μs	50 μs	75 μs	100 μs
A	S45C >< RDX	1.594	6.602	7.118	7.422
B	A36 >< RDX	1.151	5.136	6.978	7.215
C	S45C >< TNT	565	2.220	6.576	7.129
D	A36 >< TNT	453	1.746	6.249	7.098

Dilihat dari material *shell body*, material S45C menghasilkan jumlah pecahan daripada material A36. Hal tersebut dikarenakan sifat mekanik material S45C yang lebih kuat daripada material A36 pada kondisi laju regangan yang tinggi. Sedangkan dilihat dari bahan peledak, RDX menghasilkan jumlah pecahan yang lebih banyak daripada TNT. Hal ini karean tekanan detonasi dari bahan peledak RDX lebih besar daripada TNT.

Hasil Massa Fragmentasi

Massa pecahan merupakan hasil dari massa pecahan yang terbentuk akibat dari ledakan yang dihasilkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa massa pecahan yang dihasilkan menunjukkan nilai yang berbeda seperti ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 6. Hasil massa fragmentasi

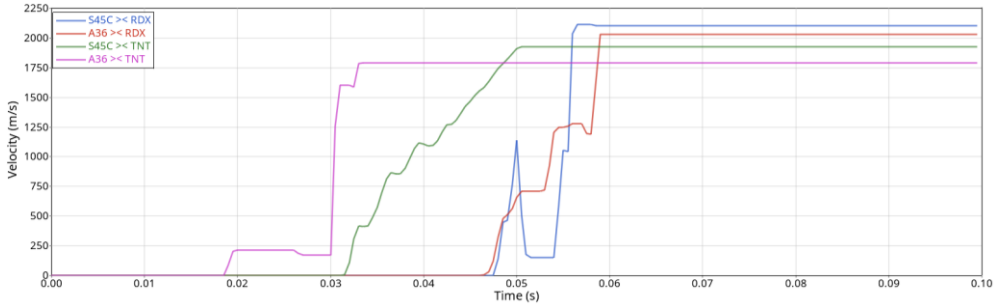
Kombinasi	Material *Shell Body* >< Bahan Peledak	Massa Fragmentasi Terbesar (gram)
A	S45C >< RDX	407
B	A36 >< RDX	289
C	S45C >< TNT	407
D	A36 >< TNT	443

Hasil pecahan terbesar pada kombinasi A menunjukkan nilai 407 gram, pada kombinasi B menunjukkan nilai 289 gram, pada kombinasi C menunjukkan nilai 407 gram dan paad kombinasi D menunjukkan nilai 443 gram. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa hasil massa pecahan dipengaruhi oleh sifat mekanik material *shell body*. Material dengan tingkat keuletan yang tinggi cenderung menghasilkan massa pecahan yang lebih besar. Sedangkan material dengan tingkat kekakuan tinggi menghasilkan massa fragmen yang lebih kecil.

Hasil Kecepatan Fragmentasi

Untuk dapat mengetahui pengaruh material *shell body* dan bahan peledak terhadap kecepatan pecahan, maka dapat dilihat pada gambar 5 yang menunjukkan grafik time vs velocity. Pada saat bahan peledak terinisiasi maka energi kimia dari bahan peledak berubah menjadi energi kinetik melalui gelombang kejut yang tersebat ke dalam *shell body* sehingga *shell body* mengalami kerusakan pada saat tegangan yang ditimbulkan oleh bahan peledak.

ISSN 2775-5630



Gambar 5. Grafik *time vs velocity*

Dari grafik time vs velocity menunjukkan bahwa seluruh kombinasi mengalami peningkatan kecepatan yang signifikan dalam waktu yang singkat. Kombinasi A menghasilkan kecepatan pecahan sebesar 2.101,75 m/s, kombinasi B menghasilkan kecepatan sebesar 2.031,48 m/s, kombinasi C menghasilkan kecepatan sebesar 1.927,36 m/s dan kombinasi D menghasilkan kecepatan sebesar 1.791,95 m/s.

KESIMPULAN

Simulasi fragmentasi *Mortar bomb* 120 mm telah dilakukan dengan menggunakan metode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) pada perangkat lunak Altair Hyperworks. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jenis material dan bahan peledak dapat mempengaruhi pola fragmentasi. Berdasarkan penggunaan material *shell body* pada *mortar bomb* 120 mm. Material S45C menghasilkan jumlah pecahan dan kecepatan yang lebih tinggi daripada material A36. Namun material A36 menghasilkan massa pecahan yang lebih besar dibandingkan dengan material S45C. Berdasrakan penggunaan bahan peledak. Penggunaan bahan peledak RDX menghasilkan jumlah dan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan bahan peledak TNT. Namun, bahan peledak TNT mampu menghasilkan massa pecahan yang lebih besar.

Dari empat kombinasi yang dihailkan pada simulasi menunjukkan bahwa kombinasi A merupakan kombinasi yang terbaik karena mampu menghasilkan jumlah pecahan sebesar 7.422 pcs dengan kecepatan 2.101,75 m/s. Sehingga, efektivitas dari pecahan yang dihasilkan dapat memberik daya rusak pada target sasaran atau musuh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah atas berkat rahmat Allah Yang Maha Esa, atas nikmat yang begitu luar biasa sehingga penulis dapat menyelesaikan jurnal ini. Terima kasih untuk istri dan keluarga yang selalu memberi doa dan dukungan untuk penulis hingga sampai di titik ini. Terima kasih untuk kedua orang tua yang selalu memberi motivasi kepada penulis untuk terus berinovaasi. Terima kasih untuk dosen pembimbing, kepala program studi teknik mesin, dan seluruh keluarga besar Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya atas arahan, dorongan serta dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Tak lupa penulis sampaiakan terima kasih kepada rekan-rekan tim pengembangan produk munisi PT Pindad yang telah memberi dukungan dan motivasi untuk dapat melewati seluruh proses ini. Dan untuk seluruh rekan-rekan yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

DAFTAR PUSTAKA

[1] T. J. Gander and I. V. Hogg, Jane's Ammunition Handbook 1993–94. London, U.K.: Jane's Information Group, 1993.

[2] J. Hale and J. E. Field, "*Fragmentation characteristics of explosively loaded shells*," Int. J. Impact Eng., vol. 112, pp. 55–68, 2018.

[3] D. C. Isby, *Weapons and Tactics of the Soviet Army*. London, U.K.: Jane's Information Group, 1988.

[4] J. Kim, S. Lee, and C. Park, "*Machining analysis of S45C carbon steel using finite element method*," Procedia Manuf., vol. 15, pp. 120–127, 2018.

[5] G. C. C. Krulak, Use of Mortars in Military Operations on Urbanized Terrain (MOUT), 2001.

[6] G. R. Liu and M. B. Liu, Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method. Singapore: World Scientific, 2003.

[7] S. Maharani and E. Suprapto, Analisis Numerik Berbasis Group Investigation untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis. Magetan, Indonesia: CV. AE MediaGrafika, 2018.

[8] N. F. Mott, "Fragmentation of shell cases," Proc. R. Soc. A, vol. 189, no. 1018, pp. 300–308, 1947, doi: 10.1098/rspa.1947.0042

[9] C. E. Needham, Blast Waves. Berlin, Germany: Springer, 2010,doi: 10.1007/978-3-642 05288-0.

[10] USSR Ministry of Defense, Technical Description and Operating Instructions for 120 mm Mobile Mortar: Chapter 2—Ammunition. USSR Ministry of Defense, 1990.