

# **PENGGUNAAN BINDER HTPB BERENERGI TINGGI UNTUK MENINGKATKAN ENERGETIK PROPELAN KOMPOSIT (APPLICATION OF HIGH ENERGY HTPB BINDER TO ENHANCE THE ENERGETIC OF COMPOSITE PROPELLANT)**

**Luthfia Hajar Abdillah<sup>1</sup>, Heri Budi Wibowo, Kendra Hartaya**  
Pusat Teknologi Roket  
Lembaga Penerbangan Dan Antariksa Nasional (LAPAN)  
Jl. Raya Lapan No.2 Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350, Jawa Barat  
<sup>1</sup>e-mail : luthfia.hajar@lapan.go.id

Diterima: 22 Mei 2018; Direvisi: 26 Juni 2018; Disetujui: 11 Juli 2018

## **ABSTRACT**

Raising more energetic performance of propellant, the need of more energetic materials was reported in recent studies, such as the need of energetic binders. The strict control of these materials distribution was one of difficulties for getting it. So, it take in concern to have those materials independently. The most common non-energetic binder was HTPB, to make it more energetic could be established by introduce energetic groups like nitro group but remain in stable condition. This paper was presenting the study of potential conversion of HTPB binder to energetic nitro-HTPB, which pervades materials, equipments, and methods that can be applied in Indonesia. The process was nitration of HTPB into nitro-HTPB. Based on its energetic study, nitro-HTPB has the potential to improve energetic performance of composite solid propellant. The most effective method to synthesize nitro-HTPB was nitration by sodium nitrite at low temperature (0°C).

Keywords : *HTPB, nitro-HTPB, energetic binder, propellant*

## **ABSTRAK**

Untuk mendapatkan performa propelan yang lebih energetik, penelitian terbaru menunjukkan bahwa diperlukan penggunaan material-material yang bersifat lebih energetik, misalnya penggunaan *binder* energetik. Pengawasan yang ketat atas peredaran material energetik seperti ini cukup menyulitkan untuk mendapatkan material-material tersebut. Oleh karena itu kemandirian untuk memiliki material tersebut sudah seharusnya menjadi perhatian. *Binder* propelan komposit yang paling banyak digunakan saat ini adalah HTPB yang bersifat non-energetik. Untuk membuatnya lebih berenergi tinggi dapat dilakukan dengan menambahkan gugus yang bersifat energetik seperti gugus nitro, namun tetap aman digunakan (bersifat stabil). Tulisan ini mengkaji potensi konversi *binder* HTPB menjadi nitro-HTPB yang bersifat energetik, meliputi material, peralatan, dan metode yang dapat diaplikasikan di Indonesia. Prosesnya adalah nitrasi HTPB menjadi nitro-HTPB. Berdasarkan kajian energetiknya, nitro-HTPB memiliki potensi untuk meningkatkan sifat energetik propelan padat komposit. Metode proses pembuatan nitro-HTPB yang paling efektif dan optimal adalah proses nitrasi dengan menggunakan bahan sodium nitrit pada suhu rendah (0°C).

Kata kunci : *HTPB, nitro-HTPB, binder energetik, propelan*

## 1 PENDAHULUAN

Propelan komposit saat ini menggunakan bahan utama sistem AP/HTPB/Al, yaitu menggunakan bahan oksidator ammonium perklorat, *binder* HTPB, dan *fuel binder* aluminium. Komposisi ini dikenal memiliki sifat energetik yang kuat dan sifat mekanik yang baik. Perkembangan selanjutnya di bidang propelan komposit adalah meningkatkan sifat energetiknya tanpa mengurangi sifat mekanik yang baik. Peningkatan karakteristik energetik dilakukan dengan menggunakan material-material berenergi tinggi.

Arah riset propelan roket padat di dunia saat ini diarahkan untuk mendapatkan propelan yang memiliki energi yang besar, *reusable*, memiliki potlife panjang dan ramah lingkungan (*green chemistry*) (Timnat, 1987; Kshirsagar dkk., 2017; Restasari dkk., 2015). Untuk meningkatkan energi pembakaran maka telah dikembangkan beberapa material energetik baru meliputi oksidator, *binder*, dan aditif lainnya. Oksidator berenergi tinggi telah dikembangkan berbasis senyawa organik yang tidak sensitif seperti ammonium perchlorate (AP), ammoniumdinitramide (AND), hydrazinium nitroformate (HNF), hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX), octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX), dan hexanitrohexaazaisowurtizitane (CL-20) (Wibowo, 2015a; Wibowo, 2015b).

Propelan komposit memiliki energi sangat besar sehingga banyak digunakan untuk roket peluncur jarak jauh maupun *sustainer* roket pertahanan. Komponen utama propelan komposit adalah oksidator, *binder*, *solid fuel*, *modifier*, *plasticizer*, dan senyawa aditif lainnya. Bahan oksidator adalah senyawa mengandung oksigen tinggi yang terdekomposisi menghasilkan energi sangat besar, *binder* adalah resin polimer pembentuk matriks komposit sekaligus

bahan bakar propelan, *solid fuel* sebagai bahan untuk meningkatkan suhu pembakaran, *modifier* adalah senyawa yang digunakan untuk mengatur laju pembakaran, *plasticizer* adalah senyawa untuk mengatur viskoelastisitas, dan senyawa aditif untuk memperbaiki sifat fisik propelan (Sariak, 2017; Salgado dkk., 2018; Rahman dkk., 2018).

Bahan utama oksidator yang paling banyak digunakan adalah Amonium perklorat (AP). Bahan utama *binder* adalah senyawa polibutadien seperti hydroxyl terminated polybutadiene (HTPB) dan carboxy terminated polybutadiene (CTPB). Bahan utama *solid fuel* adalah logam seperti aluminium (Al) dan magnesium (Mg) (Timnat, 1987; Sariak, 2017, Rahman dkk, 2018; Wibowo, 2016). Resin polimer HTPB-TDI merupakan *binder* propelan yang dominan digunakan karena memiliki sifat mekanik yang baik.

HTPB merupakan senyawa non energetik yang memiliki energi rendah. Upaya menaikkan energi pembakaran telah dilakukan dengan substitusi material *binder* berenergi tinggi dari polimer jenis azido seperti glycidyl azide polymer (GAP) and poly bis azidomethyl oxetane (P-BAMO), poly azidomethyl methyl oxetane (PAMMO) as well as nitrate polymers namely, polyglycidyl nitrate (PGN) and nitratomethyl methyl oxetane (NIMMO) (Kumari dkk, 2015; 2017). *Plasticizer* yang digunakan adalah dari golongan pthalat seperti dioctyl adipate (DOA) and isodecyl pelargonate (IDP). Beberapa senyawa *plasticizer* berenergi tinggi telah dikembangkan seperti triethylene glycol dinitrate (TEGDN), 1,2,4 butane triol trinitrate (BTTN), etriol trinitrate (TMETN), nitroethyl nitramine (NENA), bis 2,2 dinitro propyl formal (BDPF), bis 2,2 dinitro propyl acetal (BDPA), diethylene glychol bis (azido acetate) (DEGBAA), trimethylol nitromethane triazido acetate

(TMNMTAA), pentaerythritol tetrakis azido acetate (PETAA), 1,2 diazido 3 fluoro dinitro ethoxy propane (DAFP), 1,3 diazido isopropyl fluoro dinitroethyl formal (AFFO), dan *Triphenyl Bismuth* (TPB) (Timnat, 1987; Ramezani dan Rothe, 2017; Wibowo, 2015c; 2015d).

Pengembangan propelan berenergi tinggi masih menjadi tantangan. Untuk mencapai efisiensi energi maksimum propelan padat perlu mengoptimalkan komponen campuran, maka harus dipertimbangkan fungsi dari *binder* yang harus memberikan parameter *rheology* yang tepat sehingga memungkinkan untuk menggunakan teknologi *casting* dan harus memberikan parameter mekanik dari propelan. Pada saat yang sama, *binder* harus menghasilkan produk pembakaran dengan berat molekul rendah dan memiliki entalpi pembentukan yang tinggi. *Binder* energetik merupakan polimer yang ter-crosslink bersama bahan eksplosif dengan plasticiser menjadi jaringan tiga dimensi yang kuat dan fleksibel (Badgjar, dkk., 2017).

*Binder* HTPB selain memiliki kuat mekanik yang baik juga aman dalam proses pembuatannya. Beberapa *binder* energetik memiliki stabilitas rendah sehingga perlu penanganan khusus dalam proses pembuatan propelan. Salah satu *binder* energetik tinggi yang relatif stabil adalah nitro-HTPB. Senyawa ini memiliki stabilitas yang tinggi dan karakteristik yang mirip dengan HTPB, sehingga proses pembuatan propelan tidak merubah kondisi operasionalnya. Selain itu, nitro-HTPB dapat dibuat dari HTPB. Sayangnya HTPB sampai saat ini tidak dapat diimpor, sehingga harus dibuat sendiri. Dalam tulisan ini maka dikaji proses pembuatan nitro-HTPB, material, dan kondisi proses yang paling sesuai untuk dapat diaplikasikan yang efisien, murah, aman, peralatan yang

sesuai, dan bahannya dapat diperoleh di Indonesia.

## 2 PERKEMBANGAN *BINDER* ENERGETIK UNTUK PROPELAN KOMPOSIT

Senyawa energetik merupakan basis semua eksplosif dan komposisi propelan, mayoritas senyawa tersebut mengandung gugus nitro. Bisa C-Nitro (misal, trinitrotoluene), O-Nitro (Nitrat ester, misal nitroglicerol) atau N-Nitro (nitramin, misal RDX). Oleh karena itu nitrasi merupakan bagian penting di dalam sintesis senyawa energetik (Colclough dan Paul, 1996).

Terdapat dua pendekatan yang mungkin untuk sintesis polimer energetik yaitu polimerisasi monomer energetik dan memberikan gugus energetik pada polimer *inert* (Agrawal, 2010). Pendekatan polimerisasi monomer energetik telah diaplikasikan pada sintesis polyoxetane energetik dan polyoxiranes energetik. Pendekatan kedua yaitu diaplikasikan pada sintesis *Nitrated-HTPB* (NHTPB) (Colclough dan Paul, 1996).

HTPB (*Hydroxy terminated polybutadiene*) merupakan prepolimer yang paling banyak digunakan untuk sistem *binder* pada propelan padat komposit. Biasanya digunakan sebanyak 10-15% massa dari komposisi propelan. HTPB adalah termasuk non-energetik *binder*, saat ini diperlukan untuk mengganti berat *inert* tersebut dengan polimer yang lebih energetik. Pada beberapa tahun sebelumnya telah banyak dilaporkan penggunaan energetik *binder*, walaupun menghasilkan energi yang bagus tetapi tidak seperti komposisi propelan berbasis HTPB, biasanya terjadi cacat pada property mekaniknya, kesulitan pada *solid loading* yang lebih tinggi dan

kecocokan dengan bahan lainnya (Shekhar Pant, dkk., 2013).

Kecocokan *binder* energetik biasanya dikaitkan dengan kecocokan penggunaan *plasticizer* energetik. Salah satu *binder* energetik nitro-HTPB menunjukkan kemampuan / kemudahannya untuk bercampur dengan *plasticizer* energetik seperti *butyl nitroxy ethyl nitramine* (Bu-NENA) (Abusaidi, dkk., 2017). *Poly(3-nitratomethyl-3-methyloxetane)* (polyNIMMO) juga menunjukkan kecocokan dengan *plasticizer* energetik seperti *bis(2,2-dinitro propyl)acetal* (BDNPA), *dinitro-diaza-alkanes* (DNDA-57), BuNENA, *1,2,4-butanetriol trinitrate* (BTTN), dan *diethyleneglycoldinitrate* (DEGDN) (Shee, dkk., 2016).

Dari penelitian terbaru menunjukkan bahwa elastomer poliuretan berbasis Nitro-HTPB menghasilkan properti mekanik yang bagus sehingga senyawa ini merupakan senyawa yang menjanjikan untuk pembuatan propelan yang lebih energetik (Abusaidi, dkk., 2017). Beberapa metode sintesis yang digunakan untuk memasukkan gugus energetik pada polimer melalui proses nitrasi pernah dilakukan, diantaranya ada yang menggunakan sodium nitrit (Shekhar Pant, dkk., 2013), ada yang menggunakan *dinitropentoxide* (Colclough dan Paul, 1996), ada pula yang menggunakan metode nitromercurasi yaitu dengan penggunaan senyawa merkuri (Chien, dkk., 1980).

Beberapa dekade terakhir telah dikembangkan propelan dengan penggunaan material-material yang bersifat energetik. Salah satunya adalah penggantian material sistem *binder* yang biasanya dengan sistem *binder* yang lebih energetik, seperti : PGN (*polyglycidyl nitrate*), *Poly(NIMMO-nitratomethyl methyl oxetane)*, dan NHTPB yang mana ketiga senyawa

tersebut telah berhasil disintesis oleh Colclough, dkk (Colclough dkk., 1993). *Binder* energetik lain yang pernah dikembangkan dan digunakan dalam pembuatan propelan padat, antara lain : *Poly(BAMO-bis azidomethyl oxetane)*, GAP (*glycidyl azide polymer*), GNAP (*glycidyl nitramine polymer*). Senyawa tersebut terbukti memiliki energi ledakan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan GAP dan PGN (Betzler, dkk., 2016).

### 3 METODE PROSES

Metode nitrasi pada HTPB dapat dilakukan melalui beberapa cara sebagai berikut. Shekhar, et al telah melakukan sintesis Nitro-HTPB dengan melarutkan HTPB ke dalam etil asetat. Selanjutnya menambahkan larutan sodium nitrit dalam etilen glikol dan air ke dalam larutan HTPB tersebut disertai dengan pengadukan, yang selanjutnya didinginkan pada 0°C menggunakan garam es. Iodin ditambahkan dan pengadukan dilanjutkan selama 96 jam pada suhu ruangan. Ini terbentuk lapisan organik yang akan dipisahkan dan dicuci dengan 10% larutan sodium thiosulfate hingga warna berkurang, dan diikuti oleh pencucian dengan larutan sodium bikarbonat jenuh dan air garam, dikeringkan dengan sodium sulfat anhidrat dan terakhir diuapkan untuk mendapatkan produk. Pencucian dengan methanol diberikan untuk menghilangkan *impurities* terlarut sehingga diperoleh *liquid* kental yang berwarna coklat kemerahan (Shekhar Pant, dkk., 2013).

Sebelumnya Colclough dan Paul telah melakukan sintesis NHTPB (*Nitrated-HTPB*) dengan cara melarutkan HTPB dalam diklorometan dan diaduk di bawah kondisi gas nitrogen selama 16 jam dengan kalsium hidrida. Larutan tersebut selanjutnya disaring hingga kering dan didinginkan hingga -30°C di

dalam aseton/*dry ice bath* (pendingin). Dinitropentoksida dalam diklorometan ditambahkan ke dalam larutan tersebut, pendingin diambil setelah eksoterm awal selesai. Ketika suhu mencapai 5°C campuran reaksi dituangkan ke dalam sodium bikarbonat berlebih dan air yang selanjutnya diaduk hingga tidak tersisa asam. Larutan disaring, dikeringkan dengan magnesium sulfat dan pelarut diuapkan sehingga tertinggal produk berupa *liquid* berwarna coklat (Colclough dan Paul, 1996).

Proses nitrasi polimer juga telah dilakukan Chien dan kawan-kawan menggunakan prosedur nitromercurasi polybutadien. Mula-mula polybutadien dilarutkan dalam diklorometan, kemudian ditambahkan merkuri klorida, sodium nitrit, dan tetrabutylammonium bisulfat.

Sejumlah air juga ditambahkan pada tahap ini. Proses reaksi dilakukan di dalam *vessel* tertutup disertai pengadukan pada suhu ruangan. Pada akhir reaksi fase *liquid* dipisahkan dari fase *solid*. Residu *solid* ini dicuci menggunakan diklorometan. Fase kombinasi diklorometan ini dicuci dengan air.

Larutan ini dikeringkan dan diuapkan hingga menghasilkan polimer nitromercurasi terlarut. Pencucian residu tak terlarut (menggunakan etanol dan air) dan mengeringkannya dalam vakum akan menghasilkan fraksi polimer tak larut sebagai *solid* berwarna putih (Chien, dkk., 1980).

#### 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Polimer energetik umumnya mengandung bagian energetik seperti fluoro (-F), nitro (-NO<sub>2</sub>), nitrat (-NO<sub>3</sub>), atau azida (-N<sub>3</sub>) di dalam *binder* (Agrawal, 2010). Molekul nitrogen memiliki energi internal lebih rendah daripada oksida nitrogen (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dll.). Oleh

karena itu, adanya nitrogen dalam reaktan pada akhirnya menghasilkan gas N<sub>2</sub>. Gugus -NO<sub>2</sub> dan -ONO<sub>2</sub> merupakan sumber oksigen utama pada molekul energetik, yang berkontribusi secara signifikan pada proses detonasi atau pembakaran (Badgular, dkk., 2008). Dalam rangka menghasilkan sistem *binder* yang lebih energetik dapat dilakukan dengan menambahkan gugus nitro pada senyawa polimer yang digunakan.

Penggunaan *binder* aktif tipe (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>N<sub>z</sub>O<sub>e</sub>)<sub>n</sub> dengan entalpi pembentukan  $\Delta H_f = 42 \text{ kcal/kg}$  (175 J/g) pada propelan padat yang mengandung oksidator dengan  $\Delta H_f > 800 \text{ kcal/kg}$  (3333 J/g) sama sekali tidak memerlukan *fuel* logam (aluminum) dalam propelan (Komarov dan Shandakov, 1999).

HTPB merupakan prepolimer yang paling banyak digunakan untuk sistem *binder* pada propelan padat komposit karena menunjukkan kemampuan *solid loading*nya yang lebih tinggi daripada sistem *binder* lainnya, yaitu bisa mencapai 86-90% tanpa mengorbankan kemudahan dalam pemrosesan (Gupta, dkk., 2014). Maka untuk mendapatkan sistem *binder* yang lebih energetik, bisa dengan menambahkan gugus nitro ke dalam senyawa HTPB melalui proses nitrasi sehingga terbentuk senyawa baru Nitro-HTPB yang energetik.

Proses nitrasi dapat didefinisikan secara sederhana sebagai pemberian satu atau lebih gugus nitro (NO<sub>2</sub>) ke dalam inti aromatik dengan penggantian satu atom hidrogen (Booth, 2012).

Proses nitrasi umumnya dilakukan melalui pendekatan sistem *batch* ataupun *semi-batch* yang mana reaksinya berjalan lambat, tetapi untuk proses dengan skala yang lebih besar telah dipertimbangkan proses dengan pendekatan sistem kontinyu (Kulkarni, 2014).

Tabel 4-1: KELEBIHAN DAN KEKURANGAN DARI KETIGA PROSES NITRASI

	<b>Shekhar Pant, dkk. (2013)</b>	<b>Colclough dan Paul (1996)</b>	<b>Chien, dkk. (1980)</b>
Kemudahan material	√	-	-
Keamanan material	√	-	-
Kemudahan proses	-	-	√
Keamanan proses	√	-	-

Diantara ketiga proses yang telah disebutkan sebelumnya dapat dilihat dari segi keamanan dan kemudahan proses maupun keamanan dan kemudahan perolehan material yang masing-masing proses memiliki kecenderungan sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4-1.

Metode yang dilakukan Shekhar dan kawan-kawan relatif lebih aman dibandingkan dengan metode lainnya karena tidak melibatkan penggunaan material yang berbahaya, walaupun proses yang dilakukan tidaklah cukup mudah karena proses sintesis memakan waktu yang cukup lama sehingga proses pengontrolan menjadi sesuatu yang perlu mendapat perhatian lebih.

Dua metode lainnya relatif lebih berbahaya dan sulit dilakukan mengingat adanya penggunaan gas nitrogen, selain itu juga penggunaan material yang bersifat toxic dan karsinogenik seperti diklorometan, dinitrogen pentoksida, dan merkuri.

**4.1 Identifikasi Nitro-HTPB**

Identifikasi produk hasil reaksi dilakukan melalui serangkaian analisa diantaranya, analisa FTIR Spectroscopy (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dan analisa DSC (*Differential Scanning Calorimetry*). Berdasarkan hasil analisa

FTIR produk nitration diperoleh hasil pada Tabel 4-2.

Dari hasil analisa FTIR ketiga metode tersebut semua menunjukkan adanya gugus nitro pada nilai panjang gelombang IR di sekitar 1500cm<sup>-1</sup>. Panjang gelombang inilah yang kemudian menjadi patokan bahwa sudah polimer yang dinitrasi sudah mengandung gugus nitro di dalamnya. Analisa selanjutnya adalah menggunakan DSC pada *heating rate* 10°C per menit. Dari hasil analisa DSC, Colclough dan Paul melaporkan bahwa *glass transition temperature* (Tg) dari NHTPB adalah -58°C, sedangkan Tg dari 20% HTPB ternitration adalah -22°C. Eksoterm dimulai dari suhu 156°C dan mencapai maksimum pada 209°C (Colclough dan Paul, 1996).

Shekhar, et al memiliki hasil yang sedikit berbeda pada nilai Tg yaitu -61°C, suhu eksoterm dimulai sekitar 160°C dan maksimum terjadi pada 232°C dengan pelepasan energi sebesar 1032 J/g (Shekhar Pant, dkk., 2013).

Suhu dekomposisi dari 10%NHTPB dilaporkan menurun seiring dengan kenaikan tekanan, sementara itu terjadi kenaikan suhu dekomposisi seiring dengan kenaikan *rate* pemanasan. Dekomposisi termal terjadi pada 150-250 °C mengikuti hukum orde pertama (Wang, dkk., 2009).

Tabel 4-2: NILAI PANJANG GELOMBANG GUGUSAN DARI PRODUK PROSES NITRASI

Jenis analisa	Shekhar Pant, dkk. (2013)	Colclough dan Paul (1996)	Chien, dkk. (1980)
Gugus nitro (C-NO <sub>2</sub> )	1520, 1336cm <sup>-1</sup> (nitroolefin)	1551cm <sup>-1</sup>	1550 cm <sup>-1</sup>
Gugus nitrat ester (C-ONO <sub>2</sub> )	-	1277, 1633cm <sup>-1</sup>	-
Gugus karbonil	-	-	1715 cm <sup>-1</sup>
Gugus nitrit ester	-	-	1640cm <sup>-1</sup>
Gugus hidroksil	3445cm <sup>-1</sup>	3450cm <sup>-1</sup>	-
Gugus alkena	1640cm <sup>-1</sup>	-	-

#### 4.2 Performa Propelan berbasis N-HTPB

Propelan padat komposit dengan penggunaan HTPB energetik tentunya akan menghasilkan performa balistiknya. *Binder* NHTPB tanpa *plasticizer* energetik menunjukkan sebagai polimer energetik yang bagus, dengan 87% *solid loading*, kemampuan proses yang wajar, dan densitas yang tinggi, tetapi memiliki properti mekanik yang relatif lemah pada suhu rendah ketika dibandingkan dengan HTPB murni (Abdullah, dkk., 2014).

Salah satu keuntungan dari penggunaan Nitro-HTPB adalah kemampuan/kemudahannya untuk bercampur dengan *plasticizer* yang energetik seperti butyl nitroxy ethyl nitramine (Bu-NENA) (Abusaidi, dkk., 2017). Sistem Nitro-HTPB dengan *plasticizer* Nitro Polybutadiene (NPB) juga merupakan sistem *binder* energetik yang menjanjikan sebagai polimer pengikat yang eksplosif (Ashrafi, dkk., 2016).

Dengan penggunaan *plasticizer* energetik akan meningkatkan energi total dari propelan. Propelan ini juga memiliki *burning rate* dan nilai  $n$  yang lebih tinggi, *burning rate* dapat

meningkat sebesar 40% dengan penambahan *plasticizer* energetik. Berdasarkan pengukuran sifat mekaniknya, propelan dengan Nitro-HTPB memiliki properti mekanik yang bagus pada range suhu yang luas, juga densitas yang lebih tinggi sekitar 1,9 g/cm<sup>3</sup> (Abusaidi, dkk., 2017) dibandingkan dengan propelan dengan HTPB biasa sekitar 1,7-1,8 g/cm<sup>3</sup> (Ramesh, dkk., 2012).

Studi menunjukkan bahwa penggunaan NHTPB sebagai aditif dalam propelan bisa dimungkinkan hingga mencapai 10-20% relatif terhadap HTPB. Penambahan NHTPB dalam jumlah kecil saja (< 2%wt) dapat meningkatkan nilai kalor propelan (dapat meningkatkan kandungan energinya) sebesar 3-5% (Florczak, dkk., 2015).

#### 5 KESIMPULAN

Dari uraian yang telah dijelaskan dapat diambil kesimpulan bahwa Nitro-HTPB memiliki potensi untuk meningkatkan sifat energetik propelan padat komposit. Metode proses pembuatan nitro-HTPB yang paling efektif dan optimal adalah proses nitrasi dengan menggunakan bahan sodium nitrit pada suhu rendah (0°C).

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pustekroket LAPAN yang memberikan kesempatan dan fasilitas untuk tersusunnya makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Gholamian, F., and Zarei, A. R., (2014). Investigation of Composite *Solid Propellants* Based on Nitrated Hydroxyl-Terminated Polybutadiene *Binder*. *Journal of Propulsion and Power*, 30(3), 862–864.  
<https://doi.org/10.2514/1.B35117>
- Abusaidi, H., Ghaieni, H. R., and Ghorbani, M., (2017). Influences of NCO/OH and triol/diol ratios on the mechanical properties of nitro-HTPB based polyurethane elastomers. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 36(5), 55–63.  
<https://doi.org/10.1002/prep.201600120>
- Abusaidi, H., Ghorbani, M., and Ghaieni, H. R., (2017). Development of Composite *Solid Propellant* Based on Nitro Functionalized Hydroxyl-Terminated Polybutadiene. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 42(6), 671–675.  
<https://doi.org/10.1002/prep.201600057>
- Agrawal, J. P., (2010). *High Energi Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co.
- Ashrafi, M., Fakhraian, H., and Dehnavi, M. A., (2016). Synthesis , Characterization and Properties of Nitropolybutadiene as Energetik *Plasticizer* for NHTPB *Binder*. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1–8.  
<https://doi.org/10.1002/prep.201600057>
- Badgujar, D. ., Talawar, M. ., Zarko, V., and Mahulikar, P., (2017). New Directions in the Area of Modern Energetik Polymers : An Overview. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 53(4), 371–387.  
<https://doi.org/10.1134/S0010508217040013>
- Badgujar, D. M., Talawar, M. B., Asthana, S. N., and Mahulikar, P. P., (2008). Advances in science and technology of modern energetik materials: An overview. *Journal of Hazardous Materials*, 151(2–3), 289–305.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.039>
- Betzler, F. M., Hartdegen, V. A., Klapötke, T. M., and Sproll, S. M., (2016). A new energetik *binder*: Glycidyl nitramine polymer. *Central European Journal of Energetik Materials*, 13(2), 289–300.  
<https://doi.org/10.22211/cejem/64984>
- Booth, G., (2012). *Nitro Compounds, Aromatic*. *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 24* (Vol. 24). Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim  
 DOI:  
<https://doi.org/10.1002/14356007.a17>
- Chien, J. C. W., Kohara, T., Lillya, C. P., Sarubbi, T., Su, B.-H., and Miller, R. S., (1980). Phase transfer-catalyzed nitromercuration of diene polymers. *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 18(8), 2723–2729.  
<https://doi.org/10.1002/pol.1980.170180828>
- Colclough, M. E., Desai, H., Millar, R. W., Paul, N. C., Stewart, M. J., and Golding, P., (1993). Energetik Polymers as *Binders* in Composite Propellants and Explosives. *Polymers for Advanced Technologies*, 5(September), 554–560.
- Colclough, M. E., and Paul, N. C., (1996). Nitrated Hydroxy-Terminated Polybutadiene : Synthesis and Properties. In A. L (Ed.), *ACS Symposium Series* (pp. 97–103). Washington, DC: American Chemical Society.  
<https://doi.org/10.1021/bk-1996-0623.ch010>
- Florczak, B., Bogusz, R., Skupiński, W., Chmielarek, M., and Dzik, A., (2015). Study of the effect of nitrated hydroxyl-



- terminated Polybutadiene (NHTPB) on the properties of heterogeneous rocket propellants. *Central European Journal of Energetik Materials*, 12(4), 841–854.
- Gupta, B. ., Kumar, V., and Shivhare, N., (2014). Rheological Studies on Virgin, Plasticized and Solid Filled HTPB Binder System. *Global Journal of Advanced Engineering Technologies and Sciences*, 1(2), 41–48. Retrieved from <http://www.gjaets.com>
- Komarov, V. F., and Shandakov, V. A. (1999). *Solid Fuels*, their properties, and applications. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 35(2), 2–6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02674426>
- Kshirsagar, D. R., Jain, S, Bhandarkar S., Vemuri, M. and Mehilal, (2017). Studies on the Effect of Nano-MnO<sub>2</sub> in HTPB-based Composite Propellant Formulations, *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, **14(3)**, 589-604.
- Kulkarni, A. A., 2014. Continuous flow nitration in miniaturized devices. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 10, 405–424. <https://doi.org/10.3762/bjoc.10.38>
- Kumari A, Maurya M, Jain S and Bhattacharya B (2017) Nano-Ammonium Perchlorate: Preparation, Characterization, and Evaluation in Composite Propellant Formulation *Journal of Energetik Materials* **31(3)** 115-119.
- Kumari, A., Kurva, R., Jain, S. and Bhattacharya, B., (2015). Evaluation of nanoaluminium in Composite Propellant Formulation Using Bicurative System, *Journal of Propulsion and Power*, **31(1)**, 393-399.
- Rahman, A., Chin, J. and Cheah, K.H. (2018), Prilling and Coating of AND Solid Green Propellant in Toluene Mixture Using Ultrasound Sonication, *Aerospace*, **5(1)**, 29-35.
- Ramesh, K., Jawalkar, S. N., Sachdeva, S., Mehilal, and Bhattacharya, B., (2012). Development of a Composite Propellant Formulation with a High Performance Index Using a Pressure Casting Technique. *Central European Journal of Energetik Materials*, 9(1), 49–58.
- Ramezani, A. and Rothe, H., (2017). Simulation Based Early Prediction of Rocket, Artillery, and Mortar Trajectories and Real Time Optimization for Counter RAM Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, **12**, 1-8.
- Restasari, A., Hartaya, K., Ardianingsih, R. and Abdillah, L.H., (2015). Effects of toluene diisocyanate`s chemical structure on polyurethane`s viscosity and mechanical properties for propellant, *Proceedings ISAST III-2015 International Seminar of Aerospace Science and Technology - 2015*, 59-67.
- Shee, S. K., Shah, P. N., Athar, J., Dey, A., Soman, R. R., Sikder, A. K., and Banerjee, S., (2016). Understanding the Compatibility of the Energetik Binder PolyNIMMO with Energetik Plasticizers: Experimental and DFT Studies. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 42(2), 167–174. <https://doi.org/10.1002/prep.201600058>
- Salgado, M.C., Belderrain, M.S.N. and Devezas, T.C., (2018). Space Propulsion: a Survey Study about Current and Future Technologies, *J. aerosp. Technol. Manag.*, **10**, 1-10.
- Sariak, G., (2017). Between a Rocket and a Hard Place: Militar Space Technology and Stability in International Relations, *The internastional Journal of Space Polytics and Policy*, **15(1)**, 51-64.
- Shekhar Pant, C., Santosh, M. S. S. N. M., Banerjee, S., and Khanna, P. K., (2013). Single step synthesis of nitro-functionalized hydroxyl-terminated polybutadiene. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 35(6), 748–753.

- Timnat, Y.M., 1987. Advanced Chemical Rocket Propulsion. *Academic Press*, 132-135.
- Wang, Q., Wang, L., Zhang, X., and Mi, Z. (2009). Thermal stability and kinetic of decomposition of nitrated HTPB. *Journal of Hazardous Materials*, 172(2-3), 1659-1664.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.040>
- Wibowo, H.B. (2015). Pengembangan Propelan Mandiri untuk Roket Komposit. *Prosiding JASAKIAI 21 November 2013*. 157-162.
- Wibowo, H. B., 2015(b). Pemisahan Polimer HTPB Melalui Kolom Resin Berpori Untuk Merubah Distribusi Berat Molekul HTPB, *Jurnal Teknologi Dirgantara*, **13(1)**, 15-24.
- Wibowo, H. B., (2015). Peningkatan Sifat Mekanik Propelan Mandiri Berbasis Pengaruh Bilangan OH terhadap Kinerja Propelan: Teknologi Roket Sonda Indonesia 2015, *Penerbit Indonesia Book Project*, 273-290.
- Wibowo, H.B., (2015). Reduksi Struktur Vynil Untuk Peningkatan Kualitas HTPB Dengan Penggeseran Keseimbangan Penataulangan Isomer: Buku Bunga Rampai Teknologi Pesawat Terbang Sebagai Mitra Pengembang Teknologi Roket dan Satelit Nasional, *Penerbit Indonesia Book Project*, 291-306.
- Wibowo, H.B., (2016). Kontrol Kualitas Bahan Baku Propelan. *Penerbit Indonesia Book Project*. 134-139.