

PROPELAN DAN TEKNOLOGI PEMBUATANNYA

Arip Susanto*)¹, Luthfia Hajar Abdillah**)

*) Mahasiswa STT Adi Sucipto, Yogyakarta,

**) Pusat Teknologi Roket, Lapan

¹e-mail: aripas@rocketmail.com

RINGKASAN

Propelan roket dibedakan menjadi dua jenis sesuai dengan misinya yaitu propelan padat dan propelan cair. Propelan padat komposit merupakan propelan dengan bahan penyusun berupa *oxidizer*, *fuel*, *binder* dan *curing agent*. Proses pembuatannya berurutan mulai dari persiapan bahan, proses *coating*, *spraying*, *mixing*, *casting*, *curing*, *decoring*, uji kualitas, *assembly* hingga uji statik. Parameter utama yang digunakan untuk mengukur kinerja propelan padat komposit adalah impuls spesifik. Untuk mendapatkan impuls spesifik yang tinggi adalah dengan penggunaan kandungan *solid content* yang lebih tinggi, khususnya penggunaan *fuel* yang lebih banyak, karena *fuel* lebih berperan dalam peningkatan energi propelan dibandingkan dengan *oxidizer*.

1 PENDAHULUAN

Propelan adalah material yang jika dibakar menghasilkan molekul gas dalam jumlah besar dan temperatur yang sangat tinggi selama pembakaran berlangsung. Material ini mempunyai energi besar, dan dapat meledak sehingga banyak digunakan untuk senjata api, bahan peledak dan roket. Pada teknologi antariksa, propelan digunakan sebagai bahan bakar dan salah satu sistem propulsi dari wahana antariksa. Dalam penerapannya, propelan lebih banyak digunakan dan dikenal pada teknologi roket, untuk keperluan militer yang membawa hulu ledak maupun roket pendorong satelit.

Secara umum, proses pembakaran diperlukan api, bahan bakar dan oksigen. Namun keberadaan propelan memberikan solusi akan kebutuhan sumber energi yang mampu digunakan pada ruang hampa udara karena tidak membutuhkan oksigen. Kebutuhan oksigen sebagai salah satu komponen pembakaran digantikan dengan *oxidizer*. Teknologi propelan merupakan salah satu teknologi tinggi dan hanya beberapa institusi yang diberikan ijin oleh pemerintah dalam melakukan penelitian dan

pengembangannya, misalnya LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional). Melalui publikasi ini, penulis ingin memaparkan secara persuasif dan memperkenalkan kepada masyarakat secara umum mengenai propelan dan teknologi pembuatannya.

2 PROPELAN ROKET

Propelan dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu propelan padat dan propelan cair (Sutton, 2001). Propelan padat adalah propelan yang berbentuk padat atau propelan non fluida. Kelebihan propelan jenis ini adalah lebih mudah untuk disimpan, dan kekurangannya adalah *unthrotlelable* atau besar kecilnya *thrust* yang dihasilkan tidak mampu diatur, dan memiliki impuls spesifik lebih kecil dibanding propelan cair.

Propelan cair atau propelan fluida adalah propelan berbentuk cair. Perkembangan terakhir, propelan ini banyak digunakan pada roket-roket terbaru. Keunggulan propelan cair adalah *thrust* yang dihasilkan dapat diatur atau *throttleable* dan memiliki impuls spesifik relatif besar. Beberapa kekurangan antara lain biaya produksi yang cukup mahal, resiko peledakan

saat proses pembuatan dan cara penyimpanan yang lebih sulit. Propelan cair mengandung beberapa komposisi antara lain *oxidizer* dan *fuel*. Propelan roket cair pada hakekatnya sama seperti bahan bakar pesawat terbang, namun kebutuhan oksigen dipenuhi dari *oxidizer* sendiri yang dibawa dalam bentuk cair (Sutton, 2001).

Pada propelan roket cair, dalam aplikasinya memiliki banyak jenis baik *oxidizer* maupun *fuel*-nya, seperti hidrogen cair (H_2), oksigen cair (O_2), avtur ($C_{12}-C_{14}$), *hydrazine* (N_2H_2), UDMH, metana (CH_4), *flourine* cair (F_2), nitrogen tetraoksida (NO_4), dan lain-lain. Propelan jenis ini termasuk propelan terbaru pada generasi teknologi propelan, meskipun dalam penggunaan, sejak awal propelan padat memang terlebih dahulu telah ditemukan dan digunakan sebelum propelan cair (Mattingly, 2006).

Propelan padat memiliki komposisi yang berbeda-beda sesuai dengan penggunaannya dan dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, antara lain *single base*, *double base*, *triple base*, komposit, komposit yang dimodifikasi *double base* (Sutton, 2001). Bahan pembuatan propelan padat komposit terdiri dari bahan padatan dan bahan cair antara lain *fuel*, *oxidizer*, *binder*, *plasticizer*, *curing agent*, dan *additive*.

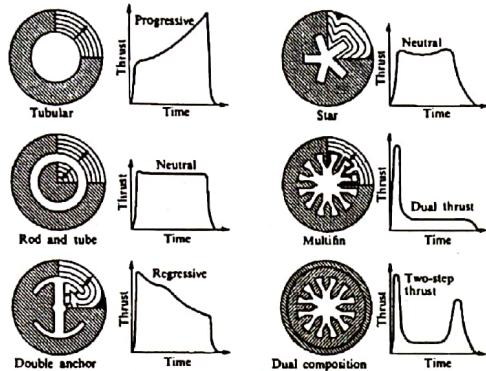
Bahan yang termasuk dalam bahan padatan adalah *fuel*, *oxidizer* dan *additive*. *Fuel* pada propelan padat komposit antara lain Aluminium (Al), Beryllium (Be), Zirconium (Zr). *Oxidizer* adalah senyawa atau unsur yang mengoksidasi *fuel* ketika proses pembakaran terjadi. Contohnya ammonium perklorat (NH_4ClO_4), ammonium nitrat, potassium perklorat, potassium nitrat, ammonium dinitramine, dan lain-lain. *Additive* adalah unsur atau senyawa yang dicampurkan pada komposisi propelan yang biasanya bersifat sebagai katalis pada setiap reaksi (Sutton, 2001).

Sedangkan yang termasuk dalam bahan cair adalah *binder*, *plasticizer*, dan *curing agent*. *Binder* adalah senyawa atau unsur yang digunakan sebagai pengikat seluruh komposisi yang ada pada propelan. Contohnya *Hydroxy-terminated polybutadiene* (HTPB), *Carboxyl-terminated polybutadiene* (CTPB), *Polybutadiene acrylonitrile acrylic acid* (PBAN), *Polybutadiene acrylic acid* (PBAA). Sedangkan *plasticizer* adalah senyawa atau unsur yang memberikan efek plastis pada propelan. Contohnya *Dioctyladipate* (DOA), *Dioctyl phthalate* (DOP), *Dioctylsebacate* (DOS), *Dimethyl phthalate* (DMP), *Isodecylpelargonate* (IDP). *Curing agent* adalah senyawa atau unsur yang berfungsi untuk mematangkan propelan agar propelan mengeras. Contohnya *Isophorone diisocyanate* (IPDI), *Toluene-2,4-diisocyanate* (TDI), *Methyl aziridinyl phosphine oxide* (MAPO), *Hexamethylene diisocyanide* (HMDI), *Dimeryl diisocyanate* (DDI), *Trimethylol propane* (TMP), *Trimesoyl-1 (2-ethyl)-aziridine* (BITA) (Sutton, 2001).

Parameter yang bisa digunakan untuk menentukan performa propelan (menghitung *thrust* yang dihasilkan) adalah laju bakar atau *burning rate* dan impuls spesifik (Isp). Laju bakar adalah panjang propelan yang terbakar per satuan waktu yang memiliki dimensi L/T (Mattingly, 2006) sedangkan impuls spesifik adalah gaya per laju aliran masa propelan dikali dengan gravitasi, dan memiliki dimensi T (Sutton, 2001). Setiap propelan padat memiliki impuls spesifik berbeda-beda, tergantung dari jenis, komposisi, dan *grain* yang digunakan. Propelan padat didesain dengan konfigurasi *grain* yang berbeda-beda. Setiap konfigurasi *grain* pada propelan memiliki karakteristik tersendiri yang dapat ditunjukkan dalam bentuk grafik gaya dan waktu. Luasan grafik tersebut adalah Isp.

Pada bagian selanjutnya akan dibahas mengenai propelan khususnya

jenis padat komposit yang dilakukan oleh LAPAN. Pembahasan yang dipaparkan mengenai jenis peralatan, bahan-bahan apa saja yang digunakan, dan penelitian-penelitian yang pernah dilakukan.



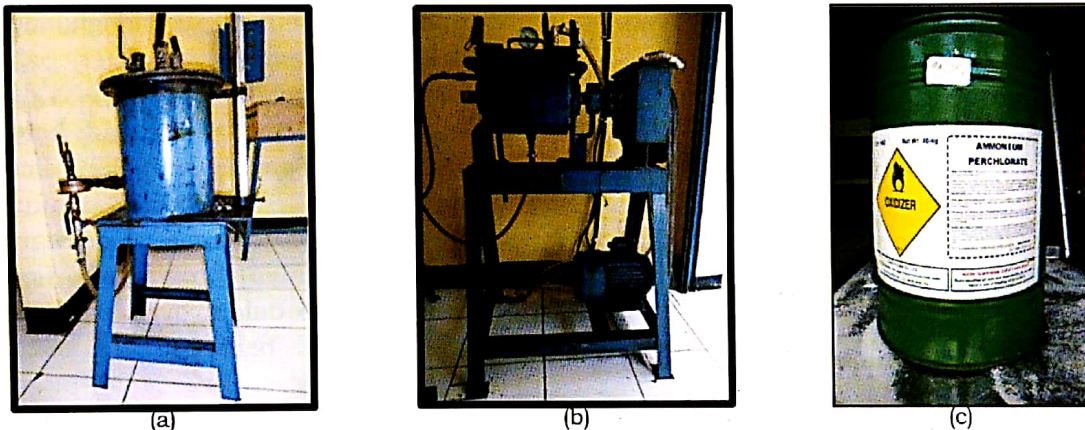
Gambar 2-1: Beberapa Grain Propelan Padat (Mattingly, 2006)

3 METODE

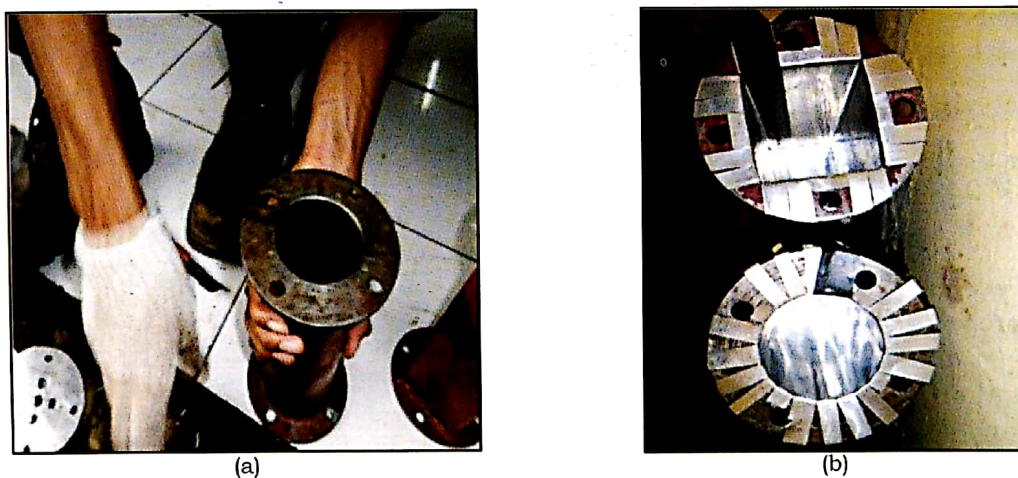
Pembuatan propelan terdiri dari beberapa langkah kerja mulai dari tahap

persiapan alat dan bahan sampai dengan tahap pengujian statik. Pertama-tama dilakukan persiapan alat dan bahan. Beberapa contoh alat dan bahan yang digunakan ditampilkan dalam Gambar 3-1(a),(b),(c).

Persiapan alat dan bahan dilakukan pertama kali saat memulai proses pembuatan propelan padat komposit. Alat yang digunakan antara lain *mixer* berkapasitas 5 liter dengan sistem *batch*, *vacuum casting*, oven, tabung cetakan, mandril dan alat pendukung lainnya. Bahan yang digunakan antara lain *fuel*, *oxidizer*, *binder*, *plasticizer*, *curing agent*, *bonding agent*, dan aditif. Selanjutnya dilakukan proses *coating* yaitu proses pelapisan tabung cetakan menggunakan plat alumunium sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3-2(a) dan (b).

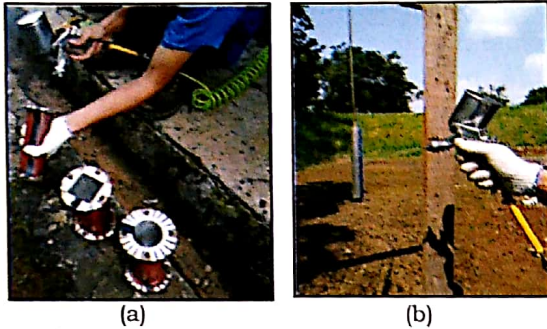


Gambar 3-1: (a) *Vacuum casting*; (b) *Mixer* kap.5 liter; (c) Bahan Oksidator



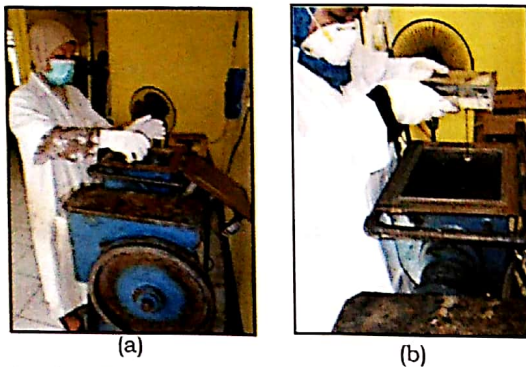
Gambar 3-2: (a) Tabung cetakan sebelum dilapis; (b) Tabung cetakan setelah dilapis

Tabung cetakan yang telah dilapis plat aluminium disemprot dengan *release agent*, begitu juga mandril yang akan digunakan. Proses ini disebut proses *spraying* yang bertujuan untuk mempermudah proses pelepasan propelan dari cetakan dan pelepasan mandril dari propelan. Proses ini ditampilkan pada Gambar 3-3 (a) dan (b).



Gambar 3-3: (a) Penyemprotan tabung cetakan; (b) Penyemprotan mandril

Setelah tabung cetakan dan mandril siap digunakan, maka selanjutnya dilakukan proses pembuatan propelan melalui proses *mixing*. Proses *mixing* adalah proses pencampuran bahan-bahan yang akan digunakan sebagai komposisi propelan, baik berupa cairan maupun padatan.

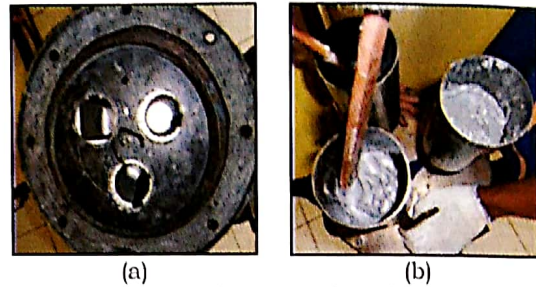


Gambar 3-4: (a) Pemasukan bahan; (b) Pengukuran viskositas adonan propelan

Pada proses ini, seluruh komposisi bahan propelan dicampur secara merata dengan *mixer* melalui beberapa tahap pencampuran yang dilakukan pada suhu dan waktu tertentu. Setiap tahap pemasukan bahan ke dalam *mixer* dilakukan juga pengukuran viskositas

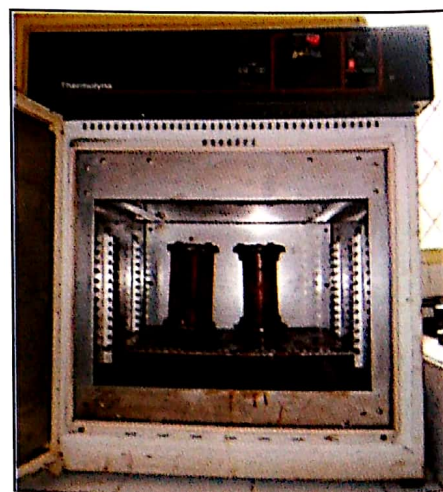
adonan propelan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3-4(a) dan (b).

Setelah semua bahan diaduk dalam *mixer*, proses selanjutnya adalah proses *casting* yaitu proses pencetakan adonan propelan hasil dari proses *mixing* ke dalam tabung cetakan yang diletakkan di dalam *vacuum casting chamber*. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 3-5 (a) dan (b).



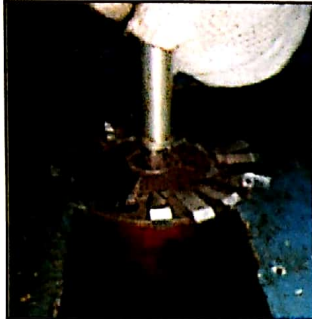
Gambar 3-5: (a) Tabung cetakan dalam *vacuum casting chamber*; (b) Proses *casting*

Pengkondisian vakum pada *casting chamber* bertujuan untuk menghilangkan udara yang kemungkinan terjebak di dalam propelan yang dapat menyebabkan propelan menjadi keropos atau *porous*. Setelah propelan dicetak dalam tabung, selanjutnya dilakukan proses *curing* yaitu proses pematangan propelan. Propelan yang telah dicetak dimasukkan ke dalam oven pada suhu 60°C selama beberapa hari agar propelan mengeras. Pengovenan propelan dapat dilihat pada Gambar 3-6.



Gambar 3-6: Proses pematangan propelan dalam oven

Proses selanjutnya adalah *decoring* yaitu proses pencabutan mandril dari propelan sehingga diperoleh propelan dengan bentuk *grain* yang diinginkan. Proses ini dapat dilakukan dengan menggunakan hidrolik maupun secara manual sebagaimana Gambar 3-7.



Gambar 3-7: Pencabutan mandril dari propelan

Propelan yang sudah dilepas dari mandril selanjutnya dilakukan proses pengukuran dan pengujian kualitas propelan. Proses pengukuran sifat propelan terdiri dari pengukuran viskositas dan kekerasan seperti pada Gambar 3-8 (a) dan (b). Sedangkan proses pengujian kualitas propelan meliputi pengujian balistik (laju bakar) dan mekanik (elastisitas) seperti pada Gambar 3-8(c) dan (d).

Pengukuran viskositas dilakukan menggunakan viskometer yang hasilnya

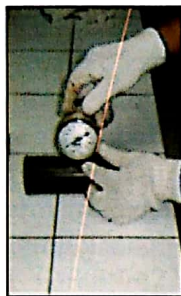
dinyatakan dalam satuan *poise*. Pengukuran kekerasan dilakukan menggunakan *durometer shore A* pada beberapa titik dari silinder propelan kemudian dirata-rata.

Pengujian balistik dilakukan dengan cara mengukur besarnya laju bakar propelan. Laju bakar diukur dalam satuan panjang per waktu. Laju bakar digunakan untuk menentukan besarnya *thrust* yang dihasilkan propelan. Pengujian mekanik dilakukan untuk mengetahui tingkat keuletan propelan berdasarkan nilai kuat tarik dan elongasinya. Selain itu propelan juga diuji menggunakan x-ray untuk melihat adanya *porous* atau tidak pada bagian dalam propelan yang tidak bisa terlihat dari luar.

Proses selanjutnya adalah *assembly* atau proses perakitan propelan ke dalam motor roket. Setelah hasil dari pengujian kualitas propelan dinyatakan baik, maka propelan dirakit ke dalam motor roket dan diberi *liner*, insulator, dan inhibitor sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3-9 (a) dan (b). Setelah proses *assembly* selesai, roket dipasang igniter sebagai penyalama saat akan dilakukan uji statik.



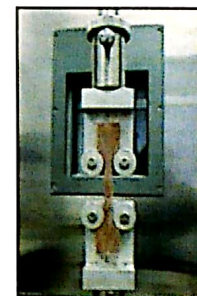
(a)



(b)



(c)



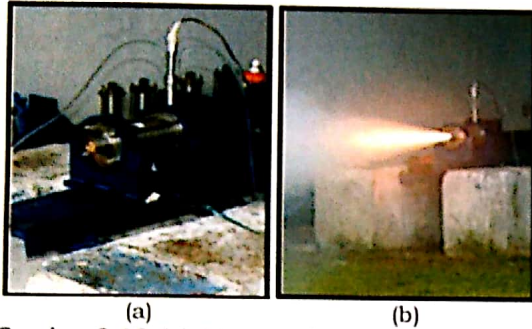
(d)

Gambar 3-8: (a) Pengukuran viskositas akhir adonan propelan; (b) Pengukuran kekerasan propelan; (c) Pengujian laju bakar propelan; (d) Pengujian elastisitas propelan



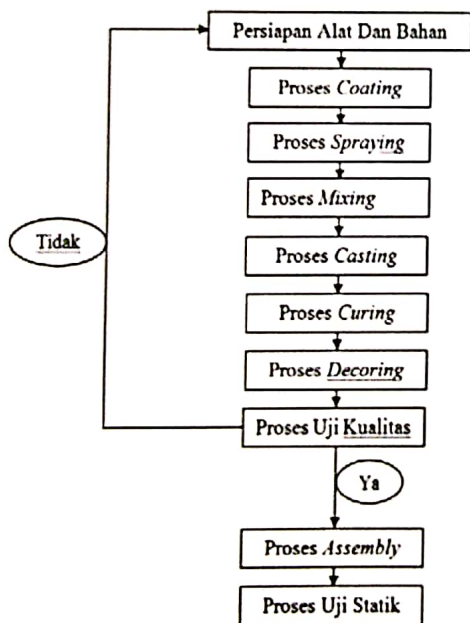
Gambar 3-9: (a) Propelan setelah diberi liner; (b) Motor roket siap di uji statik

Motor roket yang telah siap selanjutnya akan dilakukan proses pengujian statik. Proses uji statik adalah proses pengujian dengan menyalakan roket secara statis atau diam. Pada proses ini, roket dinyalakan untuk diamati karakteristik secara visual dan diukur nilai impuls spesifik (Isp)-nya. Proses pengujian dapat dilihat pada Gambar 3-10(a) dan (b).



Gambar 3-10: (a) Motor roket terpasang pada load cell; (b) Proses pengujian statik

Secara umum, proses pembuatan propelan hingga proses pengujian dapat dilihat pada Gambar 3-11.



Gambar 3-11: Diagram Alir Proses dan Pengujian Propelan

4 PEMBAHASAN

Penelitian propelan berujung pada tercapainya kinerja propelan yang maksimal, dalam hal ini pencapaian impuls spesifik (Isp) maksimal yang diharapkan. Banyak faktor yang perlu diperhatikan dalam pencapaian target tersebut, diantaranya karakteristik propelan seperti kekerasan, viskositas, densitas, laju bakar, elongasi, dan kuat tariknya. Selain karakteristik tersebut, proses perangkaian propelan ke dalam motor roket juga bisa mempengaruhi performa dari propelan. Karena itulah setiap langkah perlu dilakukan dengan teliti.

Sebagaimana disebutkan dalam literatur (Sutton, 2001), propelan yang dibuat di laboratorium komposisi dasarnya adalah propelan skala K-round (propelan dengan dimensi berupa diameter dalam, diameter luar dan panjang berturut-turut sebesar 26 mm, 59 mm dan 200 mm) yang menggunakan ammonium perklorat (AP) sebagai oxidizer, aluminium (Al) sebagai fuel, HTPB sebagai binder dan TDI sebagai curing agent.

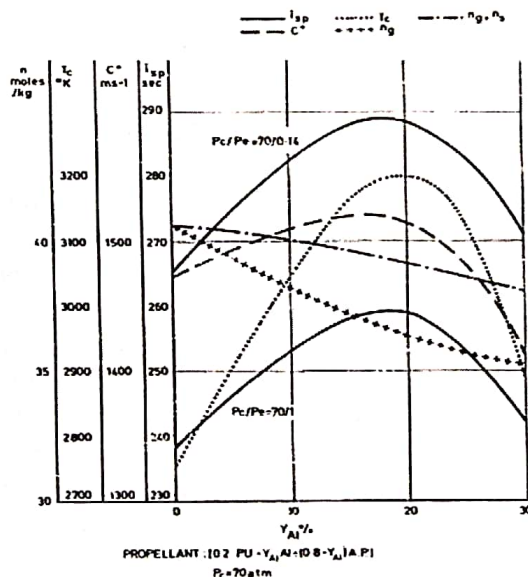
Pada proses pembuatan propelan umumnya digunakan dua atau tiga macam ukuran AP yaitu ukuran 400, 200, dan 100 mikron. Sedangkan Al hanya satu ukuran saja yaitu 30 mikron. AP dan Al merupakan komponen padat yang memiliki peran yang lebih berarti atau signifikan dalam hal peningkatan nilai Isp dibandingkan dengan komponen cair (HTPB dan TDI). Hal ini dapat dilihat dari hasil penelitian yang pernah dilakukan yang ditampilkan dalam Tabel 4-1.

Tabel 4-1: NILAI Isp PROPELAN PADA BEBERAPA PERSENTASE SC DAN LC

No.	Kode Propelan	% Oxidizer	% Fuel	% SC	% LC	Isp (s)
1.	12-P1	75	7.5	82.5	17.5	199.49
2.	12-S1	77.5	7.5	85	15	204.85
3.	12-Y1	72.5	12.5	85	15	214.90

Dari Tabel 4-1 dapat dilihat bahwa dengan dilakukannya penambahan persentase *solid content* (SC) terjadi peningkatan nilai Isp. Penambahan persentase SC pada propelan no. 2 dilakukan dengan penambahan persentase *oxidizer* sedangkan persentase *fuel* dibuat tetap. *Oxidizer* berfungsi sebagai penyuplai oksigen dalam reaksi pembakaran propelan. Dengan ditambahkan persentase *oxidizer* maka suplai oksigen menjadi lebih banyak, sehingga pembakaran *fuel* pada propelan lebih maksimal untuk menghasilkan energi yang lebih tinggi. Dengan energi yang lebih tinggi maka Isp yang dihasilkan juga semakin tinggi.

Sedangkan propelan no. 3 dilakukan penambahan jumlah *fuel* dan pengurangan jumlah *oxidizer*. Hasil Isp yang diperoleh lebih tinggi dibandingkan dengan propelan no. 2. Hal ini berarti *fuel* yang berfungsi sebagai bahan bakar lebih berperan dalam peningkatan energi propelan dibandingkan dengan *oxidizer*. Berikut ditampilkan kenaikan Isp yang bisa dicapai seiring dengan kenaikan persentase *fuel* (William, 1989).



Gambar 4-1: Pengaruh kandungan *fuel* (Al) terhadap beberapa parameter

Pada Gambar 4-1 terlihat pengaruh penambahan persentase Al pada propelan AP-poliuretan (PU) pada fraksi massa PU

20%. Puncak Isp 260 detik pada rasio tekanan 70/1 dan terjadi pada fraksi massa Al sekitar 19%. Dengan persentase *fuel* 19%, maka persentase *oxidizer* adalah 61%. Berdasarkan literatur, untuk mendapatkan propelan komposit dengan Isp hingga 260 detik diperlukan *fuel* sebesar 19% dengan persentase *binder* mencapai 20%. Dengan demikian, penelitian lebih lanjut perlu dilakukan yang melibatkan penggunaan *fuel* pada persentase yang lebih besar untuk mendapatkan Isp sebagaimana teoritis.

Penelitian dan pengembangan propelan dalam hal komposisi masih terus dilakukan, termasuk dalam penggunaan bahan-bahan aditif yang dapat menaikkan Isp dan memungkinkan untuk diproses (bukan merupakan bahan beracun maupun sensitif meledak). Faktor-faktor lain yang dapat menunjang keberhasilan terus diupayakan, misalnya dalam hal pembaruan peralatan, pengkajian dan evaluasi metode, terutama dalam hal kemandirian bahan baku. Kemandirian bahan baku sangat penting karena dari sinilah titik awal penelitian dilakukan. Spesifikasi bahan baku yang berubah-ubah dapat menghambat penelitian yang sedang berjalan. Hal ini menyebabkan propelan yang dihasilkan bisa mempunyai karakteristik yang berbeda meski dibuat dengan komposisi yang sama. Selama ini bahan baku yang digunakan masih mengandalkan impor yang tidak bisa dijamin keberlangsungan pengadaannya (kontinuitas pengadaan), bisa saja bahan dengan spesifikasi yang dibutuhkan sudah tidak diproduksi lagi. Maka penelitian dalam pembuatan bahan baku propelan pun terus dilakukan agar ketergantungan pada impor dapat dihentikan secara perlahan sehingga kontinuitas bahan baku dapat dijamin.

5 PENUTUP

Teknologi pembuatan propelan merupakan teknologi yang kompleks

dimulai dari persiapan bahan baku, proses *coating*, *spraying*, *mixing*, *casting*, *curing*, uji kualitas, *assembly*, dan uji statik. Untuk mendapatkan kinerja propelan yang maksimal diperlukan kandungan *solid content* yang lebih tinggi, khususnya penggunaan *fuel* yang lebih banyak karena *fuel* yang berfungsi sebagai bahan bakar lebih berperan dalam peningkatan energi propelan dibandingkan dengan *oxidizer*. Maka kontinuitas bahan baku, khususnya *solid content* menjadi sangat penting dan merupakan salah satu industri strategis yang hanya dimiliki beberapa negara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Drs. Kendra Hartaya, M.Si yang telah memberikan bimbingan atas tersusunnya karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Mattingly, J. D., 2006. *Element of Propulsion : Gas Turbines and Rockets*, Virginia: AIAA.
- Sutton, G. P., and Biblarz, O., 2001. *Rocket Propulsion Elements*, California: John Willey& Son.
- William, FA; Barrere, M; Huang, NC., 1989. *Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets*, England: Technivision Services Slough.