

“Analisis Variasi Massa Bola Baja Terhadap Standarisasi Kepekaan Penggalak Mu 5 Tj Kaliber 5,56 Mm”

Dwi Budi Utama 1^a, Maryono 2^a, Eriski Prawira 3^a, and Lazuardi 3^b

^aAfiliasi 1, Prodi Teknologi Rekayasa Persenjataan Militer Jurusan Balistik Poltekad Kodiklatad, Kota Batu 65323, Indonesia

^bAfiliasi 2, Faculty of Engineering and Science, Universitas PGRI Wiranegara, Pasuruan 67118, Indonesia

ABSTRAK

Kepekaan penggalak merupakan faktor kritis dalam memastikan keamanan dan keandalan operasional amunisi MU 5 TJ kaliber 5,56 mm. Studi ini mengevaluasi pengaruh variasi massa bola baja terhadap kepekaan penggalak menggunakan metode drop test yang sistematis. Uji dilakukan dengan tiga variasi massa bola baja (100 g, 112 g, dan 120 g) pada beberapa ketinggian, dengan 25 sampel per interval. Parameter H50 digunakan untuk menentukan tinggi jatuh yang menghasilkan inisiasi pada 50% sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa massa bola baja 120 gram menghasilkan sensitivitas optimal, menjaga stabilitas pada zona energi rendah (no-fire) dan memastikan inisiasi total (all-fire) tercapai pada ketinggian yang ditentukan, sedangkan massa 100 g dan 112 g tidak memenuhi kriteria kepekaan yang diinginkan. Standardisasi sensitivitas mengikuti ketentuan PT. Pindad Persero, dengan ambang batas energi yang ditetapkan secara operasional. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan massa bola baja 120 gram dapat dijadikan standar pengujian penggalak MU 5 TJ, menjamin keamanan, reliabilitas operasional, dan presisi alat uji yang digunakan.

Kata Kunci: Munisi; Detonator Sensitivity; Steel Ball Mass; MU 5 TJ, Caliber 5.56 mm; Standardization

Pendahuluan

TNI-AD mengelola berbagai varian munisi dengan rentang usia simpan yang bervariasi. Tantangan teknis muncul pada munisi berusia di atas 10 tahun, di mana integritas propelan masih terjaga namun performa penggalak mulai menurun. Munisi sendiri merupakan perangkat energetik untuk eliminasi target melalui transmisi energi kinetik dan ledakan [1], [2]. Berdasarkan ukuran kalibernya, sistem munisi dibagi menjadi tiga grup fungsional: kaliber kecil, munisi khusus, dan kaliber besar. Pemahaman terhadap degradasi komponen ini menjadi basis penting dalam evaluasi kesiapan tempur materil [3]. A modern cartridge-type munition consists of four major elements: pelor (projectile), propelan (propellant), kelongsong (cartridge case), and penggalak (primer) [4], [5]. Pelor is the attacking element that leaves the bore to reach the target and cause damage [6], [7].

Propelan, dalam keadaan bubuk peledak ringan, membakar dengan cepat untuk menghasilkan gas bertekanan tinggi yang memantulkan pelor dari laras; kecepatan pembakaran disesuaikan dengan bentuk dan ukuran butir menurut hukum Piolet [8]. Kelongsong berperan sebagai tempat yang menyatukan pelor, propelan, dan penggalak yang langsung menghalangi tekanan gas pada tembakan [9], [10]. Penggalak adalah elemen yang mempercepat pembakaran propelan melalui reaksi kimia yang cepat akibat gesekan atau rangsangan listrik [11]. Pemahaman detail fungsi tiap komponen ini menjadi dasar penting dalam kajian performa balistik dan desain munisi pada penelitian ini.

Sensitivity detonator adalah istilah untuk mengukur kemampuan penggalak untuk meledak ketika diberi stimulus tertentu, seperti kontak, panas, atau gelombang kejut [12]. Parameter ini sangat penting karena langsung memengaruhi keselamatan dan keandalan sistem peledak [13]. Di militer, pengujian sensitivitas merujuk pada standar seperti MIL-STD-1751A untuk menentukan batas all-fire dan no-fire [14]. Sensitivitas juga termasuk respons terhadap stimulus mekanis yang bisa dipengaruhi oleh massa benda pemukul seperti bola baja [15]. Penggalak MU 5 TJ kaliber 5,56 mm harus diuji terukur

untuk memastikan performa dan keamanan operasional [16]. Kesamaan variasi massa bola baja pada pengujian sensitivitas diperkirakan akan memberikan data kunci bagi standarisasi serta pengendalian mutu detonator, serta mengurangi risiko inisiasi tidak sengaja [17].

Massa bola baja pada pengujian kepekaan penggalak berperan penting dalam menentukan energi tumbukan yang diterima oleh komponen uji [18]. Energi tersebut bergantung pada massa dan ketinggian jatuh sesuai prinsip mekanika energi potensial [19]. Konfigurasi massa bola baja merupakan variabel kunci dalam memetakan ambang batas sensitivitas detonator, di mana massa yang lebih besar berbanding lurus dengan peningkatan energi dampak [20]. Sinkronisasi massa ini sangat vital untuk mencapai validitas hasil uji yang selaras dengan kriteria MIL-STD-1751A [21]. Penggunaan material baja dengan derajat kekerasan tinggi juga menjadi parameter krusial untuk mencegah deformasi pada titik kontak, guna menjamin keberulangan (repeatability) hasil eksperimen yang mumpuni [22]. Pada penggalak MU 5 TJ kaliber 5,56 mm, evaluasi variasi massa bola baja membantu memastikan proses standarisasi sensitivitas berjalan akurat dan aman [25].

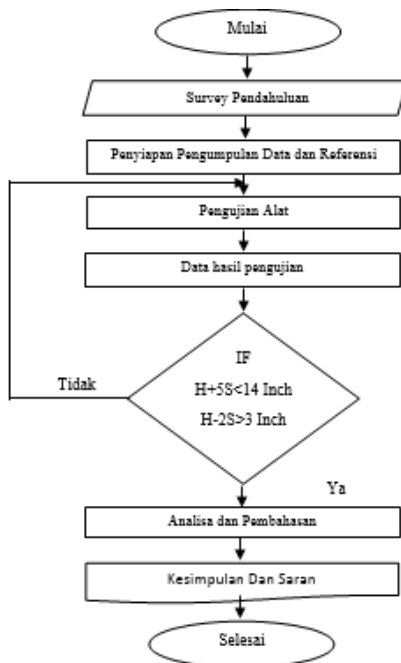
Standarisasi dalam tes kepekaan penggalak adalah proses yang penting dalam memastikan keseragaman, keamanan, dan ketepatan amunisi [26]. Evaluasi sensitivitas penggalak pada munisi MU 5 TJ 5,56 mm sangat bergantung pada akurasi massa bola baja, karena fluktuasi massa tersebut secara langsung memengaruhi transmisi energi tumbukan [27]. Penggunaan standarisasi yang ketat memungkinkan identifikasi profil performa yang lebih akurat dan mendukung upaya peningkatan mutu produksi melalui meminimalisasi kegagalan fungsi [28]. Sesuai dengan konsensus standar militer internasional, parameter uji detonator telah dikalibrasi secara khusus, terutama pada aspek penentuan beban uji dan batas ketinggian jatuh operasional [29]. Harmonisasi prosedur dengan standar ini memastikan produk lengkap dengan perluasan operasional [30]. Hasil evaluasi tambahan menegaskan bahwa integritas parameter pengujian sangat bergantung pada pemeliharaan perangkat uji secara

berkala. Tanpa standarisasi perawatan yang sesuai, penyimpangan data pada variabel eksperimental dapat mengompromikan standar keselamatan sekaligus menurunkan reliabilitas kinerja sistem senjata secara keseluruhan. Oleh karena itu, presisi instrumentasi menjadi pilar utama dalam menjamin validitas pengujian munisi dan persenjataan [31].

Fokus utama riset ini terletak pada sinkronisasi parameter uji kepekaan penggalak MU 5 TJ 5,56 mm sebagai fondasi keamanan dan konsistensi performa munisi. Interdependensi antara massa bola baja dengan output energi tumbukan menuntut adanya kalibrasi prosedur yang akurat agar hasil evaluasi sensitivitas tetap konsisten. Adanya celah dalam standarisasi berpotensi menimbulkan bias pada deteksi sensitivitas, yang berdampak fatal pada keselamatan operasional. Upaya sinkronisasi pengendalian mutu dalam penelitian ini memberikan kontribusi nyata bagi penguatan landasan teknis jaminan materiil, sekaligus menjadi instrumen krusial dalam menjaga keselamatan personel dan efektivitas penggunaan amunisi.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi kepekaan penggalak MU 5 TJ kaliber 5,56 mm. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah massa bola baja (100 g, 112 g, dan 120 g), sedangkan variabel terikat adalah tingkat sensitivitas penggalak yang diukur melalui parameter H50, yaitu tinggi jatuh yang menghasilkan inisiasi pada 50% sampel. Uji dilakukan di PT. Pindad Persero Turen-Malang dengan 25 sampel pada setiap interval ketinggian. Diagram alir penelitian pada Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian mulai dari survei pendahuluan hingga analisis data dan penarikan kesimpulan.



Gambar 1. Diagram Alir.

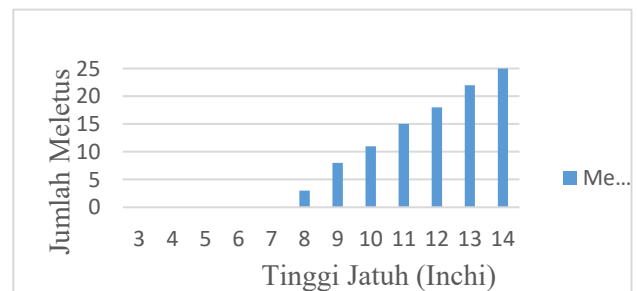
Pengambilan data pengujian drop test di PT. Pindad Persero Turen-Malang, Prosedur pengujian dilakukan melalui tahapan berikut:

1. Menyiapkan dan bahan yang digunakan untuk pengujian.
2. Menyambungkan alat dengan arus listrik.
3. Memasukkan atau meletakkan kelongsong berpenggalak pada meja penjepit kelongsong.
4. Mengatur ketinggian pada alat uji.

5. Meletakkan atau memasang bola baja pada coil atau magnet.
6. Menekan tombol off sehingga aliran listrik yang terjadi pada kumparan terputus, secara bersamaan bola baja jatuh.
7. Bola baja jatuh sehingga memukul pena pemukul,
8. Pena pukul mendapatkan beban yang dihasilkan oleh bola baja sehingga memukul penggalak.
9. Mengamati dan mencatat hasilnya.
10. Kegiatan tersebut dilakukan sebanyak 25 kali sehingga mendapatkan data yang dibutuhkan.

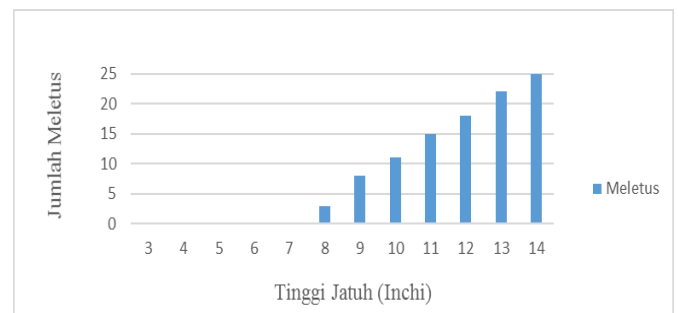
Hasil Penelitian

Tabel 1. Diagram Hubungan Ketinggian Terhadap Jumlah Penggalak Yang Meletus (massa bola baja 100 gram).



Gambar 2. Diagram Hubungan Ketinggian Terhadap Jumlah Penggalak Yang Meletus (massa bola baja 100 gram).

Evaluasi fungsional terhadap 25 butir spesimen penggalak mengungkap korelasi linier antara ketinggian jatuh dengan tingkat keberhasilan inisiasi. Data eksperimen mengonfirmasi bahwa zona aman (no-fire region) terjaga sepenuhnya hingga ketinggian 7 inci, yang membuktikan stabilitas material spesimen pada level energi rendah. Transisi menuju fase inisiasi mulai terdeteksi pada ambang batas 8 inci dengan rasio letusan 3 dari 25 sampel (12%). Peningkatan energi potensial pada interval 9 dan 10 inci kemudian memicu lonjakan reaktivitas yang signifikan, masing-masing tercatat sebesar 32% dan 44%. Fenomena ini mengindikasikan bahwa besaran energi tumbukan pada ketinggian tersebut telah memasuki area distribusi normal sensitivitas penggalak, di mana probabilitas inisiasi mulai mendekati titik median populasi. Parameter fundamental H₅₀ berhasil diidentifikasi pada ketinggian 11 inci (60%), yang menandakan bahwa energi tumbukan telah melampaui energi aktivasi mayoritas populasi. Keandalan fungsi penggalak terus menguat pada elevasi 12 hingga 13 inci, dan mencapai validasi kinerja sempurna pada ketinggian 14 inci dengan tingkat letusan 100%.



Gambar 3. Diagram Hubungan Ketinggian Terhadap Jumlah Penggalak Yang Meletus (massa bola baja 110 gram).

Berdasarkan rangkaian uji jatuh (drop-weight test) menggunakan beban statis 100 gram, profil sensitivitas material penggalak menunjukkan distribusi reaktivitas yang sangat terukur. Pada tahap awal, spesimen menunjukkan resistansi penuh terhadap inisiasi dalam rentang ketinggian 3 hingga 7 inci, yang mengkonfirmasi integritas stabilitas material pada zona energi rendah. Eskalasi respons mulai teramati pada ketinggian 8 inci dengan tingkat inisiasi awal sebesar 12%, yang kemudian terus meningkat secara signifikan pada ketinggian 9 inci (32%) dan 10 inci (44%). Titik kritis statistik terlampaui pada ketinggian 11 inci, di mana probabilitas inisiasi resmi melewati ambang median H_{50} dengan hasil 60%. Tren reaktivitas ini berlanjut secara konsisten pada fase menuju saturasi di ketinggian 12 inci (72%) dan 13 inci (88%), hingga akhirnya mencapai titik all-fire atau saturasi inisiasi total pada elevasi 14 inci, di mana seluruh populasi spesimen uji terinisiasi secara mutlak.

Tabel 1. Data Hasil Perhitungan Kepekaan Penggalak dengan massa bola baja 100 gram.

No	Hasil Perhitungan	(MU 5 Tj kal 5,56 mm)
1.	Ep Tidak Meletus	0,174244 joule
2.	Ep Meletus	0,199136 joule
3.	$(\sum_1)^2$	8,53
4.	Rata-rata H	10,42
5.	Standar deviasi	1,96
6.	H + 5S	20,21 Inchi
7.	H - 2S	6,50 Inchi

Parameter uji kepekaan untuk penggalak MU 5 TJ 5,56 mm menetapkan batas keamanan yang spesifik pada metode drop-weight. Penggunaan bola baja 100 gram pada ketinggian di bawah 7 inci mencerminkan profil stabilitas material, di mana spesimen diwajibkan untuk tidak menunjukkan respons letusan (no-fire). Transisi energetik mulai teramati saat ketinggian ditingkatkan menjadi 8 inci, yang menandai titik inisiasi awal di mana energi dampak mulai melampaui ambang batas aktivasi kimiawi penggalak.

Tabel 2. Hasil perhitungan kepekaan penggalak dengan massa bola baja 112 gram.

No	Hasil Perhitungan	(MU 5 Tj kal 5,56 mm)
1.	Ep Tidak Meletus	0,1115 joule
2.	Ep Meletus	0,1393 joule
3.	$(\sum_1)^2$	10,76
4.	Rata-rata H	7,78
5.	Standar deviasi	1,84
6.	H + 5S	17,00 Inchi
7.	H - 2S	4,09 Inchi

Untuk pengujian kepekaan penggalak Mu 5 Tj kaliber 5,56 mm. Bila bola besi dengan berat 112 gram dijatuhkan pada ketinggian kurang dari 4 inci, seharusnya penggalak tidak meletus, dan

apabila bola baja dijatuhkan pada ketinggian 5 inci, seharusnya penggalak mulai meletus.

Tabel 3. Data hasil perhitungan kepekaan penggalak dengan massa bola baja 120 gram.

No	Hasil Perhitungan	(MU 5 Tj kal 5,56 mm)
1.	Ep Tidak Meletus	0,0762 joule
2.	Ep Meletus	0,1194 joule
3.	$(\sum_1)^2$	5,38
4.	Rata-rata H	5,82
5.	Standar deviasi	1,32
6.	H + 5S	12,41 Inchi
7.	H - 2S	3,18 Inchi

Untuk pengujian kepekaan penggalak Mu 5 Tj kaliber 5,56 mm. Kriteria keberterimaan (acceptance criteria) untuk pengujian dengan massa 120 gram merujuk pada regulasi energi dampak yang spesifik. Sesuai dengan protokol yang ditetapkan, penggalak harus menunjukkan resistansi penuh terhadap benturan pada ketinggian kurang dari 3 inci guna menjamin keamanan selama penanganan. Sementara itu, fungsionalitas penggalak secara teknis harus mulai teraktivasi pada ketinggian 4 inci, yang menandai fase awal pelepasan energi energetik pada sampel amunisi 5,56 mm tersebut.

Pembahasan

Guna memetakan korelasi antara besaran energi dampak dan profil inisiasi, rangkaian uji sensitivitas pada penggalak MU 5 TJ 5,56 mm dilaksanakan dengan mengadopsi tiga variasi beban massa, yakni 100 g, 112 g, dan 120 g. Pendekatan multidimensi ini dirancang untuk memvalidasi bahwa fenomena inisiasi pada material energetik merupakan fungsi dari magnitudo energi potensial yang ditransmisikan, bukan sekadar variabel ketinggian jatuh tunggal. Metodologi ini dirancang untuk memetakan respons energetik spesimen melalui distribusi sampling 25 unit per interval ketinggian. Rentang pengujian dimulai dari batas bawah keamanan 3 inci hingga mencapai titik saturasi penuh (all-fire), guna memperoleh kurva probabilitas inisiasi yang komprehensif untuk setiap variasi beban.

Dari pengujian kepekaan penggalak menggunakan massa bola baja 100 gram, penggalak dinyatakan "TIDAK LULUS". Karena penggalak yang diujikan dengan massa bola baja 100 gram dinyatakan kurang peka.

Sedangkan pengujian kepekaan penggalak menggunakan massa bola baja 112 gram yang diujikan juga dinyatakan "TIDAK LULUS". Hal ini dikarenakan penggalak yang diujikan dengan massa bola baja 112 gram dinyatakan kurang peka.

Berdasarkan rangkaian eksperimen menggunakan beban bola baja 120 gram, penggalak MU 5 TJ yang diuji dinyatakan memenuhi kualifikasi atau 'LULUS'. Hal ini karena penggalak yang diujikan dengan massa bola baja 120 gram dinyatakan peka. Sehingga aman dalam penggunaan munisi di satuan tempur jajaran TNI AD. Pengujian menggunakan massa bola baja 120 gram menunjukkan performa penggalak yang sangat ideal dengan memenuhi kriteria

ambang batas keselamatan dan reliabilitas. Penetapan ketinggian 6 inci sebagai titik fungsi optimal menjadi acuan dasar dalam mengevaluasi performa penggalak MU 5 TJ. Kriteria keberterimaan (acceptance criteria) mengamankan kondisi no-fire pada ketinggian jatuh di bawah 4 inci sebagai jaminan keamanan penanganan (handling safety). Sementara itu, kewajiban inisiasi total (all-fire) pada ketinggian melampaui 8 inci menjadi parameter mutlak untuk memastikan reliabilitas tembakan. Sinkronisasi antara batas keamanan dan batas fungsi ini sangat krusial dalam memvalidasi kualitas materiil sesuai dengan standar alutsista TNI.

Penutup

Berdasarkan hasil pengujian drop test, massa bola baja 120 gram menunjukkan performa penggalak MU 5 TJ yang optimal. Penggunaan massa ini menghasilkan energi tumbukan yang sesuai dengan kriteria keberterimaan militer, menjaga stabilitas pada zona energi rendah (no-fire) dan memastikan inisiasi total (all-fire) tercapai pada ketinggian yang ditentukan. Dengan konfigurasi ini, penggalak menunjukkan kepekaan yang ideal, sehingga aman digunakan dalam operasional satuan tempur TNI AD.

Hasil analisis ini menegaskan bahwa alat uji yang dikembangkan memiliki presisi yang tinggi dan mampu merepresentasikan profil fungsional amunisi secara sistematis. Oleh karena itu, disarankan agar PT. Pindad Persero menerapkan standardisasi menggunakan massa bola baja 120 gram, karena sudah sesuai dengan spesifikasi kepekaan penggalak yang diinginkan.

Daftar Pustaka

- [1] J. Akhavan, *The Chemistry of Explosives*, 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2011.
- [2] P. F. Wilson and G. R. Cooper, "Ignition sensitivity testing of detonator compositions under variable impact energy," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 37, no. 6, pp. 675–682, 2012.
- [3] H. Meyer, J. Köhler, and A. Homburg, *Explosives*, 6th ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.
- [4] R. F. Walker, "The role of impact testing in the evaluation of primer sensitivity," *Journal of Energetic Materials*, vol. 29, no. 3, pp. 175–188, 2011.
- [5] G. Urbanski, *Chemistry and Technology of Explosives*, vol. 2. Oxford: Pergamon, 1984.
- [6] S. M. Walley, J. E. Field, and J. P. Jones, "A review of the drop-weight impact sensitivity test," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 372, no. 2023, pp. 1–18, 2014.
- [7] C. M. Tarver, "Impact initiation of explosives," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 40, no. 3, pp. 342–350, 2015.
- [8] L. Dobratz and P. Crawford, *LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [9] A. Zeman and J. Kraus, *Energetic Materials: Physics and Chemistry of the Inorganic Azides*. Berlin: Springer, 1981.
- [10] P. Bowden and A. Yoffe, "Initiation and growth of explosion in liquids and solids," *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 302, no. 1471, pp. 509–535, 1968.
- [11] Y. Feng et al., "Experimental study on the mechanical sensitivity of primary explosives," *Journal of Energetic Materials*, vol. 34, no. 1, pp. 32–45, 2016.
- [12] D. Price, "Mechanical impact sensitivity of explosives," *Defense Science Journal*, vol. 58, no. 6, pp. 729–735, 2008.
- [13] H. J. Christ, "Evaluation of drop-weight impact tests for explosive sensitivity," *Combustion and Flame*, vol. 44, no. 3, pp. 201–210, 1982.
- [14] M. Finger and R. Schmidt, "Investigations on impact sensitivity of lead styphnate-based primers," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 25, no. 5, pp. 235–241, 2000.
- [15] J. Xu, "Study on impact sensitivity of explosive compositions by steel ball method," *Chinese Journal of Energetic Materials*, vol. 18, no. 4, pp. 391–396, 2010.
- [16] L. Hobbs and M. Baer, "Impact testing of energetic materials: Advances and challenges," *Journal of Energetic Materials*, vol. 26, no. 4, pp. 231–245, 2008.
- [17] W. Zheng, "Influence of projectile mass on impact sensitivity of primers," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 33, no. 6, pp. 451–457, 2008.
- [18] R. G. Garvey, *Introduction to the Engineering of Explosives*. New York: Wiley, 2006.
- [19] H. Li, "Effect of striker geometry on drop hammer impact tests," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 262, pp. 710–716, 2013.
- [20] S. Bulusu and K. N. Subramanian, "Impact sensitivity tests for detonators: A review," *Defence Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 101–109, 2016.
- [21] A. P. Bowden, "Energy transfer during impact sensitivity tests," *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 345, no. 1641, pp. 351–368, 1975.
- [22] R. J. Hill, *Energetic Materials Testing and Data Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [23] L. Zhang et al., "Statistical analysis of drop-weight impact test for primer sensitivity," *Journal of Energetic Materials*, vol. 30, no. 2, pp. 110–121, 2012.
- [24] Y. Zhao, "Dynamic response of primer pellets under steel ball impact," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 41, no. 4, pp. 520–528, 2016.
- [25] G. R. Cooper, "Impact sensitivity of explosives: Historical development and present practices," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 23, no. 5, pp. 234–240, 1998.
- [26] A. Stine and T. Jackson, *Principles of Ordnance and Gunnery*, 2nd ed. Annapolis: Naval Institute Press, 2009.
- [27] M. Held, "Drop hammer test and its correlation with field performance of primers," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 27, no. 3, pp. 145–151, 2002.
- [28] H. Zhang, "Modeling ignition sensitivity of explosive compositions," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 342, pp. 693–702, 2018.
- [29] J. W. Forbes, *Shock Wave Physics of Condensed Matter*. Berlin: Springer, 2012.
- [30] A. Elbeih, "Mechanical properties and impact sensitivity of detonator mixtures," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 35, no. 2, pp. 123–130, 2010.
- [31] F. Bowden and A. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*, vol. 2. Oxford: Clarendon Press, 1964.