

PENENTUAN KANDUNGAN OKSIDATOR BERDASAR REAKSI STOIKIOMETRI DAN STRUKTUR KRISTAL DALAM RANGKA ADOPSI FORMULASI PROPELAN HLP (DETERMINATION OF OXIDATOR CONTENT BASED ON STOICHIOMETRICAL AND CHRYSTAL STRUCTURE ON PURPOSE OF HLP PROPELLANT FORMULATION ADOPTION)

Kendra Hartaya¹, Luthfia Hajar Abdillah, Retno Ardianingsih
Peneliti Bidang Teknologi Propelan, Pusat Teknologi Roket, LAPAN
¹e-mail: kendra19838@yahoo.co.id

ABSTRACT

The Lapan's propellant composition is determined based on from propellant's HLP formulation. The determination of composition is based on the *stoichiometric reaction* of the burning of HTPB and the burning of Al by AP. From the stoichiometry, the percentage of AP is 68%, HTPB 31% and Al 1%. the ratio of coarse AP (200 μ m) to fine AP (70 μ m), is determined based on the assumption that the chrystal structure is BCC. From that assumption, if the radii of the coarse AP is R, then the fine AP is $r=41,42\%R$, Every BCC cells will have 2 grains of coarse AP and 3 grains of fine AP, so that the ratio is 2/3. Coarse AP according to HLP has size of 180-280 μ m (average $r=165\mu$ m, empty space of $29.10^{-4}\mu$ m). Because finer AP supplier can not be found, it is concluded that finer AP is obtained by grinding the coarse AP or by special cooperation. So, the Lapan propelan composition based on HLP is AP 68% (mix of coarse and fine AP), Coarse AP ($R=200\mu$ m), finer AP (83 μ m) or coarse AP of 165 μ m, and fine AP of $29.10^{-4}\mu$ m.

Keywords : *Oxydizer, Propellant, HLP*

ABSTRAK

Telah dilakukan penentuan komposisi propelan LAPAN berdasar formulasi propelan HLP. Penentuan komposisi propelan LAPAN berdasar pada stoikiometri reaksi pembakaran HTPB dan pembakaran Al oleh AP. Berdasarkan stoikiometri ini diperoleh prosentase AP adalah 68% sehingga HTPB 31% dan Al 1%. Selanjutnya rasio AP kasar (200 μ m) terhadap AP Halus (70 μ m) ditentukan berdasar asumsi bahwa struktur yang terbentuk oleh sekumpulan butiran AP adalah *Body Center Cubic* (BCC). Berdasar asumsi BCC, jika radius AP kasar R, maka radius AP halus $r=41,42\%$, atau jika AP kasar 200 μ maka AP halus 83 μ m. Dalam satu satuan sel BCC, terdapat 2 butir AP kasar dan 3 butir AP halus sehingga rasio AP kasar-AP halus = 2/3 AP kasar yang sesuai dengan propelan HLP adalah ukuran 180-280 μ (rata-rata ukuran $r=165\mu$, ruang kosong $r=29.10^{-4}\mu$). Karena tidak ditemukan *supplier* AP ukuran kurang dari 100 μ , diduga AP halus propelan HLP adalah rekayasa dari AP ukuran besar, atau diperoleh melalui kerjasama khusus. Komposisi propelan Lapan berdasar formulasi HLP, mengandung AP 68% (campuran AP Kasar dan AP halus), AP kasar 200 μ (R) AP halus 83 μ ($r=41,42\%$) atau AP kasar 165 μ , AP halus $29.10^{-4}\mu$.

Kata Kunci : *Oksidator, Propelan, HLP*

1 PENDAHULUAN

Bahan komposit adalah gabungan dua atau tiga bahan yang secara sifat fisik dan kimia berbeda dan tidak saling melarutkan satu sama lain yang pada saat digabung akan menghasilkan bahan yang berbeda dengan bahan penyusun asalnya. Bahan komposit bisa berupa bahan bakar yang bisa digunakan dalam bidang antariksa (*aerospace*). Bahan komposit umumnya terdiri dari fasa terdispersi (*reinforcement*) dan fasa matriks. Fasa matriks membungkus fasa terdispersi [Kitinirunkul, 2013]. Propelan yang dikembangkan LAPAN selama ini adalah propelan komposit dengan fasa matrik berupa binder HTPB dan fasa terdispersi Amonium perklorat dan Aluminium *powder*.

Propelan padat komposit yang sedang dikembangkan LAPAN menggunakan bahan baku Hydroxyl Terminated Polybutadiene (HTPB) sebagai binder, Amonium perklorat (AP) sebagai oksidator, dan Aluminium *powder* (Al) sebagai *fuel* yang semuanya diperoleh secara impor [Nair, 2010]. Pada pembakaran, AP menyediakan oksigen yang akan membakar binder

menghasilkan gas dengan berat molekul sederhana, dan membakar Al *powder* untuk membebaskan energi yang besar. Energi yang dibebaskan pembakaran Al jauh lebih besar daripada energi yang dibebaskan pembakaran binder [Martin et al, 2003].

Propelan dengan formulasi Hanwha LAPAN Propellan (HLP) memiliki Impulse spesifik tinggi (248,6 detik). Komposisi propelan HLP adalah seperti terlihat pada Tabel 1-1. Formulasi HLP adalah komposisi propelan hasil kerjasama antara LAPAN-Korea. Komposisi AP pada propelan formulasi HLP memiliki berupa data rentang. Pengambilan prosentase AP pada median (data tengah) baik AP kasar dan AP halus adalah yang paling mudah dilakukan [HLP, 2102]. Namun untuk pengambilan prosentase yang lain dari prosentase AP kasar dan AP halus memerlukan alasan yang logis berupa perhitungan. Dengan adanya perhitungan ini jika Isp propelan LAPAN (hasil adopsi formulasi propelan HLP) yang dihasilkan tidak seperti yang diinginkan maka bisa dilakukan evaluasi dengan mudah.

Tabel I-1: KOMPOSISI PROPELAN HLP

No.	Jenis Bahan	Nama Bahan	Kandungan, %
1.	Binder	HTPB (BM 3500)	11,5065
2.	Hardener	IPDI (BM 222)	0,9585
3.	Oksidator (bimodal)	AP Φ 200 μ Φ 70 μ	26-46 23-43
4.	Fuel	Aluminium	15
5.	Plastisizer	DOA	2,76
6.	Burning catalyst	Fe ₂ O ₃	0.3-0,7
7.	Combust stabilizer	Carbon Black	0,05
8.	Co-catalyst	Trifenil bismuth	0,05
9.	Bonding Agent	TEPAN	0,15
10.	Curing co-catalyst	Maleat anhidrid	0,025
11.	Curing co-catalyst	MgO	0,025
12.	Isp 248,6 detik		

LAPAN telah berupaya membuat propelan dengan mengacu pada komposisi propelan HLP namun hasil Isp yang diperoleh baru mencapai 216 detik (Hartaya dkk, 2013). Partikel oksidator AP trimodal, Al 12%, tidak bulat, kemurnian 89,6%, *Hardener* TDI, HTPB tidak memiliki spesifikasi yang jelas seperti angka hidroksil, berat molekul, %vinil, %cis *trans-isomer*, propelan LAPAN dengan jenis dan kuantitas bahan penyusun yang belum sesuai dengan spesifikasi HLP diduga menjadi penyebab rendahnya Isp tersebut.

AP yang digunakan propelan formulasi HLP adalah bimodal (dua ukuran), kasar 200 μ dan halus 70 μ . Oleh karena AP kasar mudah diperoleh di pasaran (*ready use*) sedang AP halus sulit diperoleh di pasaran, maka dapat diduga AP halus propelan HLP adalah bukan AP *ready use* dan AP kasar adalah *ready use*.

Penentuan komposisi propelan penting untuk dilakukan mengingat kandungan AP dalam formulasi HLP dinyatakan dalam rentang ukuran. Dalam propelan HLP, AP kasar 26-46%, dan AP halus 23-43%. Jika propelan LAPAN mengadopsi komposisi AP kasar dan AP halus berturut-turut adalah 26% dan 23%, maka kandungan oksigen dalam propelan pembakaran sangat minimal. Jika AP kasar dan AP halus 46% dan 43%, maka *solid content* sangat besar mencapai 89% sehingga tidak mudah dalam pengerjaan. Aplikasi besarnya kandungan AP yang tepat akan menghasilkan kinerja propelan maksimal. Kandungan AP bisa ditentukan berdasar pada reaksi stoikiometri pembakaran Aluminium dan pembakaran HTPB yang diperoleh dari US Patent [Martin et al, 2003]. Selain itu, kadungan AP juga bisa ditentukan berdasarkan pada diagram segitiga antara Polibutadien, Aluminium, dan oksidator Amonium perklorat [Timnat, 1987].

Tujuan dari makalah ini, melalui

data *Technology Transfer Report* dan data distribusi ukuran partikel AP, adalah untuk mengetahui besarnya prosentase kandungan AP kasar dan AP halus menggunakan hasil perhitungan stoikiometri reaksi pembakaran Al dan HTPB. Selain itu juga perlu mengetahui rasio ukuran AP kasar terhadap AP Halus berdasar asumsi struktur kristal *Body Center Cubic* (BCC). Tidak kalah pentingnya perlu mengetahui kondisi AP halus "*ready use*" atau bukan dengan cara membandingkan kurva distribusi antara AP kasar dan AP halus. Tujuan terakhir ini penting karena AP ukuran 70 μ tidak banyak tersedia di pasaran (sulit diperoleh).

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Propelan dan Isp

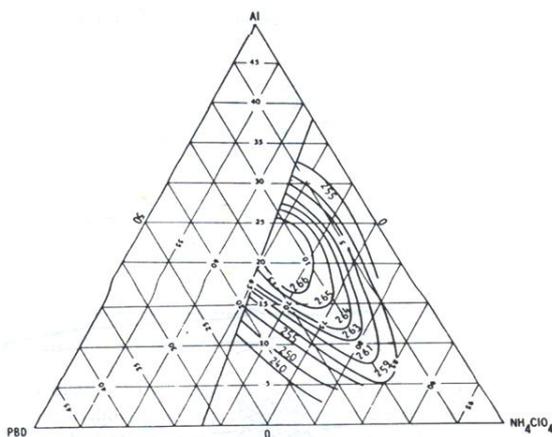
Formulasi propelan padat yang paling banyak digunakan saat ini menggunakan Al sebagai *fuel logam* dan AP sebagai oksidator. *Binder* juga sebagai *fuel* meski kurang energetik dibandingkan dengan logam karena energi yang dibebaskan pada pembakaran hanya sepersepuluhnya dibanding energi pembakaran Al [Martin et al, 2003]. *Binder* yang biasa digunakan adalah HTPB. Propelan tipe seperti ini lebih disukai karena proses pembuatan dan penanganannya mudah, karakteristik *performance* relatif bagus.

Komposisi propelan padat umumnya terdiri dari AP 60-84%, PBN 12-16%, Al 2-20%, curing agent 0,2-1,0%, stabilizer 0-1,0% [Kishore & Sridhara, 1999]. Komposisi lain juga bisa dibuat dengan AP 65-70%, Al 15-20%, Binder HTPB 10-15% dengan curing agent TDI [Ramesh et al, 2012].

Formulasi propelan roket padat terdiri dari (dalam % berat) 68% AP (distribusi ukuran partikel trimodal, 24% 200 μ m; 17% 20 μ m; 27% 3 μ m), 19% Al (diameter partikel rata-rata 30 μ m), 12% *binder* (HTPB) dan *curing agent* (IPDI), dan 1% katalis laju bakar

(Fe₂O₃). Bahkan komposisi HTPB 12%, AP 65%, Al 23% bisa mencapai Isp vacuum 334 detik [Hinkelman & Heister, 2011].

Dalam menentukan formulasi AP, HTPB, Al di dalam propelan dapat ditinjau dari stoikiometri reaksi pembakaran yang terjadi diantara ketiganya [Martin et al, 2003]. Formulasi lain juga bisa menggunakan diagram segitiga yang merupakan kurva antara komposisi Al, AP, Polibutadien, dan Isp sebagaimana disajikan pada Gambar 2-1 di bawah ini [Timnat, 1987].



Gambar 2-1: Kurva Isp sebagai fungsi AP, PB dan Al [Timnat, 1987, William, 1989]

Tolok ukur kinerja motor roket propelan padat banyak sekali, yaitu impuls total, impuls spesifik, gaya dorong, tekanan motor internal, dan waktu pembakaran. Impuls total adalah [Turker, 2013]

$$I_t = \int F \cdot dt \quad (2-1)$$

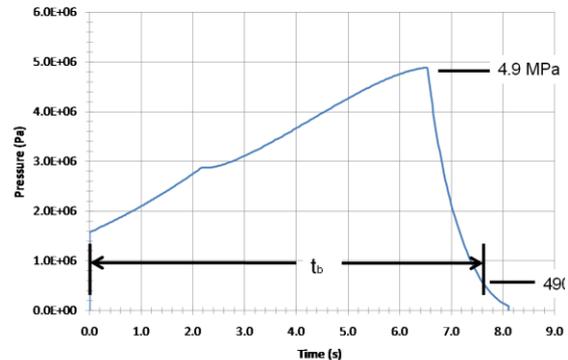
satunya N. detik, sedang Impuls spesifik (Isp) adalah

$$I_{sp} = \frac{\int F \cdot dt}{g_o \cdot \int \dot{m} \cdot dt} = \frac{I_t}{g_o \cdot \int \dot{m} \cdot dt} \quad (2-2)$$

g :grafitasi, dan Gaya dorong $F = C_F \cdot A_t \cdot P_c$ dengan satuan Isp disederhanakan menjadi detik meskipun Isp tidak mengarah pada waktu. Tekanan Motor Internal atau

$$C_F = \sqrt{\frac{2\gamma^2}{(\gamma-1)} \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]} + \left(\frac{P_e - P_{amb}}{P_c} \right) \frac{A_e}{A_t} \quad (2-3)$$

Waktu kinerja adalah waktu tekanan motor pertama mencapai 10% dari maksimum tekanan hingga waktu tekanan mulai turun 10% dari tekanan maksimum. Ini bisa dilukiskan pada Gambar 2-2 [Moore, 2010].



Gambar 2-2: Waktu kinerja motor roket

Bentuk yang lebih sederhana dari Isp adalah

$$I_{sp} = \frac{F \cdot t}{M} \quad (2-4)$$

Atau

$$I_{sp} = \sqrt{[2J \cdot (H_c - H_e)]} \quad (2-4)$$

Dengan F gaya dorong, t waktu, M berat propelan. Satuan Isp adalah *N.detik/kg*. J panas mekanis ekivalen, H_c entalpi hasil reaksi dalam ruang bakar pada p , T tertentu (kkal/kg), H_e entalpi reaksi. Jika hasil yang keluar nosel dalam satuan kkal/kg maka satuan Isp menjadi *N detik/kg*. Hubungan antara Isp dengan suhu dalam ruang bakar adalah

$$I_{sp} = K_1 \sqrt{T_c N} \text{ atau } I_{sp} = K_2 \sqrt{[T_c / M]} \quad (2-6)$$

T_c suhu ruang bakar, N banyaknya mole/gr, M berat molekul gas, K_1 dan K_2 adalah tetapan [Turker, 2013]. Isp adalah salah satu sifat penting propelan selain laju bakar (r), pangkat dari tekanan (n). Dalam keadaan ideal laju bakar tidak tergantung pada tekanan (nilai $n=0$, *plateau burning*). Isp tinggi jika: [Krause]

- Panas reaksi tinggi
- Suhu nyala tinggi
- Berat molekul rata-rata hasil pembakaran rendah

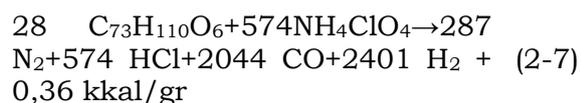
Efektifitas balistik dari sebuah propelan selain terantung pada Isp juga tergantung pada eksponen tekanan $r=aP^n$, dan densitas (massa jenis propelan) [Lemper, 2011]

2.2 Reaksi Pembakaran Propelan

Oleh karena komponen utama propelan komposit adalah AP sebagai sumber oksigen, binder (HTPB + TDI), dan aluminium, maka reaksi pembakaran adalah reaksi antara oksidator dengan binder (base polibutadien, HTPB), dan oksidator dengan aluminium [Martin et al, 2003].

Reaksi Pembakaran Binder

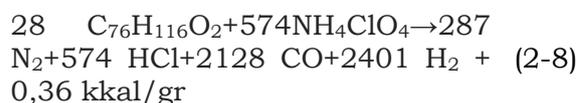
Reaksi pembakaran antara HTPB dan Fuel Al dengan oksidator ammonium perklorat adalah seperti pada persamaan (2-7) dan (2-10) berikut ini [Martin et al, 2003]



Diasumsikan bahwa struktur HTPB yang digunakan Patent (BM 1082) diperoleh secara empiris yang mengandung angka hidroksil tertentu yang di pasaran merupakan HTPB

grade-1 dengan BM <2500 yang ada di pasaran (Tabel 2-1).

Struktur secara teoretis HTPB memiliki gugus OH pada kedua ujung rantai sehingga struktur reaksi disesuaikan dengan banyaknya unit monomer sama, BM 1060. Reaksi menjadi

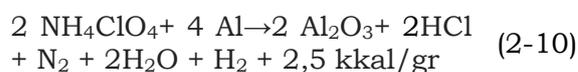


Untuk kepentingan dalam penelitian di LAPAN reaksi ini dimodifikasi menggunakan HTPB grade 3 dengan BM 3500 dengan unit monomer lebih besar.



Dari reaksi Pembakaran HTPB ini setiap 1 mol HTPB memerlukan 64,5 mol AP atau 3500 gr HTPB memerlukan 7578,75 gr AP.

Reaksi pembakaran Al dinyatakan dalam persamaan reaksi sebagai berikut [Martin et al, 2013]



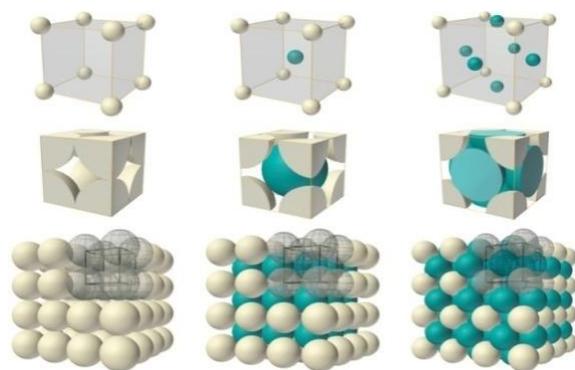
Tabel 2-1: SPESIFIKASI HTPB TEKNIS*)

Spesifikasi	I	II	III	IV
Kenampakan	Cairan tidak berwarna atau kuning tipis			
Nilai OH (mmol/gr)	≥ 1,0	0,8- 1,0	0,65-0,8	0,55-0,65
Berat Molekul (MWn)	≤ 2300	2300-2800	2800-3500	3500-4500
Viskositas 40°C Pa.detik	≤ 3,0	≤ 5,0	≤ 6,0	≤ 9,0
%H ₂ O (m/m)	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
%H ₂ O ₂ (m/m)	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05

*)Tanyun chemical research Institute, Co inc

Dari reaksi pembakaran Al ini, setiap 1 mol Al memerlukan $\frac{1}{2}$ mol AP atau 26 gr Al memerlukan 59 gr AP. Jika ditotal, dari reaksi pembakaran HTPB dan Al oleh AP, total propelan yang bisa dibuat sebanyak 11248,25 gr, bila dinyatakan dengan prosentase bahan, AP=68%, HTPB=31%, Al=1%. Ini adalah kebutuhan AP yang ideal agar mampu memenuhi kebutuhan pembakaran AL maupun kebutuhan pembakaran HTPB secara stoikiometri berdasar dua reaksi reaksi di atas. Dengan terpenuhinya kebutuhan oksidator, maka suhu yang dicapai maksimum karena semua Al yang ada terbakar dengan sempurna, dan semua HTPB terbakar sempurna menghasilkan gas-gas dengan berat molekul rendah sehingga kinerja propelan maksimum.

AP yang digunakan bisa berupa mono-, bi-, atau trimodal. Pada spesifikasi propelan HLP menggunakan AP bimodal (dengan ukuran 200 μ m dan 70 μ m) dengan komposisi berturut-turut 36 \pm 10% dan 33 \pm 10%. Dalam menentukan rasio AP bimodal perlu ditinjau dengan teori susunan kristal dalam satu unit sel, bisa menggunakan perhitungan dengan asumsi bentuk struktur *simple cubic*, *Body-Centered Cubic* (BCC), maupun *Face-Centered Cubic* (FCC).



Simple Cubic Body Center Cubic Face Center Cubic
 Gambar 2-1: Beberapa ilustrasi susunan kristal dalam satuan unit sel [Vlack, 1992]

Dalam Gambar 2-1 disajikan gambar struktur kristal dengan warna berbeda agar mudah dilihat. Baik coklat atau biru adalah atom yang sama. Dalam bentuk sederhana (*simple cubic*), terdapat 4 atom menempati sudut, dalam bentuk BCC, terdapat 9 atom menempati sudut kubus dan pusat kubus, dalam bentuk FCC 14 atom menempati sisi dan sudut kubus.

3 METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penelitian semi empiris ini dilakukan dengan tahap-tahap sebagai berikut:

- Penentuan perbandingan AP:HTPB:Al dalam propelan formulasi HLP berdasar dari stoikiometri reaksi pembakaran Al dan pembakaran HTPB.
- Penentuan rasio ukuran AP kasar terhadap AP halus dalam formulasi HLP berdasar asumsi struktur kristal *Body Center Cubic* (BCC).
- Penentuan kandungan AP kasar dan AP Halus dalam propelan formulasi HLP berdasar asumsi struktur kristal *Body Center Cubic* (BCC).

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Percobaan

Tabel 4-1 menyajikan komposisi propelan HLP berikut nilai Isp yang dicapai dengan komposisi tersebut. Gambar 4-2a dan 4-2b menampilkan distribusi ukuran AP 200 μ dan distribusi ukuran AP 70 μ . Tabel 4-2 dan Tabel 4-3 berturut-turut menyajikan distribusi ukuran AP kasar (200 μ) dan AP halus (70 μ) ayng digunakan propelan HLP.

Gambar 4-1 menyajikan hasil pengukuran foto *Scanning Electron Microscopy* (SEM) AP *impor ready use*, AP kasar, AP halus. Pengujian dilakukan di Lembaga Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) UGM.

Tabel 4-1: Isp PROPELAN HLP [HLP, 2012]

No.	Jenis Bahan	Propelan Hanhwa	
		Nama bahan	Kadar, %
1.	Binder	HTPB (BM 3500)	11,5065
2.	Hardener	IPDI (BM 222)	0,9585
3.	Oksidator	AP Φ 200μ	26-46
		Φ 70μ	23-43
4.	Fuel	Aluminium	15
5.	Plastisizer	DOA	2,76
6.	Burning catalyst	Fe ₂ O ₃	0.3-0,7
7.	Combust stabilizer	Carbon Black	0,05
8.	Co-catalyst	Trifenil bismuth	0,05
9.	Bonding Agent	TEPAN	0,15
10.	Curing co-catalyst	Maleat anhidrid	0,025
11.	Curing co-catalyst	MgO	0,025
12.	Impuls spesifik	248,6 detik	-

Tabel 4-2: AP-200μ [HLP, 2012]

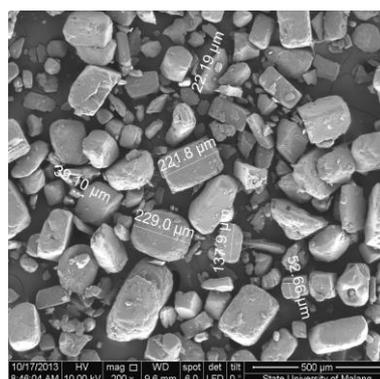
US Standar Sieve no	Sample passing, min	Through sieve, max
20	99.9	-
50	85	97
70	51	78
100	12	38
140	2	15
200	-	5
325	-	2

Tabel 4-3: AP-70μ [HLP, 2012]

US Standar Sieve no	Sample passing, min	Through sieve, max
80	87	-
100	78	95
140	62	82
200	42	60
270	26	45
400	13	30



AP Kasar



AP Halus

Gambar 4-1: Foto SEM AP 2011, AP kasar dan AP Halus

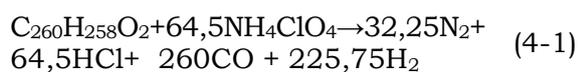
4.2 Pembahasan

Persamaan reaksi 2-7 dan persamaan reaksi 2-10, yaitu reaksi pembakaran binder HTPB dan pembakaran Al powder oleh oksidator amonium perklorat nampaknya reaksi

pembakaran binder HTPB tidak berlangsung sempurna. Hal ini terlihat adanya produk reaksi yang masih mengandung gas CO. Jika reaksi ini diselesaikan secara stoikiometri, maka reaksi ini tidak dalam keadaan

seimbang dalam hal atom oksigen. Kemungkinan *patent* ini hanya menguji gas hasil pembakaran propelan dan mengkaji mengenai reaksi pembakaran PB dan pembakaran Al secara sendiri-sendiri. Jadi dengan kata lain reaksi ini stoikiometri empiris. Namun, reaksi pembakaran Al berjalan sempurna karena produk berupa gas sederhana dengan berat molekul rendah, dan tidak ada gas CO yang dihasilkan sebagai tanda reaksi tidak sempurna.

Adanya kesalahan tulis dalam reaksi pembakaran HTPB berkaitan dengan gas H₂ adanya ketidakseimbangan stoikiometri, rasanya perlu perbaikan struktur HTPB C₇₃H₁₁₀O₆ (BM 1082) menjadi C₇₆H₁₁₆O₂ (BM 1060) karena dalam HTPB hanya ada dua atom "O" yaitu dengan satuan berulang sebanyak 19, OH-(CH₂-CH=CH-CH₂)₁₉-OH. HTPB yang digunakan dalam reaksi *Patent* di atas dengan BM 1060, di pasaran ini merupakan HTPB grade 1. Sedangkan yang digunakan HLP merupakan HTPB grade 3 dengan BM 2800-3500 (Tabel 2-1). Jika HTPB BM 3500 maka satuan berulang (unit monomer) sebanyak 65 dengan struktur C₂₆₀H₂₅₈O₂, (OH-(CH₂-CH=CH-CH₂)₆₅-OH) yang apabila dibuat reaksi dengan AP menjadi



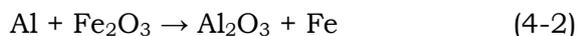
Dari reaksi ini, setiap 1 mol HTPB (3500 gr) memerlukan 64,5 mol AP (7578,75 gr). Dengan cara yang sama bisa dihitung banyaknya AP yang diperlukan untuk pembakaran Al atas dasar reaksi pada persamaan reaksi 2-10. Setiap 1 mol Al (26 gr) memerlukan ½ mol AP (58,75 gr). Dari perhitungan ini, AP yang diperlukan untuk pembakaran Al dan HTPB sebanyak 58,75 + 7578,75 = 7637,5 gr, berat propelan sebagai jumlah dari berat AP, berat Al, berat HTPB sebesar 3500 gr + 7637,5 gr + 26 gr = 11163,5 gr. Maka berat bahan dasar

propelan berdasar perhitungan dari *Patent* adalah 11163,5 gr. Sehingga komposisi bahan dasarnya adalah AP= 68%, HTPB= 31%, Al= 1%.

Berdasarkan perhitungan ini, kandungan AP sebanyak 68% sesuai dengan penggunaan AP kasar 200µm 36% (nilai titik tengah dari 26-46%) dan AP halus 70µm 33% (titik tengah 23-43%) yang masih berada di sekitar 68%. Atas dasar ini, kandungan AP kasar dan AP halus bisa berapapun dengan kisaran AP kasar (26-46%) dan AP halus (23-43%) asal jumlah keduanya ±68%. Jika digunakan AP kasar dan AP halus prosentase minimum atau maksimum tentunya akan berakibat pada perubahan komposisi bahan dan lebih lanjut berakibat pada nilai Isp propelan yang dihasilkan. Perhitungan dalam hal ini penting dilakukan sebelum melakukan penelitian dengan komposisi berikutnya agar tidak sembarang mengadopsi komposisi yang ada dari komposisi HLP. Selain itu dengan perhitungan seperti ini memudahkan untuk evaluasi kinerja propelan yang dihasilkan.

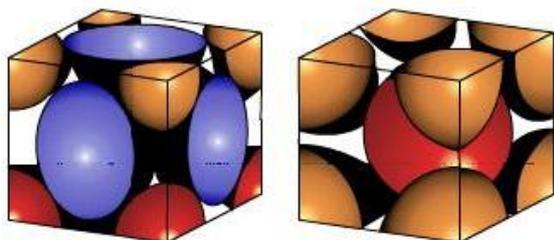
Dari persamaan reaksi 2-8 dan 2-10 di atas, terlihat bahwa energi yang dibebaskan oleh pembakaran Al jauh lebih besar (7x lipat) daripada yang dibebaskan oleh pembakaran binder HTPB. Oleh karena itu dalam menaikkan kinerja propelan (menaikkan nilai Isp) perlu menambahkan kandungan Al dan mengurangi kandungan binder PB. Mungkin ini yang dilakukan dalam formulasi HLP mengurangi kandungan HTPB hingga 11,5% dan menaikkan kandungan Al hingga 15%, dan menambahkan komponen lainnya dalam kandungan sedikit yang berfungsi lain seperti carbon black, TPB, TEPAN, Maleat anhidrid, MgO, DOA, Fe₂O₃. Komponen lain dalam kandungan sedikit ini memiliki fungsi yang berbeda-beda. Dalam pembakaran, komponen ini akan menghasilkan senyawa sederhana

seperti CO₂, H₂O, N₂ (jika senyawa adalah senyawa organik), atau oksida-oksida (jika senyawa anorganik). Bahkan beberapa senyawa mengalami reduksi sehingga melepaskan oksigen sebagai oksidator tambahan bagi pembakaran propelan, misalnya Fe₂O₃.



Fungsi lain dari beberapa senyawa tambahan ini diantaranya sebagai plastisizer DOA, agar mempermudah pengerjaan dalam pembuatan propelan.

Oleh karena kristal dengan struktur *Body Centered Cubic* (BCC) memiliki ruang kosong lebih rendah (lebih rapat) daripada *Face Centered Cubic* (FCC), maka dalam pencampuran akan cenderung mengarah pada struktur BCC [Vlack, 1992]. Struktur kristal FCC dan BCC disajikan pada Gambar 4-2.



Face Center Cubic Body Center Cubic

Gambar 4-2: Struktur kristal FCC dan BCC

Dari perhitungan, jika bola kristal jari-jari R disusun, maka akan ada sela (ruang kosong) yang bisa ditempati dengan bola kristal berukuran $r=0,4142R$. Artinya jika AP kasar memiliki jari-jari R, maka AP halus maksimum berjari-jari $0,4142R$. Jika AP Kasar berukuran 200 mikron ($R=100\mu$), maka AP halus berukuran $82,84 \mu$ ($r=41,42\mu$). Posisi ruang kosong ini (dengan radius r) berada pada 6 zona di

sekitar atom pusat BCC sebanyak 6 dari separoh bola kristal. Sehingga dalam satu satuan kristal BCC terdapat 2 buah kristal berukuran besar (R) dan 3 kristal berukuran kecil (r). Oleh sebab itu rasio AP kasar 200μ terhadap AP kecil 80μ sebesar $2/3$. Propelan HLP menggunakan AP 200μ dan 70μ (dekat dengan hasil perhitungan). Meski HLP mencantumkan AP kasar 26-46% dan AP halus 23-43%, berdasar perhitungan komposisi AP kasar 27% AP halus 40% mestinya lebih baik daripada mengambil titik tengah prosentase AP kasar 36% dan AP halus 33%. Pentingnya perhitungan ini dilakukan agar tidak sembarangan mengadopsi formulasi HLP karena tidak setiap komposisi menghasilkan energi efektif.

Propelan yang memiliki energi besar adalah propelan yang mengandung *solid content* (AP dan Al) tinggi sehingga densitasnya tinggi pula. Densitas yang tinggi bisa dicapai jika kedudukan AP kasar dan AP halus sebagaimana membentuk unit cell BCC sebagaimana diasumsikan. Ruang kosong berikutnya bisa ditempati oleh Al dan di sela-sela ruang bisa ditempati oleh binder. Jika itu bisa terjadi maka campuran bersifat homogen.

Nampak bahwa AP 200 HLP sama dengan AP 200 yang beredar di pasaran sebagaimana disajikan pada tabel di bawah ini. Dari sini dapat disimpulkan bahwa AP 200 digunakan secara langsung tanpa ada perlakuan yang terkait dengan ukuran. Untuk kepentingan pembuatan distribusi ukuran AP, maka disajikan ukuran dan nomor ayakan pada Tabel 4-4.

Tabel 4-4: NOMOR DAN UKURAN AYAKAN [HLP, 2012]

Ukuran sieve	Minimum	Maximum
US sieve no. 40 (425 μ m)	96	
US sieve no. 50 (300 μ m)	89	97
US sieve no. 70 (212 μ m)	57	87
US sieve no. 100 (150 μ m)	14	50
US sieve no. 140 (106 μ m)	2	15
US sieve no. 200 (75 μ m)		3

Tabe 4-5a: FREKUENSI UKURAN AP-200

US Sieve no	Standar	Sample passing, min	Through sieve, max	Frek Min	Frek Max	Range ukuran
18 (1000 μ)		100	-	0,1		1000-850
20 (850 μ)		99.9	100	14,9	3	850-500
50 (500 μ)		85	97	34	19	500-212
70 (212 μ)		51	78	39	40	212-150
100 (150 μ)		12	38	10	23	150-106
140 (106 μ)		2	15	2	10	106-75
200 (75 μ)		-	5		3	75-45
325 (45 μ)		-	2		2	45-38
400 (38 μ)						

Tabel 4-5b: FREKUENSI UKURAN AP-70

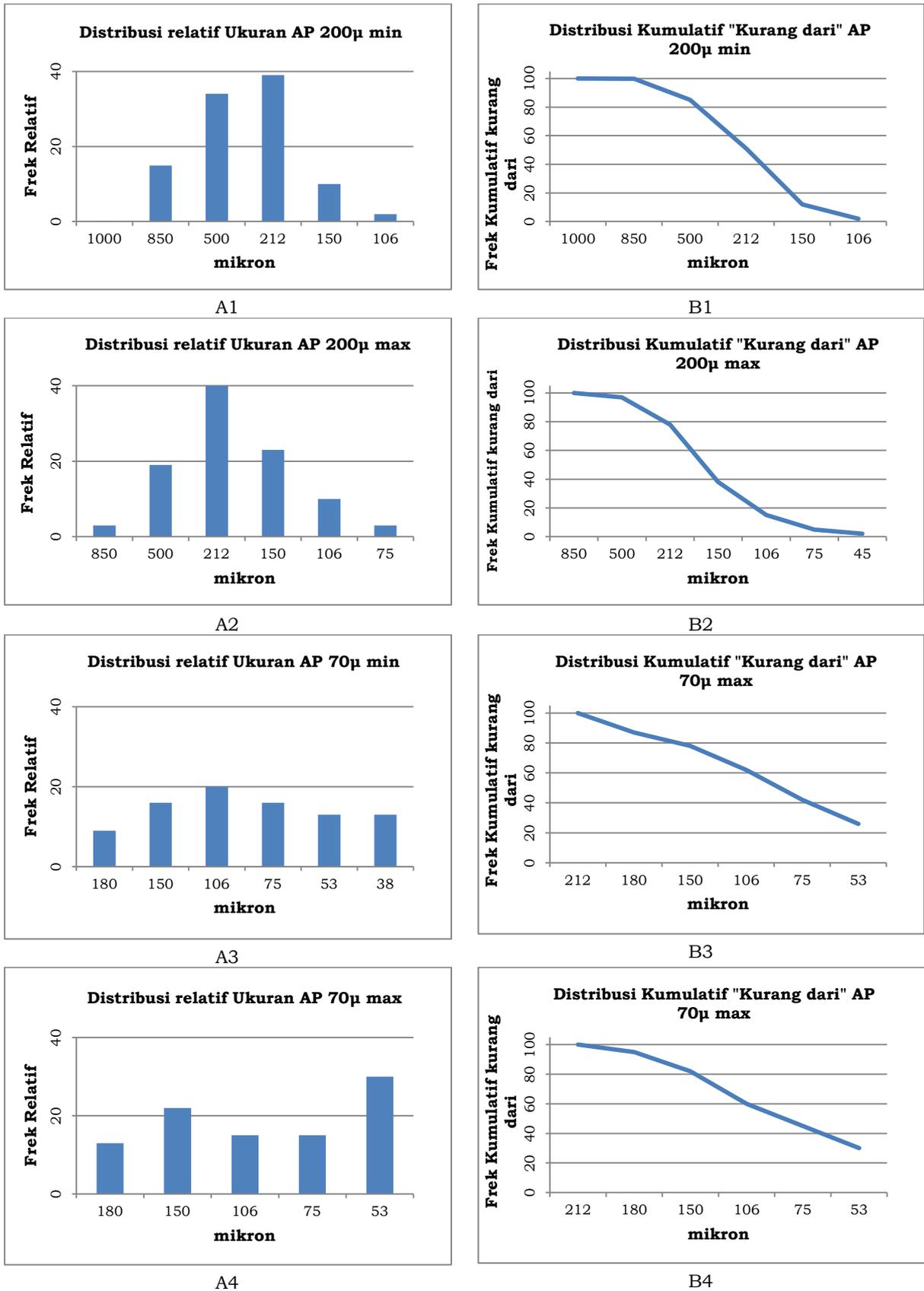
US Sieve no	Standar	Sample passing, min	Through sieve, max	Frek min	Frek max	Range ukuran
70 (212 μ)		100	100	13	5	212-180
80 (180μ)		87 (9)	95	9	13	180-150
100 (150 μ)		78(16)	82	16	22	150-106
140 (106 μ)		62(20)	60	20	15	106-75
200 (75 μ)		42(16)	45	16	15	75-53
270 (53 μ)		26(13)	30	13	30	53-38
400 (38 μ)		13(13)		13		38-32
450 (32 μ)						

Komposisi HLP hanya menyajikan *US Sieve number* dan rentang prosentase AP untuk AP kasar 200μ dan AP halus 70μ. Dari data *US Sieve number* akan ditentukan rata-rata ukuran amonium perklorat (dalam mikron) yang digunakan HLP agar untuk dianalisis. Dari data bisa dihitung frekuensi relatif dan rentang ukuran serta kurva distribusi kumulatif “kurang dari” (Ogive). Ogive adalah nama lain distribusi frekuensi kumulatif “kurang dari”, yang menyatakan banyaknya (prosentase) AP “kurang dari” ukuran tertentu. Dengan kata lain, fraksi dari ukuran “paling besar”. Hasil disajikan pada Tabel 4-5. Adapun daftar distribusi frekuensi dan kurva ogive disajikan pada Gambar 4-3.

Dari Gambar 4-3, nampak bahwa AP 200 memiliki bentuk kurva ogive menyerupai sparoh gunung (lonceng) sebelah kanan (terlihat sebagai distribusi normal). Sedang AP 70 menyerupai garis lurus. AP 200 banyak tersedia dan mudah diperoleh di pasaran. Karena spesifikasi AP 200 di pasaran sama dengan AP 200 formulasi HLP, dapat disimpulkan bahwa propelan HLP menggunakan secara langsung. Yang penting untuk diperhatikan adalah AP 70, karena AP 70 (di bawah ukuran 100μ tidak ada *supplier (manufacture)*. Atau bisa juga tidak adanya *supplier* karena tidak ada permintaan pasar

sehingga manufaktur tidak memproduksi AP dengan ukuran kurang dari 100μ. Atas dasar ini disimpulkan bahwa HLP modifikasi ukuran dari AP kasar untuk mendapatkan AP 70, dan dimungkinkan propelan HLP melakukan *coating* AP 70 untuk mendapatkan kualitas yang sama dengan AP 200. LAPAN bisa melakukan *penggrindingan* AP kasar untuk mendapatkan AP 70μ, namun belum bisa melakukan *coating*, karena belum dirasa segera. Dengan kurva ogive menyerupai garis lurus menunjukkan bahwa ukuran AP 70 tidak berdistribusi normal. Ciri dari distribusi normal jika rata-rata, median, dan modus berada pada klas yang sama dalam distribusi normal. AP 70 modulusnya banyak dan menyebar serta mean dan median tidak berimpit.

Median AP 200 berada pada klas dengan ukuran 212-150μ sedang median AP 70 berada pada klas dengan ukuran 106-75μ. Kedua AP ini memiliki rentang ukuran yang lebar, bukan monodisper (monomodal), rata-rata ukuran diasumsikan sama dengan nilai median (Gambar 4-3). Pengujian ukuran rata-rata secara tepat bisa dilakukan dengan *Particle Size Analyzer* (PSA) yang mana di Indonesia tidak mudah mendapatkannya dan hanya bisa dengan pengayakan.



Gambar 4-3: Kurva Distribusi Relatif ukuran AP (kiri) dan kurva distribusi relatif "Kurang dari" (kanan)

Coating AP hasil *penggrindingan* belum dianggap begitu penting dan belum dilakukan penelitian pengaruh *coating* terhadap sifat-sifat propelan. Oleh karena itu diasumsikan tidak berpengaruh. Hal ini didasarkan pada fakta bahwa distribusi AP *ready use* (siap pakai) mirip dengan AP hasil *penggrindingan* dan sama-sama berdistribusi normal. Lihat gambar hasil pengujian AP kasar (280-450 μ), AP sedang (180-280 μ) dan AP halus (105-154 μ) *ready use*. Nampak pada gambar AP kasar dan sedang tidak jauh berbeda ukurannya (hampir sama luas permukaannya), dan AP halus berbentuk tidak bulat. Bisa saja AP halus dibuat dengan rekayasa AP kasar sehingga ukuran AP halus yang dihasilkan berdistribusi tidak normal. AP-70 Hanwa juga bisa dikatakan tidak normal distribusinya karena kurva ogive (distribusi relatif) berbentuk linier, bukan seperti separoh lonceng.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan reaksi stoikiometri pembakaran propelan, maka diperoleh komposisi dasar propelan AP= 68%, HTPB= 31%, Al= 1%. Karena energi yang dihasilkan pembakaran Al *powder* jauh lebih besar, maka agar kinerja propelan maksimum diupayakan dengan menaikkan kandungan Al *powder* dengan mengurangi kandungan binder hingga sekitar 10-15%. Dari perhitungan ternyata Jika AP kasar berukuran 200 μ m, maka AP halus berukuran 41,42 x ukuran AP kasar = 83 μ m. Perbandingan AP kasar/AP halus= 2/3. Ukuran AP 200 berada pada rentang 212-150 μ , sedang AP 70 berada pada rentang 106-75 μ . AP 200 banyak tersedia di pasar dan AP 70 (di bawah 100 μ) sulit diperoleh sehingga dimungkinkan HLP menggunakan AP 200 secara *ready use*, dan AP 70 diperoleh dari rekayasa AP ukuran besar. Ini terlihat dari distribusi AP 200 normal, dan distribusi AP 70

tidak normal. Meskipun AP kasar (200 μ . 26-46%) dan AP halus (70 μ , 23-43%) memiliki rentang kandungan dalam propelan, namun nilai tersebut harus dipilih sedemikian sehingga total kandungan AP kasar dan AP halus adalah 68%. Bisa juga kandungan AP diambil pada nilai titik tengah masing-masing rentang (AP 200 μ 36%, dan AP 70 μ 33%), tetapi dari perhitungan berdasar struktur kristal BCC, AP kasar (26%) dan AP halus (42%). Dalam percobaan, variasi kandungan diawali dengan AP kasar minimum (26%) dan AP halus maksimum 42%.

DAFTAR RUJUKAN

- Hartaya, Kendra., Retno A, Luthfia H A., 2014. *Hasil Penelitian dan Pemikiran Ilmiah tentang Teknologi Pesawat Terbang Tanpa Awak, Roket, serta Satelit, Evaluasi Adopsi Teknologi Propelan Formula Hanwha Dalam Rangka Menaikkan Impuls Spesifik Propelan Padat*, Jakarta.
- Hinkelman, Matthew C., dan Stephen D Heister, 2011. *Evaluation of Solid Composite Propellants Using a Dicyclopentadiene Binder*, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego.
- HLP, 2012. *Technology Transfer Report, Propellant and Liner Initial Formulation*.
- Kishore, K., & K Sridhara, 1999. *Solid Propellant Chemistry*, Ministry of Defense, New Delhi.
- Kitinirunkul, Thirapat., Nattawat Winya, Komson Prapunkarn, *Affecting Factors of the Mechanical Properties to Phenolic/Fiber Composite*, International Journal of Chemical, Materials Science and Engineering Vol:7 No:10, 2013.
- Krause, Horst H., *New Energetic material*.

- Lempert, David., Geli Nechi porenko, George Manelis, Energetic Performances of Solid Composite Propellant, Central European Journal of Energetic Materials, 8(1), hal 25-38.
- Martin, et al, 2003. *Variable Burn Rate Propellant*, US Patent No. 6, 503. 350 B2.
- Moore, Sthepen scot., 2010. *Ballistics Modeling of Combustion Heat Loss Through Chambers and Nozzle of Solid Rocket Motors (Thesis)*, Sacramento.
- Nair, UR., S.N. Asthana, A. Subhananda Rao, and B.R. Gandhe, 2010. *Advances in High Energy Materials*, Defense Science Journal Vol 60 No 2 March 2010, pp 137-151.
- Ramesh, Kurva., dan Shekhar N Jawalkar, Swati Sachdeva, Mehilal, Bikash Bhattacharya, 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), hal 49-58.
- Timnat, Y.M., 1987. *Advanced Chemical Rocket Propulsion*, Academic press Ltd, London, hal 24.
- Turker, Lemi., 2013. *A Treatise on Impulse Values of Pure Explosives*, J Theor Comput Sci 2013, 1:1, Ankara.
- Vlack, Robert van., 1992. *Materials Science and Engineering (terjemahan Sriati Japri)*, Erlangga.
- Williams, F.A; Barrere, M; Huang, N.C, 1989. *Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets*, Technivision Services Slough, England.

