
KAJIAN PROGRAM PENINGKATAN KINERJA PROPELAN KOMPOSIT BERBASIS AP/HTPB/AL (PROGRAM REVIEW OF INCREASING THE PERFORMANCE OF COMPOSITE PROPELLANT BASE AP/HTPB/AI)

Heri Budi Wibowo

Pusat Teknologi Roket

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

Jl. Raya Lapan No.2 Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350, Jawa Barat

e-mail: heri.budi@lapan.go.id

Diterima: 17 Agustus 2018; Direvisi: 30 Oktober 2018; Disetujui: 31 Oktober 2018

ABSTRACT

A research and development strategy study on improving the performance of AP/HTPB/Al composite propellants is performed in order to achieve propellant technology equivalent to developed countries in the mastery of civil rocket technology, especially for Sonda rockets and Satellite rockets in LAPAN. The review is carried out by reviewing the current prolific outcomes, analyzing the causes, and formulating strategies to address them. The results of the study indicate that the organization is required, R & D stages and systematic human resource management, and the stage of technological achievement that needs to be done. The raw material support is the main problem in increasing the performance of composite propellant. The propellant performance can be increased by increase the solid loading density and addition the high energetic materials.

Keywords: *Composite propellant, propellant performance, sonda rocket*

ABSTRAK

Kajian strategi litbang dalam meningkatkan kinerja propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al dilakukan dalam rangka mencapai teknologi propelan yang setara dengan negara maju dalam penguasaan teknologi roket sipil, khususnya untuk roket Sonda dan roket Pengorbit Satelit di LAPAN. Kajian dilakukan dengan melakukan review terhadap capaian produk propelan yang dihasilkan saat ini, analisis faktor yang berpengaruh, dan penyusunan strategi untuk mengatasinya. Hasil kajian menunjukkan bahwa diperlukan organisasi, tahapan litbang dan pengelolaan SDM yang sistematis, serta tahapan pencapaian teknologi yang perlu dilakukan. Keterbatasan bahan baku propelan merupakan masalah utama dalam pengembangan propelan di Indonesia. Peningkatan kinerja propelan dapat dilakukan dengan meningkatkan *solid loading density* dan penambahan bahan energetik tinggi.

Kata kunci : *propelan komposit, kinerja propelan, roket sonda*

1 PENDAHULUAN

Penguasaan teknologi roket sipil untuk roket sonda dan pengorbit satelit merupakan program nasional yang ditetapkan pemerintah tertuang dalam rencana jangka panjang Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)(Wibowo, 2017). Salah satu teknologi kunci yang harus dikuasai adalah teknologi propelan, baik propelan padat maupun propelan cair. Roket sonda dengan ketinggian 50-100 km hampir semuanya menggunakan propelan padat. Roket pengorbit satelit biasanya menggunakan propelan padat untuk booster (Wibowo, 2015a).

Propelan padat untuk roket sonda dan roket pengorbit satelit hampir semuanya menggunakan propelan berbasis AP/HTPB/Al, yaitu propelan dengan bahan utama amonium perklorat (AP) sebagai oksidator, *hydroxyl terminated polybutadiene* (HTPB) sebagai binder, dan alumunium (Al) sebagai bahan bakar (*fuel*) (Badgular, et.al., 2008).

Propelan jenis ini dikembangkan sejak tahun 1940 dan sampai saat ini masih menjadi pilihan utama propelan roket padat karena energi pembakaran yang sangat besar dan sifat mekaniknya yang baik. Walaupun hasil pembakaran propelan menghasilkan gas klorin yang

tidak ramah lingkungan, namun kinerjanya belum ada yang mampu menggantikannya.

LAPAN mengembangkan propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al dalam rangka penguasaan teknologi roket sonda dan pengorbit satelit di Indonesia (Trache, et.al., 2017).

Propelan komposit dikenal memiliki energi yang sangat tinggi. Propelan komposit untuk roket pengorbit satelit di Amerika menggunakan propelan komposit dengan impuls spesifik 250-270 detik (Kshirsagar et.al.,2017). Pengembangan propelan di LAPAN dengan menggunakan propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al dimulai intensif sejak tahun 2000, dimulai dengan menggunakan AP unimodal (satu jenis ukuran) memiliki impuls spesifik 200 detik (Loekman, 1997). Upaya peningkatan kinerja propelan dilakukan dengan penggunaan AP bimodal (dua macam ukuran) dapat dihasilkan propelan dengan impuls spesifik 210 detik pada tahun 2010 (Wibowo, 2016a), . Upaya peningkatan Impuls spesifik dengan menggunakan AP trimodal dan perbaikan teknologi proses diperoleh propelan dengan impuls spesifik rata-rata 220 detik pada tahun 2016 (Restasari et.al., 2015).

Tabel 1-1: KARAKTERISTIK PROPELAN LAPAN

Karakteristik	Propelan standar	Propelan LAPAN
Impuls spesifik rerata (detik)	250-270	220
r (mm/det)	<0,7	<0,7
Solid content (%)	90%	85
AP/HTPB/Al (%W/W)	80/10/10	80/15/5
AP trimodal (mesh)	400/200/100	400/200/100
Berat jenis (gr/cm ³)	1,7-1,75	1,67
Homogenitasi (%)	99	98
Void	-	-

Kinerja propelan yang masih rendah akan memberikan capaian roket dengan jarak jangkauan, beban muatan, dan dimensi yang tidak sesuai harapan dalam pengembangan roket sehingga penguasaan teknologi roket akan terhambat. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya-upaya menyeluruh untuk meningkatkan impuls spesifik propelan agar dapat mendekati minimal 250 detik.

Tulisan ini membahas kajian litbang yang telah dilakukan dan strategi ke depan untuk meningkatkan kinerja propelan komposit dengan impuls spesifik dari 220 detik menjadi 250 detik.

Kendala dalam penguasaan teknologi propelan dengan sumber acuan terbatas, transfer teknologi tidak ada, dan kesulitan mendapatkan bahan baku propelan membutuhkan kemadirian dalam litbang propelan (Wibowo, 2017). Oleh karena itu, perlu kajian teknis dalam meningkatkan kinerja propelan komposit di Indonesia.

Dengan kajian tersebut maka dihasilkan rekomendasi strategi litbang yang harus dilakukan untuk menaikkan kinerja propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al agar target propelan dengan impuls spesifik dari 220 detik menjadi 250 detik dapat dicapai dalam kurun 5 (lima) tahun. Karakteristik kinerja propelan yang diinginkan (standar) dan yang dicapai LAPAN ditampilkan pada tabel 1.1 (Wibowo, 2017; Restasari et.al, 2015; Hartaya, 2015).

2 Tinjauan Pustaka dan Teoritis

2.1 Perkembangan Teknologi

Propelan di Dunia

Pengembangan propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al dikembangkan sejak tahun 1040. Propelan untuk roket kepentingan sipil berukuran besar sampai saat ini masih menggunakan

propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al, seperti yang digunakan untuk roket Delta, roket Falcon, roket Ariane, dan lain sebagainya (Badgular, et.al., 2008). Roket-roket tersebut menggunakan propelan komposit berbasis dasar AP/HTPB/Al yang memiliki impuls spesifik 250-280 detik. Propelan komposit AP/HTPB/Al memiliki kelebihan energi pembakaran yang besar, bukan merupakan bahan eksplosif (klasifikasi 3.1), umur simpan yang lama (2 tahun), memiliki laju bakar moderat, dan secara ekonomis paling murah dibanding bahan propelan lain (Badgular, et.al., 2008; Timnat, 1987). Perkembangan propelan komposit di dunia saat ini dikembangkan dari sisi peningkatan energi pembakaran, teknologi proses, propelan yang dapat disimpan dan digunakan kembali, dan propelan yang ramah lingkungan.

2.1.1 Peningkatan energi pembakaran.

Peningkatan energi pembakaran propelan dilakukan dengan meningkatkan kadar butiran oksidator dan bahan bakar dalam propelan (*solid loading density*) dan penambahan material berenergi tinggi. Peningkatan energi propelan telah dieksplorasi para peneliti melalui peningkatan *solid loading density* propelan yang mencapai 92,5% melalui optimasi bentuk dan ukuran butiran AP, penggunaan AP dan Al ukuran nano, pelapisan AP dengan pelapis energetik, dan penggunaan sistem binder HTPB yang memiliki *solid loading capacity* sangat tinggi (95%) (Sariak et.al., 2017; Salgado et.al., 2018).. Propelan komposit yang digunakan rata-rata telah memiliki *solid loading density* mencapai 92,5% melalui optimasi binder yang digunakan, rekompresi bentuk dan ukuran AP (Sariak et.al., 2017). Penggunaan Ap nano masih dalam tahapan penelitian

dan belum diaplikasikan dalam sistem roket karena kesulitan mendapatkan campuran yang homogen (Rahman et.al., 2018; Kumari et.al., 2015). Teknologi pelapisan AP dikembangkan untuk mendapatkan AP terlapis bahan energetik yang sangat tipis sehingga dapat tahan dari sifat higroskopis dan porositas dengan kadar pelapis yang sangat kecil (2%) (Priyanto et.al., 2015). Teknik pelapisan AP dengan menggunakan sistem *dryer coating* dapat menggunakan pelapis ukuran nano dan dapat menutup semua pori AP dengan baik, sehingga kadar AP dijaga sangat tinggi. Kadar AP dapat dipertahankan 98-99% dari bahan pengotor dan bahan pelapis (*coating agent*). *Solid loading density* dapat diturunkan dengan menggunakan binder yang memiliki koefisien difusivitasnya rendah, viskositasnya rendah sehingga butiran padatan dapat secara maksimal terisi dalam matriks binder (Ramezani et.al., 2017; Kumari et.al., 2009; Kumari et.al., 2017; Shokry et.al., 2015). HTPB dikenal memiliki difusivitas rendah pada saat berat molekul 2800-3500 gr.mol⁻¹, dan bentuk padatannya memiliki sifat mekanik yang baik. HTPB yang telah diperbaiki microstrukturnya dapat ditingkatkan *solid loading capacity*nya menjadi 95% seperti pada HTPB type RBV 45 (Wibowo, 2016a; Chen et.al., 2017; Zhou, et.al., 2014) .

Upaya menaikkan energi pembakaran propelan berbasis AP/HTPB/Al juga dilakukan dengan menambahkan senyawa-senyawa berenergi sangat tinggi (*high energetic material*). Beberapa bahan oksidator energetik telah ditambahkan dan diaplikasikan untuk propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al seperti RDX, NG, HMX, dan HNF (. Beberapa bahan binder energetik telah ditambahkan untuk meningkatkan impuls spesifik dan memperbaiki sifat mekaniknya seperti

NHTPB, MIMO, GAP, dan BAMO (Schulze et.al., 2016; Florczak et.al., 2015; Abusaidi et.al., 2017). Penambahan material ADN sampai 4% dapat meningkatkan impuls spesifik propelan hingga 10%. Penambahan NHTPB sebanyak 2% dapat menaikkan impuls spesifik hingga 5% (Rahman et.al., 2018).

2.1.2 Teknologi proses dan teknik pencetakan.

Perkembangan teknologi proses propelan berada pada dua teknologi kunci, yaitu teknologi pencampuran (*mixing*) dan metode pencetakan. Proses propelan merupakan proses yang memiliki resiko tinggi terjadi ledakan sehingga dibutuhkan mixer khusus. Teknologi mixer termasuk teknologi yang dibatasi perdagangannya oleh MTCR. Teknologi *mixer* saat ini sudah menggunakan mixer otomatis, dilengkapi monitoring adonan, dan dioperasikan dari jarak jauh. Proses pencetakan propelan komposit terdapat dua metode, yaitu metode *free standing* dan *case bonded*. Pembuatan propelan komposit metode *free standing* dilakukan dengan membuat adonan bahan propelan dalam *mixer*, kemudian dicetak sesuai bentuk grain propelan, dan propelan dibungkus dengan *insulator thermal*. Propelan dimasukkan ke dalam tabung motor roket dengan penambahan liner sebagai pengikat (Timnat, 1987). Propelan jenis ini umumnya digunakan untuk roket ukuran kecil dan sedang. Propelan untuk roket ukuran besar biasanya digunakan pencetakan dengan teknik *case bonded*. Propelan dicetak langsung di dalam tabung motor roket yang telah dilapisi *insulator thermal*.

Proses pencetakan propelan yang mula-mula dilakukan pada kondisi atmosferis, sudah mulai berkembang menggunakan kondisi hampa udara

atau ditekan dengan sistem pneumatis untuk memadatkan butiran AP dan Al, mempercepat pengerasan, dan menurunkan porositas propelan sehingga *void* bisa diturunkan menjadi 0,5% dengan ukuran rata-rata maksimal adalah 10 mikron. Propelan komposit saat ini menggunakan AP ukuran 5 mikron untuk mendapatkan impuls spesifik yang tinggi (Wibowo, 2016b).

2.1.3 Propelan yang ramah lingkungan.

Pembakaran AP akan menghasilkan gas klorin yang berbahaya bagi lingkungan dan manusia (Timnat, 1987). Penelitian menggantikan AP atau substitusi AP dengan material energetik tinggi yang lebih ramah lingkungan telah banyak dilakukan. Upaya menggantikan total AP dengan bahan baru masih sulit diaplikasikan karena klasifikasi bahan baku dan propelan yang dihasilkan adalah *high eksplosif* sehingga membutuhkan proses dan penyimpanan yang khusus seperti yang digunakan untuk fasilitas militer (Abdullah et.al., 2014; Colclough et.al., 1996). Beberapa penelitian dilakukan untuk menggantikan sebagian AP dengan material lain yang lebih ramah lingkungan. Beberapa material energetik tinggi yang bersifat *low explosive* telah dikembangkan untuk substitusi AP, seperti RDX, HMX, NG, HNF, dan ADN. Untuk memperbaiki sifat mekaniknya, maka beberapa binder energetik juga sudah diaplikasikan seperti penggunaan GAP, NHTPB, BAMO, dan MIMMO. Beberapa penelitian telah dapat menaikkan impuls spesifik propelan berbasis AP/HTPB/Al mencapai 12% dengan penambahan material energetik 2 hingga 4%. Pengembangan material energetik tinggi harus diperhatikan kompatibilitasnya dengan binder HTPB, keamanan dalam proses dan penyimpanan, dan laju bakar yang

moderat (maksimal 0,7 mm per detik). Bahan material energetik umumnya bersifat eksplosif, sementara bahan propelan roket sipil harus klasifikasi *non explosive*. Propelan harus memiliki sifat mekanik yang baik dalam suhu operasional (-50 sampai +50°C) (Abusaidi, 2017a; Abusaidi et.al., 2017b; Agrawal et.al., 2010; Ashrafi et.al., 2016).

2.2 Posisi Litbang Teknologi Propelan Komposit di Indonesia

2.2.1 Sejarah litbang propelan di LAPAN.

Pengembangan propelan untuk roket di Indonesia diawali tahun 1963 melalui roket Kartika dengan menggunakan propelan berbahan *blackpowder* (bubuk mesiu). Pengembangan propelan selanjutnya menggunakan propelan komposit berbasis AP/polisulfida hasil kerjasama litbang roket meniru roket-roket Jepang dan berhasil diuji pada tahun 1980. LAPAN mengembangkan propelan berbasis AP/poliuretan yang lebih mudah pembuatan dan penanganannya mulai tahun 1990, dilanjutkan penelitian propelan berbasis AP/HTPB/Al pada tahun 1995. Semua bahan baku propelan tersebut sampai saat ini diimpor dari China (Loekman, 1998).

2.2.2 Sejarah pencapaian teknologi propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al di LAPAN.

Pengembangan teknologi propelan berbasis AP/HTPB/Al di LAPAN pada awalnya menggunakan bahan AP bimodal (dua macam ukuran) dengan kandungan AP dan Al maksimal 82,5% dan kadar Aluminium maksimal 5%. Propelan yang dihasilkan memiliki impuls spesifik rata-rata 200 detik. Pengembangan propelan dengan sistem binder dan penambahan plasticizer baru

(DOA dan DOS) dapat meningkatkan *solid content* menjadi 85% sehingga propelan memiliki impuls spesifik rata-rata 210 detik (Hartaya, 2015). Peningkatan kinerja propelan dilakukan dengan menggunakan AP trimodal dan peralatan proses yang lebih baik, sehingga dihasilkan propelan dengan impuls spesifik rata-rata 221 detik (Hartaya, 2016; Wibowo, 2015b).

2.2.3 Keterbatasan dan kendala dalam pengembangan propelan komposit di Indonesia.

Semua bahan baku propelan yang digunakan untuk formulasi propelan masih diimpor. Pembatasan impor bahan baku propelan dari negara tergabung MTCR mengakibatkan kesulitan dalam mendapatkan bahan baku propelan. Impor dari negara non MTCR juga dibatasi sehingga tidak dapat diperoleh bahan baku propelan kualitas (*grade*) untuk propelan. Bahan baku kualitas propelan standar dan yang diperoleh dapat ditampilkan pada tabel 1-1. Permasalahan lain adalah belum dimiliki alat-alat analisis yang memadai untuk menguji kualitas bahan baku propelan tersebut, belum ada lembaga sertifikasi uji yang tersedia untuk menguji bahan-bahan khususnya untuk propelan di Indonesia. Peneliti di Indonesia mengalami kesulitan dalam melakukan formulasi untuk mendapatkan propelan dengan kinerja seperti yang diharapkan. Proses formulasi propelan berada pada lingkaran penelitian untuk optimasi bahan baku propelan agar dapat diproses dengan baik, homogenitas tinggi, dan mencapai *solid loading density* yang maksimal. Bahan-bahan material energetik tinggi tidak ada yang tersedia di pasaran.

Kunci teknologi proses propelan adalah mixer dan sistem pencetakan. Mixer propelan bertujuan mendapatkan

adonan propelan yang homogen dan dilengkapi sistem keamanan khusus untuk material beresiko meledak. LAPAN telah menggunakan mixer yang memiliki spesifikasi untuk propelan ukuran kecil dan sedang. Metode proses pencetakan yang dilakukan selama ini adalah sistem *free standing*. LAPAN mulai menggunakan sistem proses case bonded dan sedang dalam proses penyempurnaan, menggunakan teknologi dari Korea Selatan pada tahun 2015 (Wibowo, 2015b).

2.3 Teori menaikkan impuls spesifik propelan komposit

Peningkatan kinerja propelan sebagai sumber energi mengikuti hukum termodinamika. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap energi pembakaran propelan adalah masa, energi spesifik, suhu pembakaran, serta teknologi proses pembuatan (Timnat, 1987). Untuk meningkatkan impuls spesifik propelan, maka dapat dilakukan dengan mengatur faktor-faktor tersebut.

a) Masa propelan.

Untuk mendapatkan propelan yang tinggi dapat dilakukan dengan meningkatkan rapat masa propelan dalam kisi-kisi ruang geometris komposit. Sistem propelan komposit terdiri dari butiran AP dan Al dalam sistem binder HTPB. Untuk mendapatkan rapat massa yang tinggi, maka dapat dilakukan dengan meningkatkan *solid loading density* dari butiran oksidator dan *fuel* dalam sistem binder propelan. *Solid loading density* propelan dipengaruhi oleh geometri butiran dan binder. Propelan dengan rapat masa tinggi dapat diperoleh dengan menggunakan kombinasi butiran AP dengan tiga jenis ukuran (trimodal), butiran AP yang berbentuk bola sehingga bisa mengisi geometri binder propelan dengan penuh.

Ukuran AP yang terbaik adalah kombinasi 400, 200, dan 100 mesh (Timnat, 1987; Prianto et.al., 2015).

b) Energi spesifik propelan.

Bahan yang memiliki kontribusi energi propelan paling besar adalah AP dan Al. Propelan dengan energi yang tinggi diperoleh dengan menggunakan bahan AP dan bahan Al yang memiliki energi spesifik yang tinggi. Energi spesifik yang tinggi diperoleh dengan AP yang memiliki kemurnian tinggi dan kepadatan yang tinggi. AP adalah senyawa kristal yang pada keadaan murni berbentuk amorf dan porositas tinggi, sehingga kerapatannya rendah (67%). AP untuk propelan memiliki kerapatan masa sangat tinggi, bisa mencapai 98%. Beberapa material berenergi sangat besar (*high energetic material*) ditambahkan untuk meningkatkan energi dari propelan tersebut. Beberapa material tersebut adalah ADN, HMX, RDX, HNF (Abusaidi, 2017a; Abusaidi et.al., 2017b; Agrawal et.al., 2010; Ashrafi et.al., 2016). Bahan ADN adalah bahan berenergi sangat tinggi, bersifat *low explosive*, memiliki kompatibilitas tinggi dengan binder HTPB sehingga banyak diaplikasikan untuk propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al. Sementara bahan-bahan lain termasuk kategori *high explosive*, sehingga propelan yang dihasilkanpun bersifat eksplosif. Bahan HTPB adalah binder non energetik. Beberapa binder energetik yang memiliki energi tinggi banyak diaplikasikan untuk meningkatkan energi pembakaran, namun memiliki sifat mekanik yang baik (Florczak et.al., 2015; Gupta et.al. 2014; Komarov et.al., 1999; Ramesh et.al., 2012; Betzler et.al., 2016).

Bahan lain yang berpengaruh terhadap energi spesifik propelan adalah sistem binder itu sendiri. Binder HTPB merupakan pengikat butiran AP dan Al. Bahan HTPB adalah sistem binder yang berupa cairan yang akan mengeras menjadi padatan. Bahan HTPB memiliki viskositas yang rendah sehingga campuran butiran AP dan Al dapat terdistribusi dan terikat dengan merata, kemudian akan mengalami peningkatan viskositas dengan penambahan agen pengeras sampai menjadi keras. Propelan harus memiliki kuat mekanik yang baik sehingga tidak mengalami deformasi selama suhu operasional. HTPB memiliki viskositas rendah dan dapat memadat dengan fleksibilitas yang baik sehingga komposit tidak mudah retak. Kemampuan menampung butiran padatan dari sistem binder HTPB sangat tinggi sehingga digunakan sebagai binder propelan. HTPB dengan mikrostruktur yang baik memiliki *solid loading capacity* mencapai 95% (Wibowo, 2016a; Gupta et.al., 2014).

c) Suhu pembakaran.

Propelan dengan suhu pembakaran yang tinggi akan menaikkan energi pembakaran. Suhu pembakaran yang tinggi diperoleh dengan menggunakan logam oksida seperti Aluminium, berilium, dan magnesium. Beberapa peneliti menggunakan aluminium ukuran nano untuk mendapatkan jumlah aluminium yang lebih banyak dan merata sehingga suhu pembakaran meningkat tajam.

d) Penyempurnaan teknologi proses.

Teknologi proses untuk memperoleh propelan yang homogen dan porositas minimal terus diupayakan (Shekhar et.al., 2013).

3 Metodologi

Metodologi kajian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut

- a) Penetapan tujuan program.
Penetapan tujuan program adalah menetapkan tujuan dari program litbang yang terukur dan waktu penyelesaian yang diinginkan.
- b) Tinjauan posisi litbang propelan.
Tinjauan posisi litbang propelan di Indonesia dan di dunia, capaian dan kendala yang dihadapi.
- c) Identifikasi permasalahan.
Identifikasi permasalahan-permasalahan yang muncul, penetapan sumber daya yang dimiliki dan yang tidak dimiliki, serta sumber daya litbang.
- d) Penetapan strategi litbang. Penetapan strategi litbang di bidang propelan berdasarkan solusi terhadap permasalahan yang muncul dan tahapan penelitian yang perlu dilakukan.

4 Pembahasan

4.1 Identifikasi permasalahan

Permasalahan teknis dalam penguasaan teknologi propelan di Indoensia (LAPAN) dapat disarikan sebagai berikut:

- a. Kesulitan pengadaan bahan baku propelan.
 - 1 Semua bahan baku propelan (AP, HTPB, Al, TDI) masih impor.
 - 2 Negara produsen bahan baku propelan anggota MTCR dan non MTCR membatasi ekspor bahan baku propelan spesifikasi grade satu.
 - 3 Kemampuan untuk menentukan grade bahan baku propelan belum dimiliki.
- b. Reformulasi propelan
 - 1 Reformulasi propelan hanya melakukan optimasi terhadap bahan baku propelan yang

dapat diperoleh dengan *solid loading content* maksimal 85%.

- 2 Reformulasi melalui optimasi bentuk dan ukuran butiran padatan belum dapat dilakukan karena keterbatasan bahan baku.
 - 3 Reformulasi melalui optimasi binder dengan *loading capacity* tinggi belum dapat dilakukan karena keterbatasan bahan baku.
 - 4 Reformulasi menggunakan bahan *high energetic material* belum pernah dilakukan
- c. Teknologi proses
- 1 proses pencetakan propelan dengan teknik *case bonded* masih belum berhasil baik.
 - 2 Teknik pencetakan propelan bertekanan tinggi untuk menurunkan porositas dan menaikkan *solid* Teknologi proses untuk menurunkan porositas dan meningkatkan homogenitas telah dilakukan dengan mixer baru, namun belum dapat diperoleh standar porositas maksimal yang diperbolehkan.
 - 3 Teknologi *loading density* belum pernah dilakukan.

4.2 Penetapan tujuan program.

Berdasarkan identifikasi masalah dan tinjauan teoritis, maka tujuan program yang paling baik adalah meningkatkan kinerja propelan komposit dengan impuls spesifik dari 220 menjadi 250 detik. Program ini dijalankan di litbang propelan selama 5 (lima) tahun.

4.3 Penetapan strategi litbang.

Penetapan strategi libang dilakukan berdasarkan identifikasi masalah, capaian yang telah dihasilkan,

sumber daya yang dimiliki, kemudian ditetapkan strategi litbang untuk mengatasi masalah ditampilkan pada tabel 4.1. Tahapan penguasaan litbang yang dapat dilakukan adalah a) Penetapan sasaran formulasi propelan yang ditargetkan, b) penjaminan kualitas bahan baku propelan yang dapat dilakukan, c) reformulasi propelan untuk optimasi *solid loading density*, homogenitas, dan porositas, d) penambahan material energetik untuk meningkatkan impuls spesifik, dan e) *scale up* formulasi ke proses produksi.

Sasaran formulasi propelan ditetapkan berdasarkan kondisi saat ini yang memiliki impuls spesifik 220 detik, akan ditingkatkan ke batas minimal impuls spesifik propelan pada umumnya, yaitu 250 detik. Prioritas pertama litbang propelan adalah mendapatkan bahan baku propelan spesifikasi bagus. Untuk mendapatkan bahan baku propelan yang berkualitas baik, diperlukan penetapan syarat keberterimaan bahan baku propelan dan cara analisisnya.

Cara analisis bahan baku propelan yang bersifat khusus (mudah meledak atau terbakar) banyak yang tidak dimiliki oleh lembaga analisis independen atau lembaga pengujian sipil di Indonesia (Wibowo, 2016a; Wibowo, 2016b). Beberapa alat uji perlu diadakan oleh LAPAN seperti *bomb calorimeter*, *particle size analyzer*, *porosimeter*, *bulk densitometer*, *solid loading capacity measurement*, dan lain sebagainya (Wibowo, 2016b; Komarov et.al.,1999). Keterbatasan bahan baku propelan yang diperoleh dimungkinkan untuk mendapatkan spesifikasi yang lebih rendah dari target, untuk kepentingan formulasi maka dibutuhkan analisis karakteristik bahan baku propelan tersebut. Hal ini disebabkan banyak bahan baku propelan yang tidak terdapat *material data sheet (MSDS)*.

Hasil akhir dari tahapan ini adalah mendapatkan syarat keberterimaan bahan baku propelan, cara pengujian karakteristik propelan, dan memperoleh MSDS sebagai dasar dari proses formulasi propelan.

Tahap berikutnya adalah formulasi propelan. Formulasi propelan bertujuan untuk mendapatkan formula yang optimal menggunakan bahan baku propelan yang diperoleh. Formulasi propelan dilakukan dengan meningkatkan *solid loading sensity* dan menambahkan material *high energetic material*. Upaya meningkatkan *solid loading density* dapat dilakukan secara efektif jika dapat diperoleh bahan baku yang baik spesifikasinya. Jika spesifikasi bahan baku propelan terbatas, maka hanya dapat dilakukan optimasi formulasi saja agar dapat diperoleh formulasi propelan yang optimum dengan menggunakan bahan baku yang ada.

Optimasi dapat dilakukan dengan mengatur komposisi bahan baku propelan sehingga propelan dapat diproses dan memiliki *solid loading density* maksimal. Peningkatan kinerja propelan dapat dilakukan dengan menambahkan bahan-bahan berenergi tinggi (*high energetic material*). Penambahan bahan energetik tinggi sebesar 4 % dapat meningkatkan impuls spesifik propelan maksimal 12% (Florczak et.al., 2015; Gupta et.al. 2014;Komarov et.al., 1999; Ramesh et.al., 2012; Betzler et.al., 2016). Beberapa bahan energetik tinggi yang telah digunakan untuk meningkatkan kinerja propelan komposit adalah ADN , RDX, NHTPB, dan GAP (Abusaidi, 2017a; Abusaidi et.al., 2017b; Agrawal et.al., 2010; Ashrafi et.al.,2016). Bahan-bahan tersebut walaupun bersifat *low explossive*, namun propelan yang dihasilkan bersifat *non explossive*.

Selain itu, bahan-bahan energetik tinggi tersebut memiliki kompatibilitas yang baik dengan binder HTPB. Apabila diasumsikan propelan awalnya memiliki impuls spesifik 220 detik, diharapkan bertambah 25 detik melalui penambahan material berenergi tinggi.

Bahan baku propelan dapat diperoleh dengan mengadakan langsung (impor), memperbaiki karakteristik bahan baku yang diperoleh, dan membuat sendiri bahan baku yang tidak tersedia di pasaran. Bahan AP, HTPB, Al saat ini dapat dimpor dari negara China. Keterbatasan material tersebut saat ini adalah memiliki *solid loading density* maksimal 85%. Bahan AP dapat ditingkatkan kualitasnya dengan menurunkan keseragaman ukuran butiran sehingga kerapatan AP dalam sistem komposit dapat ditingkatkan.

Peningkatan impuls spesifik propelan dapat ditingkatkan sebesar 5% dengan meningkatkan keseragaman ukuran AP. Beberapa bahan energetik tinggi seperti RDX, GAP, dan AND dapat diperoleh melalui industri bahan peledak PT DAHANA dan PT PINDAD. Bahan binder NHTPB saat ini tidak dapat diperoleh melalui impor, sehingga harus dibuat sendiri (Wibowo, 2015); Wibowo, 2016a).

Pengembangan teknik proses propelan dapat meningkatkan kinerja propelan karena dapat menaikkan *solid loading density* juga. Teknologi proses yang baik dapat menurunkan porositas (*void*) sehingga ruang kosong komposit dapat diminimalkan, melalui penambahan bahan *plasticizer* (DOA, DOS, TPB) dan pencetakan propelan melalui tekanan tinggi. Pengembangan teknologi ini dapat meningkatkan kinerja propelan cukup besar, yaitu 5% (Wibowo, 2017).

Untuk mengatasi permasalahan keterbatasan bahan baku propelan,

khususnya adalah AP dan HTPB maka perlu dibangun kemandirian bahan baku tersebut. Pengadaan prototip produksi AP dan HTPB penting dalam rangka menyediakan bahan baku propelan yang sesuai dengan spesifikasi untuk propelan kelas internasional.

Untuk dapat melaksanakan program tersebut maka dibuat rencana kerja penelitian seperti ditunjukkan pada tabel 4.2. Untuk mendapatkan impuls spesifik yang diinginkan, maka perlu dilakukan langkah-langkah kongkrit dan sistematis.

Pertama adalah membuat syarat keberterimaan dan metode pengujian bahan baku propelan yang dipersyaratkan, khususnya bahan-bahan pokok seperti AL, AP, HTPB, TDI. Kemudian dilakukan identifikasi karakteristik bahan baku propelan untuk kepentingan formulasi propelan. Identifikasi pokok AP meliputi bentuk dan ukuran butiran, kemurnian, porositas, lapisan (stabilitas terhadap sifat higroskopis), berat jenis, energi pembakaran. Identifikasi pokok Al adalah bentuk dan ukuran butiran, kemurnian, berat jenis, energi pembakaran.

Identifikasi pokok HTPB adalah kemurnian, berat molekul rata-rata, distribusi berat molekul rata-rata, struktur konfigurasi, bilangan hidroksil, kuat mekanik dan pot life binder, dan *solid loading capacity*. Identifikasi pokok TDI adalah berat jenis, struktur konfigurasi, bilangan isocianat. Identifikasi material menjadi sangat penting karena akan diketahui kemampuan maksimal reformulasi propelan yang akan dicapai.

Berbasiskan hasil identifikasi bahan baku propelan, kemudian dilakukan optimasi komposisi yang dapat diproses menjadi propelan, memiliki porositas rendah, dan memiliki impuls spesifik optimal. Optimasi

komposisi dapat dilakukan dengan mengatur komposisi bahan baku propelan, menambahkan plasticizer yang sesuai, dan teknologi proses.

Langkah berikutnya adalah melakukan penelitian untuk meningkatkan impuls spesifik propelan menggunakan bahan baku propelan yang telah diperbaiki (*treatment*) dan penambahan bahan-bahan energetik tinggi. Bahan baku propelan yang telah ada dapat diperbaiki karakteristiknya dengan memperbaiki keseragaman ukuran partikel dengan proses *refining*. Proses perbaikan AP dengan rekristalisasi menjadi tidak efektif karena akan merusak pelapis AP sehingga mengakibatkan rusaknya lapisan AP yang menyebabkan bersifat hidroskopis.

Peningkatan impuls spesifik propelan juga dapat dilakukan dengan menambahkan bahan energetik tinggi yang sangat efektif meningkatkan impuls spesifik secara signifikan. Bahan ADN dan RDX adalah oksidator energetik yang banyak digunakan untuk meningkatkan impuls spesifik propelan komposit. Bahan NHTPB dan GAP adalah binder energetik yang memiliki sifat mekanik baik dan berenergi tinggi. NHTPB adalah turunan dari HTPB sehingga dapat dibuat melalui modifikasi struktur HTPB yang tersedia. Banyak formula tersedia untuk mengubah HTPB menjadi NHTPB (Krishnan et.al., 2012; Florczak et.al., 2015).

Keterbatasan bahan baku propelan sebagai akar dari permasalahan dalam peningkatan impuls spesifik dapat diselesaikan dengan membangun prototip produksi AP dan HTPB kapasitas kecil. Pembangunan unit produksi AP dan HTPB tidak efisien dibangun oleh industri swasta nasional karena tidak ekonomis. Bahan AP dan HTPB adalah bahan spesifik untuk propelan dengan

kebutuhan yang relatif kecil. Pembangunan prototip produksi AP dan HTPB dalam skala kecil namun dengan teknologi proven diperlukan untuk menyelesaikan permasalahan formulasi propelan ke depan. Pembangunan unit produksi AP dan HTPB dapat dilakukan lembaga litbang LAPAN.

Untuk menjalankan program litbang tersebut, maka dapat dilakukan dengan pengelompokan program berdasarkan unit atau laboratorium sesuai dengan kompetensinya. Program diketuai oleh analisis sistem yang melaksanakan koordinasi dan desain program yang akan dijalankan, termasuk desain formulasi yang diinginkan.

Laboratorium uji kualitas menjalankan fungsi mengadakan bahan baku propelan yang berkualitas baik. Laboratorium ini dilengkapi dengan peralatan laboratorium yang khusus menangani bahan-bahan propelan yang belum dapat diadakan oleh laboratorium sipil lainnya. Laboratorium bahan AP adalah menyiapkan bahan AP untuk formulasi propelan. Laboratorium ini memiliki kemampuan modifikasi AP yang ada untuk ditingkatkan kualitasnya.

Laboratorium AP juga harus membangun atau mengadakan prototip unit produksi AP yang sudah proven. Unit produksi tersebut akan dapat mengatasi keterbatasan AP yang tersedia. Laboratorium HTPB adalah laboratorium yang menyediakan HTPB, memodifikasi HTPB untuk mendapatkan HTPB dengan *solid loading capacity* tinggi. Laboratorium HTPB juga harus membangun atau mengadakan prototip unit produksi AP yang sudah proven. Unit produksi tersebut akan dapat mengatasi keterbatasan HTPB yang tersedia. Laboratorium material energetik memiliki karakteristik yang berbeda karena resiko tinggi menangani

bahan eksplosif. Laboratorium material energetik menyiapkan, mensintesis bahan energetik yang dipelrukan untuk menaingkatkan ikinerja propelan seperti NHTPB dan ADN. Karakteristik material energetik yang berupa oksidator dan

binder dapat juga dikombinasikan dengan Lab AP dan HTPB. Lab pengujian karakteristik prpelan menjalankan fungsi pengujian karakteristik propelan yang dibuat, meliputi sifat mekani, sifat fisik, sifat balistik, dan sifat energetik.

Tabel 4.1: TAHAPAN LITBANG PENINGKATAN KINERJA PROPELAN KOMPOSIT

Tahapan	Tujuan	Output
1. Penetapan sasaran formulasi propelan	Menetapkan type propelan yang dikembangkan, jenis roket dikembangkan.	Jenis propelan, type/ukuran, grain, ukuran, model cetak, mixer.
2. Penjaminan kualitas bahan baku propelan		
a. Penetapan spesifikasi dan kebutuhan	Melakukan kajian dan penelitian kebutuhan bahan baku propelan yang diperlukan dan spesifikasi kuncinya.	MSDS bahan baku propelan AP, HTPB, TDI, IPDI, Al, DOA, DOS, TPB
b. Penetapan syarat keberterimaan dan metode analisis kualitas bahan	Melakukan kajian, penelitian, dan penetapan metode pengujian/analisis dan sumber rujukannya	Syarat keberterimaan dan metode pengujian
3. Reformulasi propelan untuk meningkatkan kinerja propelan		
a. Meningkatkan <i>solid loading content</i>	Meningkatkan <i>solid loading content</i> dari 85% menjadi 90%	Peningkatan impuls spesifik propelan 5% (11 detik)
b. Meningkatkan homogenitas dan menurunkan porositas	Penelitian meningkatkan homogenitas propelan dan menurunkan porositas mencapai 2%, dengan pencetakan tekanan tinggi dan pengaturan pencampuran	Peningkatan impuls spesifik propelan 5% (11 detik)
c. Meningkatkan <i>solid loading capacity</i> binder HTPB	Meningkatkan <i>solid loading capacity</i> binder sehingga propelan dapat diproses baik	Peningkatan <i>process feseability</i> binder
d. Penambahan material energetik	Penambahan oksidator energetik ADN dan binder energetik N-HTPB/GAP	Meningkatkan impuls spesifik propelan sebesar 10% (22 detik)
4. Peningkatan kualitas bahan baku propelan	Peningkatan <i>solid loading density</i> HTPB, penyeragaman ukuran AP, pelapisan AP	Meningkatkan impuls spesifik propelan sebesar 10% (22 detik)
5. Membangun kemandirian bahan baku propelan	Membangun prototip produksi AP dan HTPB yang sudah <i>proven</i>	Menyediakan AP dan HTPB yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan

Tabel 4.2. PENYUSUNAN TAHAP PELAKSANAAN PROGRAM

No	Laboratorium	Target	Tujuan
1.	Analisis sistem (koordinator)	Menentukan misi, desain penelitian, dan koordinasi program	Membuat desain formulasi propelan dan pelaksanaannya
2.	Lab Pengujian bahan baku	Membuat syarat dapat diterimanya, menetapkan cara pengujian, dan identifikasi bahan baku propelan secara berkala	Menjamin mendapatkan bahan baku propelan yang standar dan diketahui karakteristiknya
3.	Lab formulasi propelan	Melaksanakan proses Reformulasi propelan menjadi propelan sesuai grain dan formula yang dibuat, menyempurnakan teknologi proses	Mendapatkan formula propelan yang optimal (impuls spesifik, hoogenitas, dan non porous)
4.	Lab Bahan Baku AP	Modifikasi dan treatment AP Membangun unit produksi AP	Menyediakan AP yang sesuai kebutuhan formulasi
4.	Lab Bahan Baku HTPB	Modifikasi dan treatment HTPB Membangun unit produksi HTPB	Menyediakan HTPB yang sesuai kebutuhan formulasi
5.	Lab Material energetik	Penelitian pembatan dan treatment material energetik AND, NHTPB, GAP	Menyediakan material energetik yang sesuai kebutuhan formulasi
6.	Lab Pengujian karakteristik propelan	Melakukan pengujian karakteristik propelan	Memastikan karakteristik propelan memenuhi persyaratan yang diinginkan.

5 KESIMPULAN

Untuk menaikkan kinerja propelan komposit berbasis AP/HTPB/Al, maka perlu strategi dan tahapan penelitian dalam menguasai teknologi propelan untuk menyelesaikan masalah bahan baku propelan, teknologi proses, dan pengembangan formulasi lebih lanjut. Pengembangan formulasi dengan optimasi *solid loading content* dan penambahan material energetik. Permasalahan bahan baku propelan menjadikan proses reformulasi propelan sulit dikembangkan. Kemandirian bahan baku propelan merupakan syarat

mutlak untuk peningkatan kinerja propelan. Strategi yang tersistematis melalui penguasaan uji kualitas dan standar baku bahan baku, penguasaan bahan baku untuk standar, optimasi formulasi, dan pengembangan material high energetic material perlu dilakukan bertahap dan berkesinambungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih diucapkan kepada pusat Teknologi Roket yang memfasilitasi program peningkatan kinerja propelan

komposit melalui DIPA Pusat Teknologi Roket LAPAN tahun 2017.

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., & 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.
- Abusaidi, H., Ghorbani, M., & 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/prop.201600120>
- Agrawal, J. P., (2010). *High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Ashrafi, M., Fakhraian, H., and Dehnavi, M. A., (2016). Synthesis , Characterization and Properties of Nitropolybutadiene as Energetic Plasticizer for NHTPB Binder. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1–8.
<https://doi.org/10.1002/prop.201600057>
- Badgujar, D.M., Talawar, M.B., Asthana, S.N., and Mahulikar, P.P., (2008). Advances in Science and Technology of Modern Energetic Materials: An Overview, *Journal of Hazardous Materials*, 151, pp. 289–305.
- Betzler, F. M., Hartdegen, V. A., Klapötke, T. M., and Sproll, S. M., (2016). A new energetic binder: Glycidyl nitramine polymer. *Central European Journal of Energetic Materials*, 13(2), 289–300.
<https://doi.org/10.22211/cejem/64984>
- Colclough, M. E., Desai, H., Millar, R. W., Paul, N. C., Stewart, M. J., and Golding, P., (1993). Energetic 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>
- Chen, C.Y., Wang, X.F., Gao, L.L. and Zheng Y.F., (2013). Effect of HTPB with different molecular weights on curing kinetics of HTPB/TDI System, *Chinese Journal of Energetic Materials*, 21(6), pp. 771-776.
- Cuihua, L., Tao, L., Xiaoxue, Z., Jianhong, L., Aimin, P. and Xuhui, C., (2016). Curing reaction between HTPB and IPDI, *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 33(5), pp. 452-456.
- 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 Energetic 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>
- Hartaya,K., (2015). Penyempurnaan Proses Pembuatan Propelan Komposit Lapan Berdasar Hasil Penelitian dari India, *Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 13 No. 2 Desember 2015*, pp. 121-130
- Krishnan, G., Ayyaswamy, K., and Nayak, S.K., (2012). Hydroxy Terminated polybutadiene: chemical modifications

- and application *J. Macro. Sci. Part A*, **50(1)**, pp. 128-138.
- 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-MnO₂ in HTPB-based Composite Propellant Formulations, *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, **14(3)**, pp. 589-604.
- Kumari A, Kurva R, Jain S and Bhattacharya B (2009) Size and Shape of Ammonium Perchlorate and their Influence on Properties of Composite Propellant *Defence Science Journal* **59(3)** 294-299.
- 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)**, pp. 393-399.
- Kumari, A., Maurya, M., Jain, S., and Bhattacharya, B., (2017). Nano-Ammonium Perchlorate: Preparation, Characterization, and Evaluation in Composite Propellant Formulation, *Journal of Energetic Materials*, **31(3)**, pp. 115-119.
- Loekman, S., Pengembangan Propelan Komposit, (1998), Majalah LAPAN No2, LAPAN.
- Priyanto, B., Pinalia, A., and Puspitasari, R.R., (2015). The Effect of Spray Gas Flow Rate and Concentration on Modification Ammonium Perchlorate Using Spray Drying: Advances in Science and Technology of Indonesian Aircraft, Rocket, and Satellite, *Indonesia Book Project*, pp. 22-31.
- 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)**, pp. 29-35.
- 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**, pp. 1-8.
- 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 Energetic Materials*, **9(1)**, 49-58.
- 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, 2015*, pp. 59-67.
- 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**, pp. 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 & Policy*, **15(1)**, pp. 51-64.
- Schulze, M.C. and Chavez, D.E., (2016), Synthesis and Characterization of Energetic Plasctcizer AMDNNM, *Journal of Energetic Materials*, **34(2)**, pp. 129-137.
- Shokry, S.A., El-Morsi, A.K., Sabaa, M.S., Mohamed, R.R. and El Sorogy, H.E., (2015). Synthesis and characterization of polyurethane based on hydroxyl terminated polybutadiene and reinforced by carbon nanotubes, *Egyptian Journal of Petroleum*, **24(2)**, pp. 113-232.
- Shekhar, C., Pant, M.S., Santosh, S., Banerjee, P.K., Khanna, (2013). Single Step Synthesis of Nitro-Functionalized Hydroxyl-Terminated Polybutadiene, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **38**, pp. 748-753.

- Trache, D., Klapotke, T.M., Maiz, L., Abd-Elghany, M. and DeLuca, L.T., 2017. *Green Chamistry*, **20**, pp. 4711-4736.
- Timnat, Y.M., 1987. Advanced Chemical Rocket Propulsion, *Academic Press*, pp. 132-135
- 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*, pp. 273-290.
- Wibowo, H.B., (2015). Pengembangan Propelan Mandiri untuk Roket Komposit. *Prosiding JASAKIAI 21 November 2013*, pp. 157-162.
- Wibowo, H.B., (2016). Kontrol Kualitas Bahan Baku Propelan, *Penerbit Indonesia Book Project*, pp. 134-139.
- Wibowo, H.B., (2016). Polimer HTPB Pengembangan *Binder* Propelan Komposit Di Indonesia, *Penerbit Indonesia Book Project*, pp. 120-129.
- Wibowo, H.B., (2017), Teknologi Propelan Untuk Penguasaan Teknologi Roket, Bahan Orasi Profesor Riset, LIPI, pp. 78-80
- Zhou, Q., Jie, S. and Li, B.G., (2014). Preparation of Hydroxyl Terminated Polybutadiene, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53(46)**, pp. 17884–17893.