

Analisis Pemanfaatan Oksidator Ramah Lingkungan sebagai Alternatif Amonium Perklorat dalam Propelan Komposit untuk Mendukung Kemandirian Industri Pertahanan

Nurul Ilmi*, Timbul Siahaan, I Nengah Putra, Rizky Dwiandra Putra, Aris Haryanto

Program Studi Industri Pertahanan, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan, Bogor, Indonesia

*Koresponden email: nurul.ilmi@tp.idu.ac.id

Diterima: 15 Maret 2025

Disetujui: 29 Maret 2025

Abstract

Composite propellants are the primary fuel in rocket propulsion systems, consisting of a binder, fuel, and oxidizer. Ammonium perchlorate (AP) has long been used as an oxidizer in composite propellants due to its high performance and optimal combustion characteristics. However, the use of AP has negative environmental impacts due to hydrogen chloride (HCl) emissions, which contribute to air pollution and the potential for acid rain. Therefore, environmentally friendly alternative oxidizers are needed to support the defense industry. This study employs a qualitative method based on a literature review to analyze alternative oxidizers such as ammonium nitrate (AN), ammonium dinitramide (ADN), hydrazinium nitroformate (HNF), and hexaazaisowurtzitan (HNIW). The findings indicate that ADN is the most promising alternative to AP due to its good oxygen balance, high specific impulse (Isp), and more environmentally friendly combustion products. Meanwhile, HNF and HNIW exhibit high performance but are less stable and more sensitive to shocks. AN is a more economical and readily available oxidizer; however, it has limitations in terms of thermal stability and burn rate. These alternative oxidizers have the potential to replace AP in reducing environmental impact while supporting the self-sufficiency of the defense industry, considering aspects of safety, energy efficiency, and environmental impact. Further research is needed to enhance the stability of ADN and develop more efficient and sustainable production strategies for alternative oxidizers.

Keywords: *composite propellant, ammonium perchlorate, alternative oxidizer, defense industry*

Abstrak

Propelan komposit adalah bahan bakar utama dalam sistem pendorong roket yang terdiri dari binder, bahan bakar dan oksidator. Amonium perklorat (AP) telah lama digunakan sebagai oksidator dalam propelan komposit, karena memiliki performa tinggi serta pembakaran yang optimal. Namun, penggunaan AP menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan akibat emisi hidrogen klorida (HCl) yang berdampak negatif terhadap lingkungan, termasuk pencemaran udara dan potensi hujan asam. Oleh karena itu, diperlukan alternatif oksidator yang lebih ramah lingkungan untuk mendukung industri pertahanan. Penelitian ini menggunakan metode kualitatif berbasis studi literatur untuk menganalisis oksidator alternatif seperti amonium nitrat (AN), amonium dinitramida (ADN), hidrazinium nitroformate (HNF), dan hexaazaisowurtzitan (HNIW). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ADN merupakan oksidator yang paling potensial sebagai pengganti AP karena memiliki keseimbangan oksigen yang baik. Impuls spesifik (Isp) yang tinggi, serta produk pembakaran yang lebih ramah lingkungan. Sedangkan HNF dan HNIW memiliki performa tinggi namun kurang stabil dan sensitif terhadap guncangan. AN merupakan oksidator yang lebih ekonomis dan mudah diperoleh, tetapi memiliki keterbatasan dalam stabilitas termal dan kecepatan pembakaran. Alternatif oksidator ini berpotensi menggantikan AP dalam mengurangi dampak lingkungan untuk mendukung kemandirian industri pertahanan dengan memperhatikan aspek keamanan, efisiensi energi dan dampak lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan stabilitas AND serta mengembangkan strategi produksi oksidator alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *propelan komposit, amonium perklorat, oksidator alternatif, industri pertahanan*

1. Pendahuluan

Propelan komposit merupakan campuran bahan kimia yang dirancang untuk menghasilkan daya dorong yang memiliki energi sangat besar, sehingga banyak digunakan untuk roket peluncur jarak jauh maupun sustainer roket pertahanan. Komponen utama propelan komposit yaitu binder (pengikat),

oksidator, dan bahan bakar [1]. Binder adalah resin polimer yang berfungsi sebagai pembentuk matriks komposit sekaligus bahan bakar dalam propelan. Bahan oksidator merupakan senyawa dengan kandungan oksigen tinggi yang terurai dan melepaskan energi dalam jumlah besar. Bahan bakar berfungsi untuk meningkatkan suhu pembakaran dan zat yang dapat terbakar ketika dikombinasikan dengan gas penghasil oksigen, sehingga menghasilkan tenaga penggerak [10].

Salah satu oksidator yang paling banyak digunakan dalam propelan komposit adalah Amonium Perklorat (NH_4ClO_4). Amonium Perklorat dipilih karena memiliki karakteristik energi yang tinggi, stabilitas termal yang baik, dan performa pembakaran yang optimal. Keunggulan lainnya termasuk berat molekul yang rendah, tidak berasap saat terbakar, serta kemampuan menghasilkan tekanan dan daya dorong tinggi [9]. Oleh karena itu, sejak tahun 1950-an, ammonium perklorat menjadi standar utama dalam berbagai sistem persenjataan dan eksplorasi luar angkasa, termasuk dalam roket NASA dan rudal balistik antar benua (ICBM) Amerika Serikat [14].

Namun, penggunaan amonium perklorat memiliki beberapa kerugian, terutama pada dampak lingkungan. Pembakaran amonium perklorat menghasilkan gas Hidrogen Klorida (HCl) yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, meningkatkan keasaman atmosfer, dan berkontribusi terhadap kerusakan lapisan ozon [14]. Selain itu, sifat higroskopik dan reaktivitas tinggi dari ammonium perklorat menimbulkan risiko dalam penyimpanan dan transportasi, karena dapat menyebabkan degradasi propelan dalam kondisi kelembaban tinggi serta meningkatkan ledakan yang tidak terduga.

Tabel 1. Sifat Kimia Ammonium Perklorat (AP)

Rumus Kimia	NH_4ClO_4
Wujud	Kristal putih padat
Keseimbangan oksigen [%]	+ 34.00
Massa Molar [$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$]	117.50
Densitas [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1.95
ΔH_f [$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$]	- 295.8
Q_{ex} (air dalam keadaan gas) [J/g]	1.396
Q_{ex} (air dalam keadaan cair pada 20°C) [J/g]	1972
Titik leleh [°C]	130
Dampak lingkungan	Negatif
Kelarutan	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Larut dalam methanol ◦ Sebagian larut dalam aseton ◦ Tidak larut dalam eter ◦ Larut dalam air: <ul style="list-style-type: none"> - 11.56 g/100 ml (0°C) - 20.85 g/100 ml (20°C) - 57.01 g/100 ml (100°C)

Sumber : [4], [14]

Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif oksidator yang lebih ramah lingkungan untuk mendukung kemandirian industri pertahanan nasional serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Beberapa oksidator ramah lingkungan telah dikembangkan sebagai pengganti ammonium perklorat, seperti, amonium nitrat (AN), ammonium dinitramide (ADN), hidrazinium nitroformate (HNF) dan hexaazaisowurtzitane (HNIW atau CL-20) yang menawarkan kinerja propelan tinggi dengan emisi gas rendah [6]. Alternatif ini tidak hanya mengurangi polusi udara tetapi juga mendukung program keberlanjutan industri pertahanan yang lebih ramah lingkungan.

Dalam artikel ini, akan dilakukan analisis terkait beberapa aspek yang terkait dengan pemanfaatan oksidator ramah lingkungan sebagai alternatif ammonium perklorat dalam propelan komposit. Pembahasan lebih detail juga membahas performa energi, stabilitas termal, serta dampak lingkungan dari penggunaan alternatif oksidator. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berharga dalam

pengembangan teknologi propelan yang berkelanjutan serta mendukung kemandirian industri pertahanan nasional.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian tentang analisis pemanfaatan oksidator ramah lingkungan sebagai alternatif amonium perklorat dalam propelan komposit akan menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis metode deskriptif analitis untuk mengkaji karakteristik, kinerja, dan dampak lingkungan dari oksidator yang telah disebutkan seperti AN, ADN, HNF, dan HNIW. Metode ini digunakan untuk memperoleh pemahaman untuk menghasilkan alternatif oksidator ramah lingkungan dalam propelan komposit serta implikasinya terhadap industri pertahanan [4]. Studi pustaka dilakukan dengan mengacu pada karakteristik sifat oksidator alternatif, mengidentifikasi dan mengevaluasi sifat fisiokimia dari berbagai oksidator alternatif. Pendekatan ini dilakukan dengan cara mengkaji jurnal-jurnal penelitian terdahulu kemudian dikaji dan dibahas. Hasil dan pembahasan diperoleh dengan cara mengumpulkan berbagai data dari referensi hingga telaah jurnal-jurnal yang relevan. Selanjutnya hasil karakteristik oksidator alternatif dari beberapa jurnal penelitian terdahulu dapat dibandingkan untuk menghasilkan data dan informasi yang komprehensif dan bermanfaat yang dapat digunakan dalam penelitian selanjutnya dan perkembangan teknologi propelan.

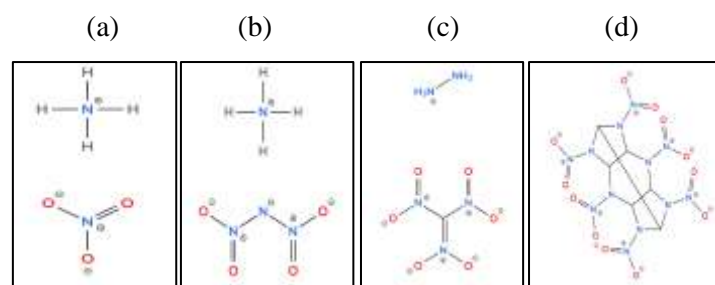
Data terkumpul melalui Langkah-langkah diatas akan dianalisis secara mendalam menggunakan pendekatan kualitatif jenis metode naratif. Analisis akan dilakukan dengan mengidentifikasi hubungan antara sifat oksidator alternatif dengan performa dan dampaknya terhadap lingkungan serta industri pertahanan. Selama proses penelitian, peneliti akan menjaga keabsahan data dengan melakukan triangulasi data, yaitu membandingkan dan memverifikasi informasi dari berbagai sumber yang berbeda. Dengan metode penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman mengenai potensi oksidator ramah lingkungan sebagai alternatif amonium perklorat dalam propelan komposit serta kontribusinya dalam mendukung kemandirian industri pertahanan.

3. Hasil dan Pembahasan

Penggunaan propelan komposit dalam industri pertahanan khususnya pada roket telah berkembang pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem pendorong yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Salah satu komponen utama dalam propelan komposit adalah oksidator, yang berfungsi sebagai penyedia oksigen dalam reaksi pembakaran untuk menghasilkan daya dorong [5]. Amonium perklorat (AP) merupakan oksidator yang paling umum digunakan dalam propelan komposit karena memiliki keseimbangan oksigen tinggi (+34), densitas 1,95%, dan menghasilkan produk pembakaran dengan impuls spesifik tinggi [15]. Namun, dampak lingkungan dari penggunaan senyawa ini menimbulkan beberapa kerugian, terutama dikarenakan emisi gas hidrogen klorida (HCl) yang dihasilkan selama pembakaran, yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan [14]. Oleh karena itu, oksidator alternatif seperti AP, AND, HNF dan HNIW mulai dikembangkan sebagai pengganti AP.

Karakteristik dan Potensi Oksidator Alternatif

Senyawa kimia AN, ADN, HNF, dan HNIW termasuk senyawa yang memiliki energi tinggi berdasarkan oksidator dan pengikat polimer yang ramah lingkungan. Karakteristik energi, seperti panas ledakan, suhu produk dan impuls spesifik. Masing-masing oksidator ini memiliki keunggulan dan keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam aplikasinya. Oleh karena itu, pembahasan berikut akan menguraikan karakteristik, kelebihan, serta tantangan yang terkait dengan penggunaan oksidator-oksidator tersebut dalam sistem propelan roket dan bahan peledak.



Gambar 1. Struktur Kimia (a) amonium nitrat (AN), (b) ammonium dinitramide (ADN), (c) hydrazinium nitroformate (HNF) dan (d) hexaazaisowurtzitane (HNIW)

Sumber : [16]

Amonium Nitrat (AN) merupakan oksidator yang memiliki kelebihan dalam ketersediaan bahan baku, biaya produksi rendah, serta tidak menghasilkan HCl dalam proses pembakarannya. AN dapat digunakan sebagai bahan peledak atau campuran peledak [7]. Namun, AN memiliki kelemahan yaitu stabilitas termal yang rendah, hal ini memberikan risiko mengalami detonasi spontan dalam kondisi tertentu. Selanjutnya, memiliki kecepatan pembakaran yang rendah, yang membuatnya memerlukan campuran bahan lain untuk meningkatkan performa.

Amonium Dinitramida (ADN) adalah oksidator yang relatif baru dan dapat dianggap sebagai pengganti terbaik untuk AP khususnya dalam propelan roket pertahanan. ADN memiliki keseimbangan oksigen yang lebih baik, entalpi pembentukan yang lebih positif, panas ledakan yang lebih tinggi dan lebih ramah lingkungan. Salah satu kelemahan ADN adalah pada stabilitas termal yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan AP. Namun, stabilitas yang lebih rendah tidak juga menjadi penghalang penerapannya dalam roket pertahanan. Stabilitas ADN tidak jauh lebih rendah daripada HNF yang tidak distabilkan. Jika memungkinkan untuk menemukan stabilisator, ADN dapat dianggap sebagai alternatif oksidator pengganti AP [2].

Hydrazinium Nitroformate (HNF) juga merupakan salah satu alternatif oksidator terbaik untuk propelan roket pertahanan dikarenakan memiliki nilai impuls spesifik (I_{sp}) yang jauh lebih tinggi dibandingkan AP dan sedikit lebih rendah dibandingkan HNIW, serta memiliki produk pembakaran lebih ramah lingkungan dibandingkan AP karena tidak terdapat klorin, walaupun masih memiliki beberapa residu nitrogen oksida [8]. Namun, HNF memiliki sensitivitas tinggi sehingga memerlukan penanganan yang sangat hati-hati dalam penyimpanan dan penggunaannya.

Hexaazaisowurtzitane (HNIW atau CL-20) merupakan oksidator dengan impuls spesifik terbesar dari oksidator alternatif pada penelitian ini. HNIW memiliki keunggulan kepadatan yang tinggi, tekanan yang optimal dan memiliki kecepatan pembakaran yang tinggi. Namun, senyawa ini memiliki tantangan terkait stabilitas termal dan sensitivitas terhadap guncangan, sehingga memerlukan pengendalian yang ketat dalam proses penyimpanan, transportasi dan pemrosesan. Selain itu, HNIW memerlukan proses sintesis yang lebih rumit, sehingga memerlukan biaya yang mahal [13]. Berdasarkan beberapa penelitian **Tabel 2** menunjukkan tabel perbandingan sifat fisikokimia AP dan beberapa oksidator alternatif.

Tabel 2. Sifat Fisiokimia dari AN, AND, HNF dan HNIW

Properti	AP	AN	ADN	HNF	HNIW
Penelitian (Tahun)	Dirloman et al., (2020)	Dirloman et al., (2020)	Dirloman et al., (2020)	Kositsyna et al., (2021)	Kositsyna et al., (2021)
Rumus Kimia	NH_4ClO_4	NH_4NO_3	$NH_4N(NO_2)_2$	$N_2H_5C(NO_2)_3$	$C_6H_6N_{12}O_{12}$
Massa Molar (g/mol)	117.50	80.04	124.05	183.07	438.19
Pembentukan Entalpi (ΔH_f , kJ/mol)	-295.8	-365.22	-150.6	-72	+454
Keseimbangan Oksigen (%)	+34	+20	+26	+13	-11
Densitas (g/cm^3)	1.95	1.72	1.81	1.91	2.04
I_{sp} (s)	158.76	239	202	254.37	272.81
T_M ($^{\circ}C$)	130	169.9	92.9	124	160

Sumber : [4], [6]

Berdasarkan data yang diperoleh pada **Tabel 2**, karakteristik fisiokimia dari berbagai oksidator menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam massa molar, pembentukan entalpi, keseimbangan oksigen, densitas, dan produk pembakaran. Oksidator yang memiliki keseimbangan positif cenderung lebih efisien dalam proses pembakaran, menghasilkan produk dengan emisi gas beracun yang lebih rendah. Dari tabel di atas amonium nitrat (AN) dan amonium dinitramide (ADN) memiliki nilai oksigen yang sangat tinggi, berkisar antara +20% hingga +26%, masing-masing, dengan produk pembakaran utama adalah H_2O , N_2 , dan O_2 . Hal ini menunjukkan bahwa AN dan ADN adalah oksidator dengan ramah lingkungan yang lebih besar jika dibandingkan dengan amonium perklorat (AP) dan hexanitrohexaazaisowurtzitane (HNIW), yang menghasilkan gas beracun seperti HCl dan CO_2 .

Selain itu, entalpi pembentukan menunjukkan bahwa ADN memiliki nilai entalpi pembentukan sebesar -150,6 kJ/mol, yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan AN (-365,22 kJ/mol) dan AP (-295,8

kJ/mol). Hal ini mengindikasikan bahwa ADN memiliki stabilitas termodinamika yang lebih baik dan dapat menjadi alternatif oksidator yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Berdasarkan hasil analisis keseimbangan oksigen, produk pembakaran, dan pembentukan entalpi, dapat disimpulkan bahwa AN dan ADN merupakan oksidator yang lebih kuat dibandingkan HNF, dan HNIW. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan karakteristik AN dan ADN dalam formula propelan guna meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi kelembaban lingkungan secara signifikan.

Perbandingan Impuls Spesifik (Isp) dengan Oksidator Alternatif

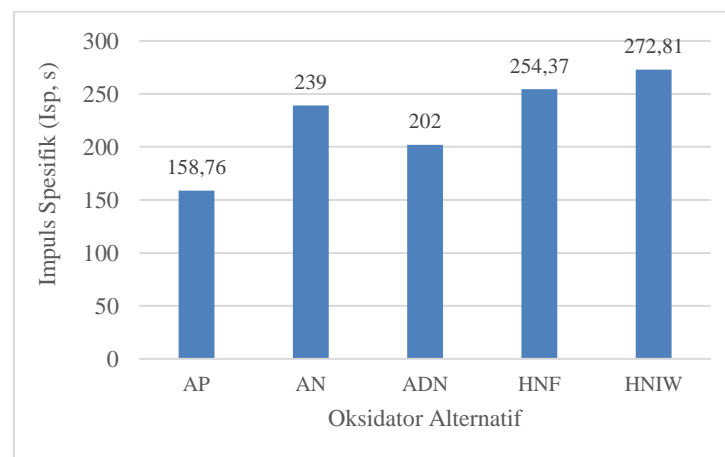
Diketahui bahwa kinerja propelan juga dipengaruhi oleh Impuls spesifik (Isp) yang merupakan ukuran daya dorong per satuan laju aliran berat propelan dalam sistem pendorong, sama halnya dengan konsumsi bahan bakar per jarak tempuh. Jika laju aliran massa propelan total dinyatakan sebagai (m) dan percepatan gravitasi standar (g₀) diberikan dengan nilai rata-rata di permukaan laut Bumi sebesar 9,8066 m/s² atau 32,174 kaki/s²), maka:

$$Isp = \frac{\int_0^t F dt}{g_0 \int_0^t m dt} \quad \text{Persamaan (1)}$$

Dimana :

- Isp : Impuls spesifik rata-rata waktu (s)
- F : Gaya dorong yang dihasilkan oleh sistem pendorong roket (N)
- T : Waktu (s)
- g₀ : Percepatan gravitasi standar (9,8066 m/s² atau 32,174 kaki/s²)
- m : laju aliran massa propelan (kg/s atau lb/s)

Persamaan (1) menunjukkan bahwa impuls spesifik (Isp) diperoleh dengan membagi total impuls yang diberikan oleh mesin roket terhadap total propelan yang dikonsumsi. Sehingga, semakin tinggi nilai Isp, maka semakin efisien sistem pendorong tersebut [12]. **Gambar 2** menunjukkan nilai perbandingan impuls spesifik dengan beberapa oksidator alternatif.



Gambar 2. Perbandingan Impuls Spesifik Oksidator Alternatif
Sumber : [4], [6]

Gambar 2 menunjukkan bahwa Impuls spesifik (Isp) dari berbagai oksidator HNIW memiliki nilai tertinggi yaitu 272.81, sedangkan HNF berada diposisi kedua dengan nilai Isp 254.37 dan ketiga AN dengan nilai Isp 239. Sebagai perbandingan, AP hanya memiliki Isp sebesar 158.76, yang jauh lebih rendah dibandingkan oksidator alternatif lainnya. AND yang dianggap sebagai pengganti AP yang paling potensial, memiliki Isp 202 yang lebih tinggi dibandingkan AP tetapi masih lebih rendah dibandingkan AN, HNF dan HNIW. Pemilihan oksidator alternatif sebaiknya memiliki nilai Isp yang tinggi semakin baik [12]. Namun, dalam aplikasinya HNF dan HNIW memiliki tantangan dalam aspek stabilitas dan keamanan, yang perlu di perhatikan dalam penggunaan propelan komposit [13].

Dampak Lingkungan dari Oksidator Alternatif Propelan

Penggunaan oksidator alternatif bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh ammonium perklorat (AP), yang menghasilkan gas hidrogen klorida (HCl) sebagai produk samping utama. Gas ini dapat menyebabkan hujan asam, degradasi material, serta gangguan pada ekosistem perairan tanah [14]. Oksidator alternatif seperti amonium nitrat (AN), amonium dinitramida (ADN), hidrazinium nitroformate (HNF), dan hexaazaisowurtzitane (HNIW) menawarkan solusi dengan mengurangi emisi gas beracun dan meningkatkan efisiensi pembakaran. **Tabel 3** menunjukkan perbandingan antara produk pembakaran AP dan Oksidator Alternatif.

Tabel 3. Perbandingan Produk Samping AP dan Oksidator Alternatif

Senyawa	Reaksi Pembakaran	Produk Samping	Dampak Lingkungan	Penelitian (Tahun)
Ammonium Perklorat (AP)	$2\text{NH}_4\text{ClO}_4 \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HCl} + 2\text{O}_2$	$\text{NH}_3, \text{HCl}, \text{O}_2$	Pencemaran udara, hujan asam	Dewi dan Yulia, 2016
Ammonium Nitrat (AN)	$2\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$\text{N}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$	Ramah lingkungan, tidak ada residu beracun	Wang et al., 2019
Ammonium Dinitramida (AND)	$2\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$\text{N}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$	Ramah lingkungan, tidak ada residu beracun	Silva et al., 2013
Hydrazinium nitroformate (HNF)	$4\text{N}_2\text{H}_5\text{C}(\text{NO}_2)_3 \rightarrow 8\text{CO}_2 + 10\text{H}_2\text{O} + 9\text{N}_2$	$\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2$	CO_2 meningkatkan pemanasan global dan efek rumah kaca.	Silva et al., 2013
Hexaazaisowurtzitane (HNIW)	$\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_{12}\text{O}_{12} \rightarrow 6\text{CO}_2 + 3\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$	CO_2 meningkatkan pemanasan global dan efek rumah kaca.	Viswanath et al., 2016

Keterangan :

- H_2O : Tidak berbahaya dan berkontribusi pada kelembapan atmosfer
- N_2 : Zat inert dan tidak berbahaya, merupakan komponen atmosfer
- HCl : Bersifat korosif, dapat menyebabkan hujan asam dan merusak lingkungan
- O_2 : Mendukung kehidupan, peningkatan konsentrasi lokal dan mempengaruhi proses oksidasi alami
- NO_2 : Gas beracun, menimbulkan pembentukan ozon troposferik dan hujan asam
- CO_2 : Efek rumah kaca, menyebabkan pemanasan global
- NH_3 : Bersifat toksik, dapat menyebabkan hujan asam dan mencemari lingkungan

Berdasarkan data pada **Tabel 3**, karakteristik fisiokimia dari berbagai oksidator menunjukkan perbandingan produk samping ap dan oksidator alternatif terhadap lingkungan. Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa AN dan AND memiliki produk samping hasil pembakaran yang lebih ramah lingkungan dibandingkan AP, sementara HNF dan HNIW masih menghasilkan karbon dioksida (CO_2) yang dapat menyebabkan pemanasan global, sehingga menimbulkan efek rumah kaca.

4. Kesimpulan

Berdasarkan studi literatur ini, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan oksidator ramah lingkungan sebagai alternatif Amonium Perklorat (AP) dalam propelan komposit memiliki potensi besar dalam mendukung kemandirian industri pertahanan nasional. Oksidator Amonium Dinitramida (ADN) dinilai sebagai pengganti terbaik AP karena memiliki keseimbangan oksigen yang baik, impuls spesifik tinggi, serta dampak lingkungan yang lebih rendah. ADN menghasilkan produk pembakaran yang lebih bersih tanpa menghasilkan hidrogen klorida (HCl), sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan AP.

Di sisi lain, Hydrazinium Nitroformate (HNF) dan Hexaazaisowurtzitane (HNIW) memiliki performa energi yang tinggi dengan nilai Isp yang lebih besar dibandingkan AP. Namun, kedua oksidator ini memiliki tantangan dalam hal stabilitas dan sifat fisiknya, seperti sensitivitas terhadap perubahan suhu

dan tekanan, yang dapat mempengaruhi penyimpanan dan penggunaannya dalam propelan komposit. Selain itu, HNIW menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang dapat meningkatkan efek rumah kaca, sehingga dampaknya terhadap lingkungan masih menjadi perhatian utama.

Sementara itu, Amonium Nitrat (AN) merupakan alternatif yang paling ekonomis karena ketersediaan bahan baku yang melimpah dan biaya produksi yang lebih rendah. Namun, AN memiliki kelemahan utama, yaitu stabilitas termal yang rendah dan kecepatan pembakaran yang lebih rendah dibandingkan AP. Oleh karena itu, dalam aplikasi propelan komposit, AN sering kali memerlukan campuran bahan tambahan untuk meningkatkan performa pembakarannya. Implementasi oksidator alternatif dapat mendukung kemandirian industri pertahanan nasional, dengan memperhitungkan aspek produksi, keamanan, dan dampak lingkungan. Dengan hasil ini, diharapkan penelitian lebih lanjut dapat mengembangkan teknologi produksi dan keamanan oksidator ramah lingkungan untuk aplikasi propelan komposit yang lebih efisien dan berkelanjutan.

5. Referensi

- [1] F. M. Dirloman, T. V. Tiganescu and . T. R. , "Eco-Oxidizers for Composite Propellants: Ammonium Nitrate and Ammonium Dinitramide," *Teknologi Militer*, vol. 3, no. 2, pp. 31 - 36, 2020.
- [2] G. Harsono, N. A. S. A. Sasongko, S. Aritonang, M. and . R. A. G. Gultom, Fokus Kapita Selekt Teknologi dan Pertahanan, Bogor: Universitas Pertahanan, 2018.
- [3] M. Bohn , "Stabilization of the New Oxidizer Ammonium Dinitramide (ADN) in Solid Phase," Institute of Chemische Technologies, German, 2002.
- [4] L. H. Abdillah, H. B. Wibowo and K. Hartaya , "Penggunaan Binder HTPB Berenergi Tinggi untuk Meningkatkan Energetik Propelan Komposit," *Teknologi Dirgantara*, vol. 16, no. 1, p. 35 – 44, 2018.
- [5] W. U. Dewi and Y. . A. Ismah , "Dekomposisi Termal Propelan Komposit Berbasis Amonium Perklorat/Hydroxy Terminated Polybutadiene (AP/HTPB)," *Teknologi Dirgantara*, vol. 14, no. 1, p. 17–24, Teknologi Dirgantara.
- [6] E. A. Saputro and Y. D. Lestari, "Proses Produksi Amonium Nitrat dan Kegunaannya : Review," *Inovasi Teknik Kimia*, vol. 7, no. 2, pp. 47 - 52, 2022.
- [7] O. Kositsyna , K. Varlan , M. Dron and O. Kulyk, "Determining Energetic Characteristics and Selecting Environmentally Friendly Components for Solid Rocket Propellants at the Early Stages of Design," *Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 6, pp. 6 - 14, 2021.
- [8] J. Louwers, "Hydrazinium nitroformate: A High-Performance Next-Generation Oxidizer," *Pyrotechnics*, no. 6, pp. 36 - 42, 1997.
- [9] A. Nuryanto, "Pembuatan Propelan Komposit Amonium Perklorat Polisulfida," *Majalah LAPAN*, vol. 5, no. 17, pp. 33-37, 1980.
- [10] R. Y. E. Prawatya and M. Taufiqurrahman, "Analisis Spesifik Impuls Pada Propelan Padat Komposit Dengan Campuran Arang Aktif Tunggak Kayu Akasia Sebagai Bahan Bakar," *Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 68 - 74, 2021.
- [11] G. d. Silva, S. C. Rufino and K. Iha, "Green Propellants: Oxidizers," *Aerosp Technol Manag*, vol. 5, no. 2, pp. 139 - 144, 2013.
- [12] G. P. Sutton and O. Biblarz, Rocket Propulsion Elements 9th, Canada: John Wiley & Sons Inc, 2016.
- [13] . J. V. Viswanath, K. J. Venugopal, N. V. S. Rao and . A. Venkataraman, "An Overview on Importance, Synthetic Strategies and Studies of 2,4,6,8,10,12-hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzitane (HNIW)," *Defence Technnology*, vol. 12, pp. 401 - 418, 2016.
- [14] Y. Wang, X. Song and F. Li, "Thermal Behavior and Decomposition Mechanism of Ammonium Perchlorate and Ammonium Nitrate in the Presence of Nanometer Triaminoguanidine Nitrate," *ACS Omega*, vol. 1, no. 4, pp. 2014 - 225, 2019.
- [15] H. B. Wibowo, "Kajian Program Peningkatan Kinerja Propelan Komposit Berbasis AP/HTPB/Al," *Teknologi Dirgantara*, vol. 16, no. 2, pp. 123 - 138, 2018.
- [16] ChemSpider, "ChemSpider," Royal Society of Chemistry, [Online]. Available: <https://www.chemspider.com>. [Accessed 15 February 2025].