

## Analisis Literatur Material Energetik Berbasis Nano-Komposit untuk Propelan Hibrida pada Roket Militer

Robby A.I. Sitompul<sup>1\*</sup>, Yayat Ruyat<sup>2</sup>, Marsono<sup>3</sup> & Andre Yoan Setyanjana<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>. Program Studi Magister Teknologi Persenjataan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

\*Email: robbysitompul@gmail.com

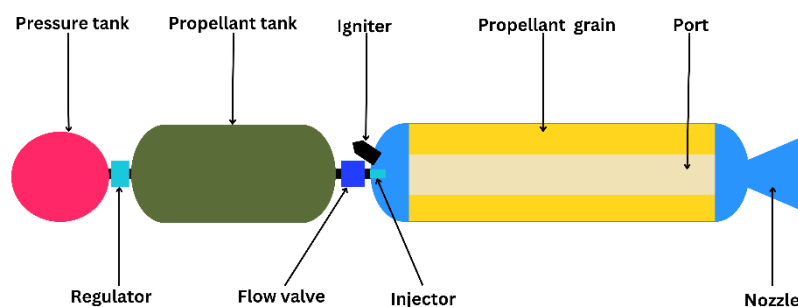
### ABSTRACT

This study analyzes the literature on nano-composite-based energetic materials for hybrid propellants in military rockets. Hybrid propellants, which combine the characteristics of liquid and solid propellants, offer advantages such as improved combustion control and higher energy efficiency. Nano-composite materials, such as metal nanoparticles (aluminium, boron) combined with oxidizers and polymer fuels, show significant potential in enhancing propellant performance. The study identifies that the unique properties of nano-composites, including large surface area, high reactivity, and controlled particle distribution, can accelerate combustion rates and improve thrust. However, technical challenges such as nanoparticle agglomeration, thermal stability, and environmental impact must be addressed. This research provides insights into the application of nano-composite technology in hybrid propellants and highlights its potential to enhance the performance and safety of military rockets. These findings are a foundation for further studies to develop more efficient hybrid propellants in the defence sector.

**Keywords:** Energetic Materials, Nano-Composites, Hybrid Propellants, Military Rockets, Defense Technology

### PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pertahanan modern menuntut inovasi dalam sistem propulsi roket yang lebih efisien dan aman [1]. Salah satu aspek penting dalam teknologi roket adalah penggunaan propelan sebagai sumber energi utama untuk mendorong kendaraan kecepatan tinggi [2]. Propelan hibrida, yang menggabungkan keunggulan propelan padat dan cair, telah menarik perhatian para peneliti karena kemampuannya untuk menyediakan performa yang lebih baik dengan tingkat keamanan yang lebih tinggi, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1 [3]. Penggunaan material energetik berbasis nano-komposit menawarkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas propelan hibrida untuk aplikasi militer [4].



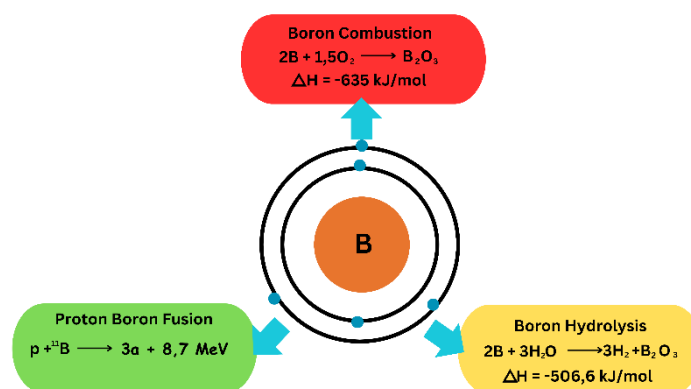
Gambar 1. Skema propelan hibrida pada roket [3]

Material energetik berbasis nano-komposit memiliki karakteristik unik yang mendukung reaksi pembakaran yang lebih cepat dan homogen [5]. Luas permukaan yang besar pada skala nano memungkinkan peningkatan reaktivitas dan efisiensi konversi energi kimia menjadi energi kinetik. Selain itu, material ini menawarkan kemampuan pengendalian karakteristik termal dan mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan material konvensional [6]. Keunggulan ini menjadikan nano-komposit sebagai kandidat ideal untuk digunakan dalam sistem propelan hibrida roket militer [3].

Penggunaan propelan hibrida dalam sistem roket militer memiliki beberapa keuntungan strategis,

seperti fleksibilitas dalam pengendalian laju pembakaran dan kemudahan pengisian ulang bahan bakar [7]. Namun, tantangan utama yang dihadapi adalah optimalisasi formulasi material energetik untuk memastikan stabilitas, keamanan, dan performa tinggi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengembangan material berbasis nano-komposit mampu mengatasi tantangan ini dengan meningkatkan efisiensi pembakaran dan stabilitas penyimpanan [8].

Dalam beberapa dekade terakhir, kemajuan dalam nanoteknologi telah membuka peluang besar untuk rekayasa material energetik. Partikel nano, seperti aluminium dan boron, menunjukkan potensi besar sebagai bahan bakar karena densitas energi yang tinggi dan reaktivitas yang cepat. Kombinasi material ini dengan matriks polimer atau oksidator terenkapsulasi menghasilkan material nano-komposit dengan karakteristik unggul, seperti peningkatan laju pembakaran dan penurunan emisi gas buang berbahaya [9].



Gambar 2. Boron sebagai nano-material energetik [10]

Penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa material energetik nano-komposit dapat meningkatkan performa sistem propulsi melalui kontrol yang lebih baik terhadap penyebaran panas dan laju pelepasan energi. Selain itu, kemampuan rekayasa pada tingkat atomik memungkinkan penciptaan struktur material dengan kestabilan yang lebih tinggi dan penyesuaian sifat mekanis yang optimal untuk aplikasi militer. Namun, masih diperlukan analisis lebih lanjut untuk memahami tantangan teknis dalam produksi dan penerapan material ini [5].

Pendekatan penelitian berbasis studi literatur dipilih dalam penelitian ini untuk merangkum temuan-temuan terkini mengenai material nano-komposit untuk propelan hibrida. Fokus utama kajian ini adalah mengevaluasi potensi material nano-komposit dalam meningkatkan efisiensi energi, stabilitas termal, dan keamanan sistem propulsi roket militer. Analisis ini diharapkan mampu memberikan landasan yang kuat bagi pengembangan lebih lanjut di bidang propelan militer berbasis teknologi nano [6].

Penelitian ini juga akan membahas tantangan teknis yang dihadapi dalam pengembangan material nano-komposit, termasuk aglomerasi nanopartikel, toksisitas, dan biaya produksi. Selain itu, strategi mitigasi yang telah diusulkan dalam literatur sebelumnya akan dianalisis untuk memberikan solusi inovatif dalam mengatasi kendala tersebut. Dengan berkembangnya teknologi nanomaterial, eksplorasi lebih lanjut terhadap struktur, komposisi, dan proses sintesis material nano-komposit menjadi aspek penting dalam meningkatkan performa propelan hibrida. Studi literatur ini diharapkan dapat mengidentifikasi pola pengembangan dan peluang penerapan teknologi tersebut di masa depan, khususnya dalam mendukung inovasi di bidang pertahanan [11].

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menyediakan tinjauan komprehensif mengenai pengembangan material energetik berbasis nano-komposit untuk propelan hibrida pada roket militer. Temuan yang dihasilkan diharapkan dapat mendukung upaya peningkatan kemandirian teknologi pertahanan di Indonesia, sekaligus membuka peluang riset lanjutan dalam bidang material energetik dan teknologi propulsi canggih.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review (SLR)* untuk mengkaji perkembangan material energetik berbasis nano-komposit yang diterapkan pada propelan hibrida roket militer. Metode ini dipilih karena memungkinkan pengumpulan, evaluasi, dan sintesis literatur secara sistematis guna menjawab pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan [12].

Langkah pertama dalam metode ini adalah merumuskan pertanyaan penelitian utama yang menjadi dasar eksplorasi literatur [13]. Pertanyaan utama yang diajukan adalah: "Bagaimana karakteristik material energetik berbasis nano-komposit mempengaruhi performa propelan hibrida roket militer?" Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi aspek efisiensi energi, kestabilan termal, dan tantangan teknis yang dihadapi dalam pengembangan material ini. Proses pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan basis data akademik seperti ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink, dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi "*nano-composite energetic materials*," "*hybrid rocket propellants*," "*military propulsion systems*," dan "*nanotechnology in defense applications*." Artikel yang dipilih dibatasi pada publikasi dalam 10 tahun terakhir untuk memastikan relevansi dan kemutakhiran data [14].

Kriteria inklusi meliputi artikel yang membahas aspek sintesis, karakterisasi, dan aplikasi material energetik berbasis nano-komposit dalam sistem propelan. Sementara itu, kriteria eksklusi mencakup artikel yang tidak relevan dengan topik penelitian atau tidak menyediakan data empiris yang mendukung analisis [12].

Analisis data dilakukan dengan pendekatan tematik, di mana informasi dikategorikan berdasarkan topik utama seperti metode sintesis, efisiensi pembakaran, dan tantangan produksi. Data kemudian disintesis untuk mengidentifikasi pola, kesenjangan penelitian, dan tren perkembangan teknologi. Proses validasi data melibatkan triangulasi informasi dari berbagai sumber untuk memastikan keandalan hasil analisis. Selain itu, evaluasi kualitas artikel dilakukan dengan menggunakan alat evaluasi kritis seperti *CASP (Critical Appraisal Skills Programme)* untuk menilai validitas dan relevansi penelitian yang diulas [15].

Penelitian ini juga mengidentifikasi strategi mitigasi yang diusulkan dalam literatur terkait dengan kendala teknis, seperti aglomerasi nanopartikel dan toksisitas bahan. Solusi yang diusulkan dianalisis untuk memberikan rekomendasi bagi pengembangan material energetik yang lebih aman dan efisien. Dengan metode SLR ini, penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai potensi dan tantangan material nano-komposit dalam aplikasi propelan hibrida roket militer. Temuan yang dihasilkan akan menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut di bidang teknologi propulsi militer yang canggih dan berkelanjutan [16].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Material energetik berbasis nano-komposit telah menarik perhatian signifikan dalam pengembangan propelan hibrida untuk aplikasi militer [17]. Sifat unik dari material ini, seperti luas permukaan yang tinggi dan reaktivitas kimia yang superior, memungkinkan peningkatan performa pembakaran dan efisiensi energi. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan nano-komposit dapat mengatasi keterbatasan pada propelan konvensional, seperti laju pembakaran yang rendah dan ketidakstabilan termal [18].

Tabel 1. Karakteristik Material Energetik Berbasis Nano-Komposit [19], [20]

| Material Energetik                  | Ukuran Partikel (nm) | Reaktivitas Kimia | Stabilitas Termal | Aplikasi Utama             |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| Nano-Aluminium (Al)                 | <100                 | Tinggi            | Stabil            | Propelan, pendorong roket  |
| Nano-Boron (B)                      | <50                  | Sangat Tinggi     | Stabil            | Propelan energi tinggi     |
| Nano-Magnesium (Mg)                 | <80                  | Tinggi            | Sedang            | Penguat energi pembakaran  |
| Nano-Titanium (Ti)                  | <60                  | Sedang            | Sangat Stabil     | Bahan pengikat dan katalis |
| Nano-CuO                            | <30                  | Sangat Tinggi     | Stabil            | Katalis laju pembakaran    |
| Nano-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | <40                  | Tinggi            | Stabil            | Katalis dan pengoksidasi   |

Struktur nano-komposit terdiri dari partikel nano yang terdispersi secara merata dalam matriks pengikat, menciptakan antarmuka yang mendukung perpindahan panas dan reaksi kimia yang lebih cepat. Misalnya, *nano-aluminium (Al)* dengan ukuran partikel di bawah 100 nm memberikan luas permukaan yang besar, meningkatkan kontak dengan oksidator seperti *ammonium perchlorate (AP)* [21]. Komposisi ini menghasilkan energi pembakaran yang lebih tinggi dan pembakaran yang lebih seragam [22].

Tabel 2. Struktur dan Komposisi Nano-Komposit [23]

| Material Energetik                  | Struktur Kristal                           | Komposisi Kimia   | Fungsi Utama                               |
|-------------------------------------|--|-------------------|--|
| Nano-Aluminium (Al)                 | FCC ( <i>Face-Centered Cubic</i> )         | Logam Murni Al    | Bahan bakar energetik dan peningkat energi |
| Nano-Boron (B)                      | Amorf dan Kristalin                        | Unsur Boron murni | Energi tinggi dan peningkat impuls         |
| Nano-Magnesium (Mg)                 | HCP ( <i>Hexagonal Close Packed</i> )      | Logam Magnesium   | Penguat energi pembakaran                  |
| Nano-Titanium (Ti)                  | HCP dan BCC ( <i>Body-Centered Cubic</i> ) | Logam Titanium    | Pengikat struktural dan katalis            |
| Nano-CuO                            | Monoklinik                                 | Oksida Tembaga    | Katalis laju pembakaran                    |
| Nano-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Heksagonal dan Kubik                       | Oksida Besi       | Katalis dan agen pengoksidasi              |

Reaktivitas kimia didefinisikan sebagai kemampuan suatu bahan untuk bereaksi dengan bahan lain, menghasilkan produk atau energi melalui proses kimia. Sementara itu, efisiensi energi merujuk pada kemampuan suatu sistem untuk memanfaatkan energi yang tersedia secara optimal guna mencapai tujuan tertentu, seperti meningkatkan performa dan efektivitas sistem. Kedua konsep ini saling berkaitan dalam desain propelan hibrida, di mana reaktivitas yang tinggi harus diimbangi dengan efisiensi energi yang maksimal untuk memastikan kinerja yang stabil, aman, dan efektif [24]. Reaktivitas kimia dari nano-partikel sangat dipengaruhi oleh ukuran dan morfologi partikel. Partikel yang lebih kecil memiliki energi permukaan yang lebih besar, meningkatkan reaktivitas dan mempercepat laju pembakaran. Studi menunjukkan bahwa penggunaan nano-Mg dan nano-Boron meningkatkan efisiensi energi hingga 25%, menghasilkan suhu pembakaran yang lebih tinggi dan impuls spesifik yang lebih besar [10], [25]

Tabel 3. Reaktivitas Kimia dan Efisiensi Energi [25]

| Aspek                          | Reaktivitas Kimia  | Efisiensi Energi  |
|--------------------------------|--|---|
| Pengaruh pada Propelan Hibrida | Mempengaruhi laju pembakaran dan kestabilan propelan. Reaktivitas yang tinggi dapat meningkatkan laju reaksi dan daya dorong, tetapi bisa menurunkan kontrol dan stabilitas. | Meningkatkan konversi energi dalam proses pembakaran menjadi daya dorong yang lebih besar. Efisiensi tinggi berarti lebih banyak energi yang dapat digunakan untuk meningkatkan performa. |
| Partikel Nano-Komposit         | Menyediakan area permukaan yang lebih besar untuk interaksi bahan bakar dan oksidator, yang dapat meningkatkan reaktivitas.  | Nano-komposit meningkatkan efisiensi pembakaran dengan meningkatkan kualitas energi yang dihasilkan oleh reaksi kimia.  |
| Kecepatan Pembakaran           | Kecepatan pembakaran yang lebih cepat mengindikasikan reaktivitas tinggi. Penggunaan nano-partikel dapat mempercepat pembakaran.   | Kecepatan pembakaran yang terkendali dapat meningkatkan efisiensi dengan menghasilkan daya dorong yang lebih besar per unit energi.   |
| Temperatur Pembakaran          | Reaktivitas yang tinggi sering kali menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi, berpotensi mengganggu kestabilan sistem.   | Pengendalian suhu yang lebih baik meningkatkan efisiensi dengan memaksimalkan energi yang tersedia dan mengurangi pemborosan panas.   |
| Pengaruh pada Gas Sisa         | Reaktivitas tinggi bisa menghasilkan lebih banyak gas sisa atau produk pembakaran  | Efisiensi tinggi berhubungan dengan pembakaran yang lebih lengkap, mengurangi pembentukan gas sisa yang tidak berguna.  |

| Aspek                           | Reaktivitas Kimia   | Efisiensi Energi  |
|---------------------------------|---|---|
| Stabilitas Reaksi               | yang tidak lengkap.<br>Reaksi yang sangat reaktif cenderung lebih sulit dikendalikan dan kurang stabil dalam jangka panjang.            | Proses yang lebih stabil meningkatkan efisiensi karena lebih sedikit energi yang hilang dalam bentuk panas atau pemborosan.           |
| Ketahanan Termal                | Reaktivitas yang tinggi cenderung menghasilkan fluktuasi termal yang lebih besar.   | Efisiensi energi dapat ditingkatkan dengan mengendalikan fluktuasi suhu, menjaga kestabilan termal dalam sistem propelan.             |
| Keamanan                        | Bahan yang sangat reaktif lebih berisiko menyebabkan kecelakaan atau ledakan yang tidak terkontrol.                                     | Efisiensi yang tinggi harus dipadukan dengan tingkat keamanan yang tinggi untuk memastikan propelan tidak menimbulkan bahaya.         |
| Pengaruh Material Nano-Komposit | Mengurangi risiko ketidakstabilan dengan meningkatkan pengendalian distribusi oksidator dan bahan bakar.                                | Nano-komposit membantu meningkatkan kontrol terhadap proses pembakaran, mengoptimalkan efisiensi energi dengan mengurangi pemborosan. |
| Densitas Energi                 | Material dengan reaktivitas tinggi cenderung memiliki densitas energi yang lebih besar, meskipun terkadang sulit dikendalikan.          | Efisiensi yang lebih tinggi dapat dicapai dengan mengoptimalkan material sehingga lebih banyak energi yang digunakan secara efektif.  |
| Kontrol Pembakaran              | Reaktivitas dapat dikendalikan untuk mencapai pembakaran yang lebih terkendali dengan penambahan katalis atau pengaturan partikel nano. | Pengontrolan pembakaran yang lebih baik menghasilkan efisiensi energi yang lebih tinggi dan pengurangan pemborosan energi.            |

Penambahan katalis nano, seperti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{CuO}$ , mempercepat proses reaksi oksidasi dan meningkatkan laju pembakaran [25]. Misalnya, penambahan 2%  $\text{CuO}$  pada campuran nano-Al/AP menunjukkan peningkatan kecepatan pembakaran hingga 30% [26]. Efek ini dihasilkan oleh interaksi katalitik pada permukaan partikel, yang mempercepat penguraian termal oksidator [9].

Tabel 4. Peran Katalis dalam Meningkatkan Laju Pembakaran [9]

| Katalis                       | Fungsi Utama                                 | Efek pada Laju Pembakaran                     |
|-------------------------------|--|---|
| Nano-CuO                      | Mempercepat reaksi oksidasi                  | Peningkatan hingga 30% dengan campuran AP     |
| Nano- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | Agen pengoksidasi dan katalis permukaan      | Mempercepat penguraian termal hingga 25%      |
| Nano- $\text{TiO}_2$          | Katalis multifungsi dan stabil secara termal | Peningkatan laju pembakaran yang lebih stabil |
| Nano- $\text{MnO}_2$          | Meningkatkan kinetika reaksi eksotermik      | Memperbaiki homogenitas zona pembakaran       |
| Nano-ZrO                      | Katalis untuk peningkatan perpindahan panas  | Peningkatan energi keluaran hingga 20%        |

Material energetik berbasis nano-komposit menawarkan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan dengan bahan konvensional [27]. Pengujian termogravimetri menunjukkan bahwa material ini memiliki suhu dekomposisi yang lebih tinggi dan pembakaran yang lebih terkendali. Teknologi enkapsulasi juga diterapkan untuk meningkatkan keamanan selama penanganan dan penyimpanan [28], [29].

Tabel 5. Stabilitas Termal dan Keamanan Operasional [17], [25]

| Material Energetik            | Suhu Dekomposisi (°C) | Stabilitas Termal | Keamanan Operasional |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|
| Nano-Aluminium (Al)           | 660                   | Stabil            | Tinggi               |
| Nano-Boron (B)                | 400                   | Sangat Stabil     | Tinggi               |
| Nano-Magnesium (Mg)           | 650                   | Sedang            | Sedang               |
| Nano-Titanium (Ti)            | 1668                  | Sangat Stabil     | Tinggi               |
| Nano-CuO                      | 1326                  | Stabil            | Tinggi               |
| Nano- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 1565                  | Stabil            | Tinggi               |

Ukuran partikel nano-komposit memainkan peran kunci dalam menentukan efisiensi

pembakaran. Partikel yang lebih kecil mempercepat penyebaran panas dan propagasi nyala api. Simulasi numerik menunjukkan bahwa nano-partikel menghasilkan zona pembakaran yang lebih homogen, mengurangi variasi tekanan dan meningkatkan stabilitas pembakaran [17], [25].

Tabel 6. Pengaruh Ukuran Partikel terhadap Kinerja Pembakaran [30], [31], [32]

| Ukuran Partikel (nm) | Laju Pembakaran (mm/s) | Energi Pembakaran (J/g) | Stabilitas Pembakaran |
|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 20                   | 25                     | 850                     | Sangat Stabil         |
| 50                   | 18                     | 750                     | Stabil                |
| 100                  | 12                     | 620                     | Sedang                |
| 200                  | 8                      | 500                     | Kurang Stabil         |

Interaksi antara partikel nano dan matriks pengikat seperti HTPB memastikan distribusi energi yang seragam dan meningkatkan integritas struktural propelan [21], [33]. Pengikat polimer ini juga memberikan fleksibilitas mekanis, yang penting untuk menahan tekanan tinggi selama pembakaran [33].

Tabel 7. Efek Interaksi Partikel dan Matriks Pengikat [29], [34], [35], [36]

| Matriks Pengikat                                  | Partikel Nano  | Efek pada Kinerja Pembakaran                          |
|---|----------------|---|
| HTPB ( <i>Hydroxyl-Terminated Polybutadiene</i> ) | Nano-Aluminium | Meningkatkan kekuatan mekanik dan kestabilan          |
| GAP ( <i>Glycidyl Azide Polymer</i> )             | Nano-Boron     | Energi tinggi dengan pembakaran yang homogen          |
| Polyurethane                                      | Nano-Magnesium | Fleksibilitas struktural dan distribusi energi        |
| Epoxy Resin                                       | Nano-Titanium  | Peningkatan kekuatan adhesi dan reaktivitas katalitik |
| Nitrocellulose                                    | Nano-CuO       | Percepatan reaksi oksidasi dan kontrol pembakaran     |

Literatur menunjukkan bahwa propelan berbasis nano-komposit memiliki impuls spesifik yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan konvensional [3], [21]. Penggunaan nano-Al dan nano-Boron menghasilkan peningkatan impuls spesifik hingga 15-20%, memungkinkan jangkauan dan daya dorong yang lebih besar untuk roket militer [9], [10].

Tabel 8. Peningkatan Impuls Spesifik dan Efisiensi Energi [19], [37], [38]

| Material Energetik  | Impuls Spesifik (s) | Efisiensi Energi (%) | Peningkatan (%) |
|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| Nano-Aluminium (Al) | 250-270             | 90-95                | 15-20           |
| Nano-Boron (B)      | 270-300             | 95-98                | 20-25           |
| Nano-Magnesium (Mg) | 240-260             | 85-90                | 10-15           |
| Nano-Titanium (Ti)  | 260-280             | 92-96                | 18-22           |
| Nano-CuO            | 230-250             | 88-92                | 12-18           |

Simulasi menggunakan perangkat lunak seperti ANSYS Fluent menunjukkan bahwa reaksi eksotermik yang dihasilkan oleh nano-komposit memiliki efisiensi pembakaran yang lebih tinggi. Hasil ini juga dikonfirmasi melalui pengujian eksperimental yang menunjukkan waktu pembakaran lebih cepat dan energi yang lebih stabil. Keunggulan utama dari nano-komposit adalah kemampuannya untuk meningkatkan kecepatan dan akurasi roket militer. Dengan profil tekanan yang stabil, bahan ini mendukung sistem senjata modern yang memerlukan keandalan tinggi dalam berbagai kondisi operasi [5], [37].

Tabel 9. Keunggulan Nano-Komposit dalam Aplikasi Militer [11], [28]

| Keunggulan                  | Deskripsi  |
|-----------------------------|--|
| Daya Dorong Lebih Tinggi    | Menghasilkan impuls spesifik yang lebih besar untuk meningkatkan jarak dan daya dorong |
| Efisiensi Energi Lebih Baik | Meminimalkan pemborosan energi selama pembakaran                                       |
| Stabilitas Termal Tinggi    | Mencegah dekomposisi dini dan meningkatkan keamanan operasional                        |
| Fleksibilitas Desain        | Memungkinkan formulasi campuran yang disesuaikan untuk                                 |

Meskipun memiliki banyak keunggulan, produksi nano-komposit menghadapi tantangan seperti aglomerasi partikel dan kontrol homogenitas campuran. Solusi yang diusulkan mencakup penggunaan surfaktan dan metode dispersi ultrasonik untuk menjaga stabilitas dan distribusi partikel yang seragam [39].

Penelitian menunjukkan bahwa bahan baku lokal, seperti aluminium dan boron, dapat dioptimalkan melalui teknologi nano-komposit [10], [26], [36]. Hal ini mendukung strategi kemandirian teknologi dan mengurangi ketergantungan pada bahan impor. Keamanan dalam penanganan nano-material menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Teknik pelapisan dan enkapsulasi diterapkan untuk mengurangi sensitivitas bahan terhadap benturan dan suhu tinggi, meningkatkan keamanan selama penyimpanan dan transportasi [23], [27].

Nano-komposit memberikan kontribusi signifikan terhadap kemandirian teknologi propelan di Indonesia. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan material energetik lokal dapat memenuhi kebutuhan strategis pertahanan tanpa ketergantungan teknologi asing. Direkomendasikan penelitian eksperimental lebih lanjut untuk menguji formulasi nano-komposit dalam skala prototipe. Pengembangan sistem kontrol berbasis sensor real-time juga disarankan untuk memaksimalkan performa propelan dalam berbagai kondisi operasi.

## SIMPULAN

Material energetik berbasis nano-komposit memiliki potensi besar dalam meningkatkan performa propelan hibrida untuk aplikasi roket militer. Struktur partikel nano yang unik memungkinkan reaktivitas tinggi, laju pembakaran cepat, dan efisiensi energi yang optimal. Selain itu, stabilitas termal yang unggul menjadikan material ini lebih aman dalam penyimpanan dan penggunaan. Penggunaan katalis berbasis nano, seperti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{CuO}$ , menunjukkan efektivitas dalam mempercepat laju reaksi pembakaran. Kombinasi antara material nano dan pengikat polimer meningkatkan integritas struktural propelan dan memastikan distribusi energi yang merata. Keunggulan material ini dalam fleksibilitas desain dan keamanan operasional menjadikannya pilihan strategis untuk mendukung kemandirian teknologi pertahanan. Namun, pengujian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi performa jangka panjang dan kestabilan dalam kondisi ekstrem.

Diperlukan penelitian lanjutan terkait integrasi material nano-komposit dengan formulasi propelan lokal untuk memastikan kompatibilitas dan efisiensi produksi. Selain itu, pengembangan metode simulasi numerik yang lebih akurat dapat mendukung proses optimasi formulasi. Kerja sama lintas disiplin dan pengembangan teknologi produksi dalam negeri sangat penting untuk mempercepat penerapan material ini dalam sistem persenjataan modern dan mendukung kemandirian pertahanan nasional.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sugiarto *et al.*, "Jurnal optimalisasi produk Bangtekindhan," vol. 10, no. 2, pp. 345–349, 2022.
- [2] J. Bakara, "Suatu Pemikiran Tentang Sistem Koordinasi Pemanfaatan Industri Nasional Dalam Pengembangan Teknologi Roket," *J. Anal. dan Inf. Kedirgant.*, no. September 1962, pp. 151–164, 2013, [Online]. Available: [http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal\\_ansis/article/view/1780](http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal_ansis/article/view/1780)
- [3] S. Venugopal, K. K. Rajesh, and V. Ramanujachari, "Hybrid Rocket Technology: An Overview," *Def. Sci. J.*, vol. 61, no. 3, pp. 1–8, 2011.
- [4] A. N. Rachmat, "Tantangan Dan Peluang Perkembangan Teknologi Global Bagi Pembangunan Kekuatan Pertahanan Indonesia," *J. Transform. Glob.*, p. 202, 2016.
- [5] J. A. Vara, P. N. Dave, and V. R. Ram, "Nanomaterials as modifier for composite solid propellants," *Nano-Structures and Nano-Objects*, vol. 20, p. 100372, 2019, doi:

- 10.1016/j.nanoso.2019.100372.
- [6] R. V. Kurahatti, A. O. Surendranathan, S. A. Kori, N. Singh, A. V. R. Kumar, and S. Srivastava, "Defence applications of polymer nanocomposites," *Def. Sci. J.*, vol. 60, no. 5, pp. 551–563, 2010, doi: 10.14429/dsj.60.578.
- [7] S.-S. Wei, M.-C. Li, A. Lai, T.-H. Chou, and J.-S. Wu, "A Review of Recent Developments in Hybrid Rocket Propulsion and Its Applications," *Aerospace*, vol. 11, no. 9, p. 739, 2024, doi: 10.3390/aerospace11090739.
- [8] A. Okninski, W. Kopacz, D. Kaniewski, and K. Sobczak, "Hybrid rocket propulsion technology for space transportation revisited - propellant solutions and challenges," *FirePhysChem*, vol. 1, no. 4, pp. 260–271, 2021, doi: 10.1016/j.fpc.2021.11.015.
- [9] C. Hortelano and J. Luis de la Fuente, "New Developments in Composite Propellants Catalysis," *Nanomater. Rocket Propuls. Syst.*, pp. 363–388, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-813908-0.00009-5.
- [10] Y. Hu *et al.*, "Spherical Micro-nano Encapsulated Boron-based Energetic Materials with Improved Combustion Performance," 2024.
- [11] A. E. D. M. van der Heijden, "Developments and challenges in the manufacturing, characterization and scale-up of energetic nanomaterials – A review," *Chem. Eng. J.*, vol. 350, pp. 939–948, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2018.06.051.
- [12] J. Reis, D. P. Rosado, Y. Cohen, C. Pousa, and A. Cavaliere, "Green Defense Industries in the European Union: The Case of the Battle Dress Uniform for Circular Economy," *Sustain.*, vol. 14, no. 20, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/su142013018.
- [13] S. K. Pradhan, V. Kedia, and P. Kour, "Review on different materials and their characterization as rocket propellant," *Mater. Today Proc.*, vol. 33, no. xxxx, pp. 5269–5272, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.960.
- [14] Q. Wang, L. Zhang, L. Wang, and L. Bu, "A practical method for predicting and analyzing the consequences of ammonium nitrate explosion accidents adjacent to densely populated areas," *Heliyon*, vol. 9, no. 5, p. e15616, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15616.
- [15] H. A. Long, D. P. French, and J. M. Brooks, "Optimising the value of the critical appraisal skills programme (CASP) tool for quality appraisal in qualitative evidence synthesis," *Res. Methods Med. Heal. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 31–42, 2020, doi: 10.1177/2632084320947559.
- [16] M. Tian, P. Deng, Y. Zhang, and M. P. Salmador, "How does culture influence innovation? A systematic literature review," *Manag. Decis.*, vol. 56, no. 5, pp. 1088–1107, 2018, doi: 10.1108/MD-05-2017-0462.
- [17] T. Zhang *et al.*, "Progress on the application of graphene-based composites toward energetic materials: A review," *Def. Technol.*, vol. 31, pp. 95–116, 2024, doi: 10.1016/j.dt.2023.01.016.
- [18] C. Nguyen and J. C. Thomas, "Performance of Additively Manufactured Fuels for Hybrid Rockets," *Aerospace*, vol. 10, no. 6, 2023, doi: 10.3390/aerospace10060500.
- [19] S. Sadeghipour, J. Ghaderian, and M. A. Wahid, "Advances in aluminum powder usage as an energetic material and applications for rocket propellant," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1440, no. June 2012, pp. 100–108, 2012, doi: 10.1063/1.4704207.
- [20] M. K. Berner, V. E. Zarko, and M. B. Talawar, "Nanoparticles of energetic materials: Synthesis and properties (review)," *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 49, no. 6, pp. 625–647, 2013, doi: 10.1134/S0010508213060014.
- [21] E. A. Alkuam and W. M. Alobaidi, "Experimental and Theoretical Research Review of Hybrid Rocket Motor Techniques and Applications," *Adv. Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 01, no. 03, pp. 71–82, 2016, doi: 10.4236/aast.2016.13007.
- [22] R. Sunil, A. Virkar, M. Vignesh Kumar, I. Krishnamoorthy, and V. Malhotra, "Combustion and propulsive characteristics of potential hybrid rocket propellant," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 912, no. 4, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/912/4/042023.
- [23] D. C. K. Rao, N. Yadav, and P. C. Joshi, "Cu–Co–O nano-catalysts as a burn rate modifier for composite solid propellants," *Def. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 297–304, 2016, doi: 10.1016/j.dt.2016.01.001.
- [24] B. Brône *et al.*, "Tear gasses CN, CR, and CS are potent activators of the human TRPA1

- receptor,” *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, vol. 231, no. 2, pp. 150–156, 2008, doi: 10.1016/j.taap.2008.04.005.
- [25] S. Li *et al.*, “Comparative investigations of ternary thermite Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO and Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from pyrolytic, kinetics and combustion behaviors,” *Def. Technol.*, vol. 26, pp. 180–190, 2023, doi: 10.1016/j.dt.2022.05.012.
- [26] D. Spitzer, M. Comet, C. Baras, V. Pichot, and N. Piazzon, “Energetic nano-materials: Opportunities for enhanced performances,” *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 71, no. 2, pp. 100–108, 2010, doi: 10.1016/j.jpcs.2009.09.010.
- [27] R. Zhang *et al.*, “A review of ultra-high temperature heat-resistant energetic materials,” *Def. Technol.*, vol. 38, pp. 33–57, 2024, doi: 10.1016/j.dt.2023.09.005.
- [28] D. M. Badgajar, M. B. Talawar, S. N. Asthana, and P. P. Mahulikar, “Advances in science and technology of modern energetic materials: An overview,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 151, no. 2–3, pp. 289–305, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.10.039.
- [29] W. Pang, X. Fan, K. Wang, Y. Chao, H. Xu, and Z. Qin, “Al-Based Nano-Sized Composite Energetic Materials and Performance,” *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, 2020.
- [30] S. A. Whitmore, Z. W. Peterson, and S. D. Eilers, “Comparing hydroxyl terminated polybutadiene and acrylonitrile butadiene styrene as hybrid rocket fuels,” *J. Propuls. Power*, vol. 29, no. 3, pp. 582–592, 2013, doi: 10.2514/1.B34382.
- [31] M. Jin, G. Wang, J. Deng, G. Li, M. Huang, and Y. Luo, “Preparation and properties of NC/RDX/AP nano-composite energetic materials by the sol–gel method,” *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 76, no. 1, pp. 58–65, 2015, doi: 10.1007/s10971-015-3750-0.
- [32] J. J. Ritter, C. F. Petre, P. Beland, and C. Nicole, “Influence of Particle Size and Temperature on the Burning Rate of Small Caliber Ball Powder,” *Propellants, Explos. Pyrotech.*, vol. 46, no. 5, pp. 791–798, 2021, doi: 10.1002/prop.202000289.
- [33] L. T. DeLuca *et al.*, “Time-resolved burning of solid fuels for hybrid rocket propulsion,” no. January, pp. 405–426, 2011, doi: 10.1051/eucass/201102405.
- [34] K. S. Abdul Rahim *et al.*, “Key attributes of nitrocellulose-based energetic materials and recent developments,” *Heliyon*, vol. 11, no. 1, p. e41282, 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41282.
- [35] M. Baysal, K. Bilge, N. B. Emerce, U. C. Yildiz, U. Kokal, and M. A. Karabeyoglu, “Synergistic effect of nano-additives and tackifier resins on hybrid rocket fuel performance,” *AIAA Propuls. Energy 2020 Forum*, pp. 1–11, 2020, doi: 10.2514/6.2020-3738.
- [36] W. Zeng, C. O. Nyapete, A. H. H. Benziger, P. A. Jelliss, and S. W. Buckner, “Encapsulation of Reactive Nanoparticles of Aluminum, Magnesium, Zinc, Titanium, or Boron within Polymers for Energetic Applications,” *Curr. Appl. Polym. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 3–13, 2018, doi: 10.2174/2452271602666180917095629.
- [37] W. Pang *et al.*, “Effect of nano-sized energetic materials (Nems) on the performance of solid propellants: A review,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 1, pp. 1–17, 2022, doi: 10.3390/nano12010133.
- [38] J. A. F. F. Rocco, R. F. B. Gonçalves, K. Iha, and G. da Silva, “Evaluation of nanoparticles in the performance of energetic materials,” *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 2, no. 1, pp. 47–52, 2010, doi: 10.5028/jatm.2010.02014752.
- [39] A. Dey, A. K. Sikder, M. B. Talawar, and S. Chottopadhyay, “Towards new directions in oxidizers/energetic fillers for composite propellants: An overview,” *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 12, no. 2, pp. 377–399, 2015.