

PENGARUH BENTUK DAN KEMURNIAN AL *POWDER* TIDAK BULAT TERHADAP KINERJA PROPELAN (THE EFFECTS OF UNSPHERICAL ALUMINUM POWDER SHAPE AND PURITY TO THE PROPELLANT PERFORMANCE)

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

ABSTRACT

The research using types of aluminium powder as a fuel of propellant is conducted. From the research is hoped to increase specific impulse. Types of aluminum powder used is obtained from institution in Indonesia, I.e., PT Dahana, (AlDhn) PT Pindad (AlPct, AlPn) and Lapan (AlLpn). The Research of selection types Aluminium powder purposed to substitute Aluminum powder used Lapan in developing propellant. The selection of types Aluminium powder is by considering shape, size, and purities. To know shape and size we test with SEM (Scanning Electron Microscopy), while to know purities we test with AAS (Atomic Absorption Spectroscopy). The both test is conducted in UGM. In order Specific impulse can increase so, we select Al that can result in a minimum porosity propellant and maximum loading. For the purposes, we select an Al powder, small size, spherical shape, and high purities. From testing with AAS, Al Lapan has purities 89.6% below highest purities AlPnc 91.7%. By testing with SEM, four types Al is not spherical shapes and has differ magnitude, but Al Lapan is relative more spherical shape than others and has small size. So among of no-spherical shape, Al Lapan is still best for propellant. Propellant with Al Lapan results in Isp 170-179 seconds (range 8.75 seconds or 5% from Isp median). The 5% from Isp median is smallest than propellant with AlPct (19%) and AlPnc (17.4%). Propellant with AlDhn has 6.7% from Isp median, but it has Isp 155-165 seconds, lower than propellant with Al Lapan.

Keywords: *Propellant, Aluminium powder, Isp, Purities, Shape*

ABSTRAK

Telah dilakukan pemilihan jenis aluminium *powder* yang tersedia di dalam negeri sebagai sumber energi termal dalam propelan. Pemilihan dilakukan dengan harapan bisa menggantikan Al *powder* yang selama ini digunakan Lapan dalam pengembangan propelan. Pemakaian Al *powder* jenis lain diharapkan bisa menaikkan impuls spesifik propelan Lapan. Pemilihan jenis Al dilakukan dengan mempertimbangkan kemurnian, bentuk dan ukuran. Untuk mengetahui kemurnian dilakukan uji dengan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) yang ada di Lab Kimia Analitik UGM. Sedangkan untuk mengetahui bentuk dan ukuran Al dilakukan uji dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang ada di Lembaga Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) UGM. Agar Isp propelan bisa meningkat, maka Al dipilih sedemikian rupa sehingga kekeroposan propelan sekecil mungkin dan muatan kedalam propelan sebanyak mungkin. Untuk itu diinginkan Al yang berbentuk bulat dan ukuran kecil dan kemurniannya tinggi. Dari 4 sampel yaitu AlLpn, AlDhn, AlPnc, AlPct, maka AlLpn memiliki kemurnian 89,6% sedikit di bawah AlPnc yang tertinggi 91,7% dan AlLpn memiliki bentuk relatif bulat dibanding yang lain dan memiliki ukuran paling kecil. Keempat sampel Al *powder* menunjukkan bentuk tidak bulat. Oleh sebab itu disimpulkan bahwa AlLpn (Aluminium yang digunakan Lapan selama ini) adalah

relatif paling baik. Aplikasi dalam propelan dengan komposisi yang sama menunjukkan bahwa Isp propelan dengan Al_LPn menghasilkan Isp 170-179 detik. Isp ini memiliki rentang 8,75 detik atau 4,5 detik (5%) disekitar nilai tengah (rata-rata). Toleransi 5% dalam nilai Isp ini adalah yang paling kecil dibanding Isp propelan dengan aplikasi ke-3 jenis Aluminium lainnya.

Kata kunci : *Propelan, Aluminium powder, Isp, Kemurnian, Bentuk*

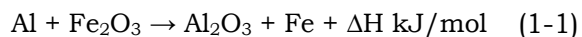
1 PENDAHULUAN

Propelan sebagai bahan bakar roket tersusun dari *Fuel* (sumber energi termal) bubuk Aluminium, polimer HTPB, pematang TDI, dan oksidator ammonium perklorat. Proses pembuatan propelan dilakukan dengan pencampuran komponen-komponen ini. Semua bahan untuk penyusun propelan diperoleh secara impor. HTPB dan TDI dalam pencampurannya akan membentuk poliuretan. Poliuretan adalah polimer organik yang tersusun atas karbon, oksigen, hydrogen, nitrogen. Propelan saat terbakar akan menghasilkan gas sederhana dengan berat molekul rendah jika ketersediaan oksigen dari oksidator cukup. Aluminium *powder* dalam pembakaran akan menghasilkan alumina dan melepaskan energi yang menyumbang kenaikan suhu ruang bakar. Rendahnya berat molekul gas hasil pembakaran propelan dan tingginya suhu ruang bakar akan menghasilkan Isp propelan yang tinggi. Isp adalah ukuran kualitas propelan yang terpenting. Propelan yang baik memiliki harga Isp yang tinggi.

Dengan memasukkan oksidator lebih banyak kedalam campuran propelan akan meningkatkan Isp propelan karena oksidator akan menyumbang kebutuhan oksigen bagi pembakaran Al dan pembakaran binder (HTPB-TDI). Penambahan *solid content* (AP dan Al *powder*) terkendala viskositas campuran dengan perbandingan HTPB-TDI tertentu. Agar oksidator dan aluminium bisa ditambahkan lebih banyak, maka perlu menggunakan HTPB dengan berat molekul lebih rendah daripada yang digunakan selama ini. Dengan HTPB BM

lebih rendah daripada yang digunakan Lapan selama ini, maka pada perbandingan HTPB-TDI yang sama akan menghasilkan viskositas lebih rendah sehingga memungkinkan penambahan AP dan Al *powder* lebih banyak lagi.

Penambahan unsur lain biasanya merujuk pada kebutuhan oksigen bagi Al, sehingga oksigen dari oksidator untuk pembakaran Al akan berkurang. Biasanya zat-zat yang ditambahkan berupa oksida logam seperti Besi (III) oksida, Fe₂O₃. Dalam reaksi kedua bahan ini, Feri oksida ini akan memberikan oksigen dalam reaksi dengan Al *powder* sebagaimana bisa dilihat dalam reaksi di bawah ini.



Reaksi ini mudah berlangsung karena baik oksidasi Al maupun reduksi Fe₂O₃ akan menghasilkan energi secara spontan karena memiliki energi seperti terlihat dalam tabel potensial reduksi standar (seperti terlampir). Selain maksimalisasi penambahan oksidator, juga dilakukan optimalisasi penambahan Al *powder*. Untuk kepentingan ini dipilih Al *powder* yang memiliki bentuk bulat dan berukuran kecil.

Makalah ini akan membahas pengaruh bentuk dan kemurnian Aluminium *powder* tidak bulat terhadap kinerja propelan. Al *powder* sesungguhnya berfungsi sebagai *fuel*. Selama ini penggunaannya dalam jumlah sedikit (<15%) sehingga dikatakan sebagai aditif saja. Aluminium *powder* yang digunakan diperoleh dari institusi yang ada di dalam negeri dan jenis yang digunakan

ditentukan berdasar kemurnian, bentuk, dan ukuran. Al *powder* yang diharapkan bisa menaikkan kinerja (Isp) propelan adalah yang berbentuk bulat, kemurnian tinggi, dan ukuran sekecil mungkin. Pengamatan bentuk dan ukuran dilakukan dengan pemeriksaan dengan SEM, sedangkan pengujian kemurnian dilakukan dengan AAS. Kedua pengujian ini dilakukan di UGM. Untuk menentukan bentuk, ukuran dan kemurnian aluminium yang digunakan dalam propelan dilakukan pembahasan terhadap hasil pengujian.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Propelan

Pada umumnya propelan komposit mengandung kira-kira 15% resin polimer HTPB, 80% padatan Ap dan sisanya aditif termasuk aluminium 5%. Banyaknya bahan ini bisa bervariasi menurut keinginan aplikasi. Banyaknya plasitizer bisa mencapai 60% dari total aditif. [Libard et al, 2009i]. Propelan komposit dengan komposisi ini bisa digunakan dalam bidang militer dan kendaraan wahana antariksa. Propelan ini banyak memiliki keunggulan (Isp 250-260 detik) dibanding propelan konvensional *double base* NC-NG (Isp 220-230 detik). Jain menyebut bahwa HTPB yang digunakan memiliki berat molekul mencapai 2500-2800, angka hidroksil (fungsionalitas) 2,4-2,2 viskositas 65 P pada suhu 65° C. [Jain]. Keunggulan lainnya dari propelan komposit ini adalah suhu transisi glas HTPB yang rendah terutama berkaitan dengan aplikasi suhu mendekati nol/subzero [Nair, 2010]. Propelan komposit ini juga memiliki sifat mekanis yang cukup baik dan memiliki kinerja tinggi. Pembuatan propelan dilakukan dengan mencampur bahan padat kedalam bahan cair lalu dicetak pada suhu yang diinginkan (*elevated*) untuk menghasilkan propelan padat yang elastis. Viskositas sebelum dicetak diusahakan cukup

rendah agar bisa dibentuk, dan *pot-life* lama agar homogen. [Wtingborg].

Aluminium *powder* adalah *fuel* yang efektif. Kalor massanya lebih besar dua kali kalor massa magnesium bahkan sedikit di bawah Boron dan Berilium. Selain itu berilium dan produk pembakarannya beracun, sementara boron adalah material penahan panas yang oksida *viscous*-nya menghambat oksidator dalam ruang bakar. Jadi aluminium adalah *fuel* paling tepat dalam bentuk logam sebagai komponen dalam propelan. Meski demikian perlu menjaga kestabilan reaktifitas aluminium melalui salah satunya penyimpanan [Il'in, 2001].

2.2 Impuls Spesifik

Impuls spesifik Isp, adalah parameter untuk menunjukkan efisiensi energi dari pembakaran propelan, yang dapat dinyatakan sebagai [Kubota, 2002]

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}_g g} \quad (2-1)$$

Dengan g: percepatan gravitasi 9,8 m/s², satuan impuls spesifik adalah detik. Secara termodinamika, impuls spesifik adalah waktu efektif untuk membangkitkan gaya yang dapat menahan massa propelan terhadap gaya gravitasi akibat perubahan energi. Dari persamaan

$$\dot{m} = p_0 A \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_0} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left\{ 1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-2)$$

Dan

$$F = A_t p_c \left[\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left\{ 1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} + (p_e - p_a) A_e \quad (2-3)$$

Maka Isp dapat ditulis sebagai

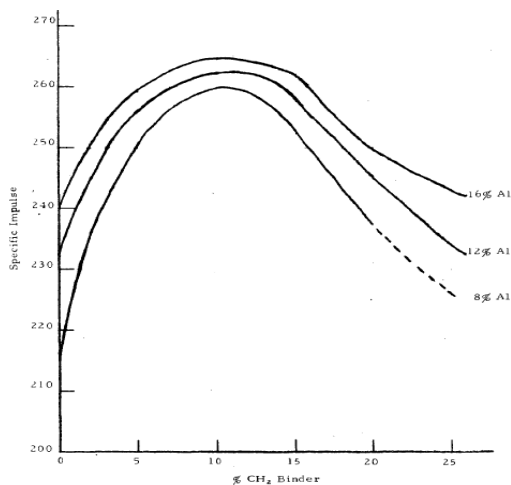
$$I_{sp} = \frac{1}{g} \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R}{M_g} T_c \left\{ 1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{g} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{RT_c}{M_g}} \left(\frac{p_e - p_a}{p_c} \right) \frac{A_e}{A_t} - \sqrt{\frac{T_g}{M_g}} \quad (2-4)$$

Dengan Po tekanan udara luar, Pc tekanan ruang akar, At luasan leher nosel, Tg suhu ruang bakar, Mg berat molekul hasil pembakaran. Walaupun I_{sp,max}, juga sebagai fungsi rasio panas

spesifik dari produk pembakaran γ , γ relatif tidak berubah sepanjang propelan. Ini bukti bahwa $I_{sp} = \sqrt{T_g/M_g}$ bahwa material energetik yang menghasilkan produk pembakaran dengan T_g tinggi dan M_g tinggi tidak selalu merupakan propelan yang berguna. Propelan yang menghasilkan T_g rendah berguna jika M_g cukup rendah. I_{sp} maksimum dicapai saat $P_e = P_a$ [Kubota, 2002].

$$I_{sp,max} = \frac{1}{g} \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R}{M_g} T_g \left\{ 1 - \left(\frac{P_a}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-5)$$

Dalam Libardi, Al sebagai aditif hanya 5%, sedangkan dalam Cohen untuk mencapai I_{sp} maksimum Al bisa lebih besar yaitu 16% yang disajikan pada Gambar 2-1 [Cohen], bahkan nilai ini masih merupakan nilai minimal menurut Hunley yaitu 16-20% [Hunley]. Tingginya Al dapat menaikkan I_{sp} adalah logis karena Al dalam pembakaran akan teroksidasi menghasilkan alumina dengan membebaskan energi. Tambahan energi ini yang akan menaikkan suhu gas hasil pembakaran sehingga menaikkan I_{sp} . Jika dengan naiknya kadar Al bisa menurunkan I_{sp} , maka ini bisa dijelaskan karena kebutuhan oksigen untuk pembakaran binder berkurang. Berkurangnya oksigen untuk pembakaran binder akan menghasilkan produk pembakaran yang tidak sempurna sehingga gas-gas yang dihasilkan memiliki berat molekul tinggi sehingga I_{sp} akan rendah.



Gambar 2-1: I_{sp} vs kadar Al

Impuls spesifik (I_{sp}) juga didefinisikan sebagai impuls (gaya dorong x waktu) per satuan berat propelan. Persamaan yang menghubungkan I_{sp} dengan parameter kimia diuraikan sebagai berikut:

$$I_{sp} = F \cdot t / W \quad (2-6)$$

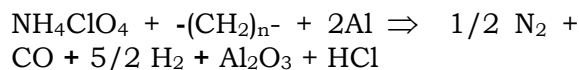
$$I_{sp} \propto \Delta H^{1/2} \quad (2-7)$$

$$I_{sp} \propto (T_c / M_c)^{1/2} \quad (2-8)$$

Dengan t : waktu pembakaran, F ; Gaya dorong, W : berat propelan, ΔH : panas pembakara per satuan berat, T : suhu ruang bakar, M : berat molekul rata-rata produk pembakaran. Nilai I_{sp} akan tinggi jika panas pembakaran tinggi dan berat molekul gas rendah. Karena panas pembakaran tergantung pada panas pembentukan penyusun propelan (*fuel* dan oksidator), maka panas pembentukan penyusun harus tinggi. Maka *fuel* dan oksidator yang memiliki panas pembentukan positif atau negatif rendah sangat disukai [Jain].

2.3 Reaksi Pembakaran Propelan

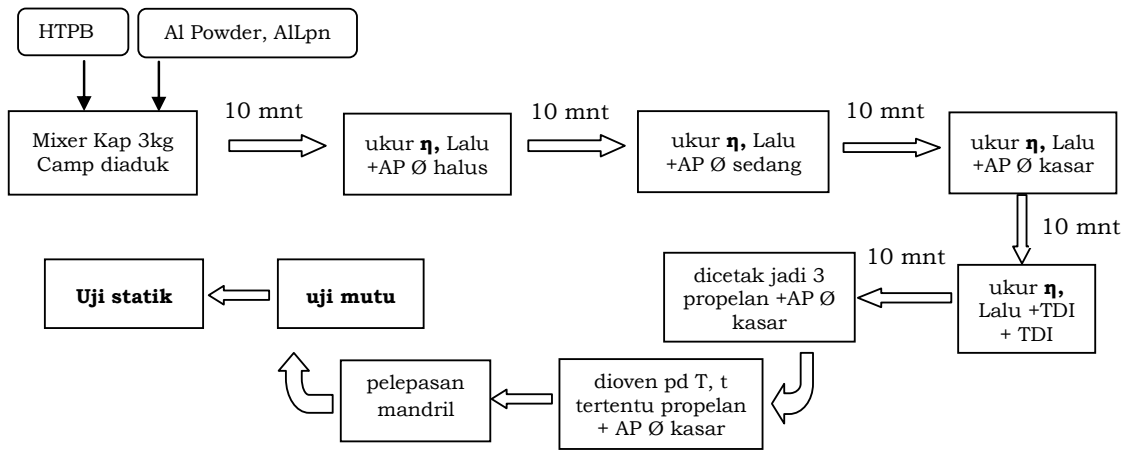
Reaksi pembakaran propelan disajikan sebagai berikut [Muray, 2009]



Pembentukan gas hydrogen sebagai produk pembakaran sangat diinginkan karena akan menjadikan berat molekul gas rendah sehingga menaikkan I_{sp} .

3 METODOLOGI

Propelan ukuran K-round dengan Al powder ALLPn dibuat. Untuk mendapatkan propelan dengan variasi jenis Al powder lainnya, dilakukan pembuatan propelan (ulangan) dengan jenis Al powder AlDhn, AlPnc, AlPct pada prosentase kandungan Al powder yang sama. Sebelum dilakukan pencampuran bahan-baku diawali dengan pengujian terhadap bahan baku untuk mengetahui



Gambar 3-1: Diagram alir pembuatan propelan Lapan dengan Al Powder ALLpn

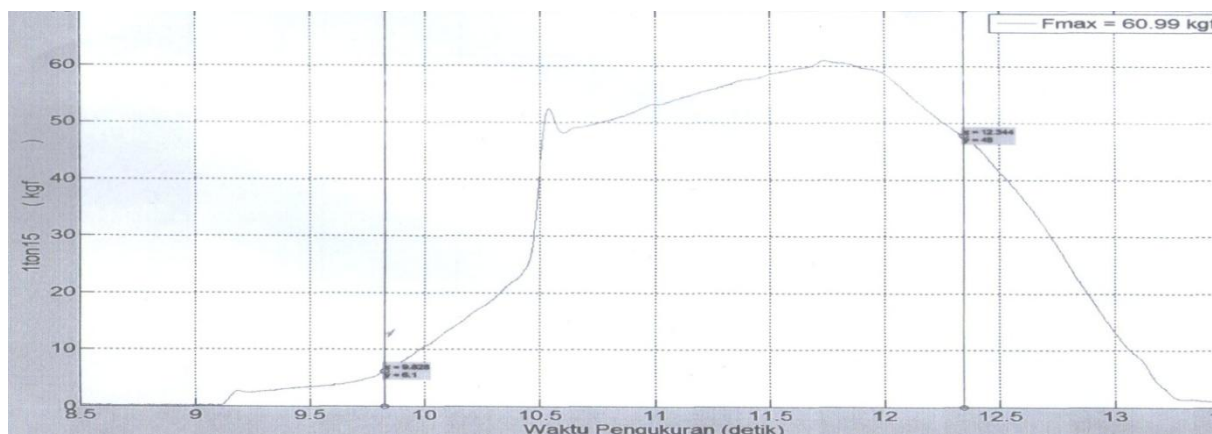
spesifikasi terhadap bahan baku yang digunakan menggunakan AAS (kemurnian) dan SEM (bentuk dan ukuran). Pada pembuatan propelan semua bahan baku dicampur dengan urutan yang sudah tetap dan satu per satu, tidak serentak. Mula-mula kedalam *mixer* horisontal kapasitas 3 kg dimasukkan HTPB dan Al powder sambil *mixer* dihidupkan. Setelah waktu tertentu, kemudian ditambahkan AP halus (ukuran paling kecil) dan seterusnya. Sebelum penambahan bahan berikutnya dilakukan pengukuran viskositas dan setelah penambahan bahan selalu dilakukan pengadukan selama 10 menit. Setelah selesai pencampuran dilakukan pencetakan. Setelah pencetakan lalu dipanaskan dalam *oven* dilakukan pada suhu dan waktu tertentu. Posisi propelan dalam *oven* berdiri dalam keadaan propelan belum dilepas dari cetakan. Uji statik untuk mendapatkan nilai Isp dan uji mutu untuk mengetahui kekeroposan dan laju bakar. Untuk mengetahui pengaruh jenis Al powder dibuat propelan 4 *batch* masing masing menggunakan jenis Al powder yang berbeda dengan kandungan sama dalam propelan. Evaluasi kinerja dilakukan dengan membandingkan nilai Isp masing-masing propelan terkait dengan bentuk, jenis, ukuran, dan kemurnian Al powder. Bentuk, ukuran, dan kemurnian merupakan karakteristik yang melekat pada jenis Al powder sehingga variabel ini tidak bisa dimanipulasi. Variabel

yang dimanipulasi adalah jenis Al powder. Diagram alir pembuatan propelan disajikan pada Gambar 3-1.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Percobaan

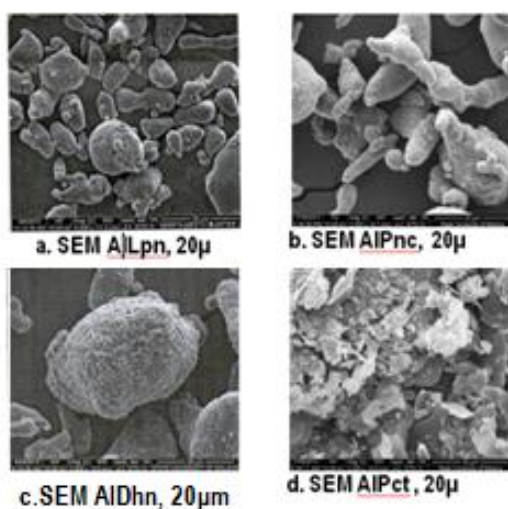
Pada Tabel 4-1 disajikan Isp propelan sebagai fungsi kemurnian Aluminium. Komposisi propelan 15% binder, Al 12%, oksidator 73%. Oksidator digunakan dalam trimodal dengan perbandingan ukuran kasar-Sedang-Halus adalah 1:1:1 dengan ukuran 150-250 μ (kasar), 125-150 μ (sedang), 63-125 μ (halus). Propelan diuji dalam dimensi K-round *hollow*. Gambar 4-1 menyajikan silinder propelan setelah dilepas dari cetakan, proses *assembling*, propelan dalam motor roket siap uji statik, serta grafik hasil uji statik. Gambar 4-2 menyajikan bentuk Kristal aluminium powder yang diamati dengan SEM. Gambar 4-2 ini memperlihatkan bentuk dan ukuran dari berbagai jenis aluminium yang digunakan sebagai aditif propelan. Keempat jenis aluminium ini tersedia di Indonesia. Terlihat bahwa keempat sampel ini berbentuk bukan bulat dan memiliki distribusi ukuran yang berlainan. Di dalam satu jenis saja berbagai jenis ukuran sangat beragam. Secara visual keempat jenis ini bisa diamati untuk memilih jenis mana yang paling baik yang diharapkan akan menaikkan impuls spesifik propelan.



Gambar 4-1: Propelan, proses *assembling*, propelan dalam motor siap uji statik, kurva hasil uji statik

Tabel 4-1: Isp PROPELAN, DAN KEMURNIAN Al HASIL Uji AAS

No.	Sampel	Kemurnian Al, %	Isp, detik
1.	AlLpn	89,6	179,5881, 170,8406
2.	AlPnc	91,7	192,2838 161,5489
3.	AlDhn	85	155,0650 165,1786
4.	AlPct	59,5	156,9623 189,8533



Gambar 4-2: SEM Aluminium powder berbagai jenis

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengaruh bentuk dan ukuran Al terhadap Isp

Gambar 4-2a merupakan Al yang selama ini digunakan Lapan sedang 4-2b, 4-2c, 4-2d merupakan Al yang diperoleh dari institusi di luar Lapan. Gambar SEM ini ditampilkan dalam ukuran yang sama (ukuran 20 μ m) sehingga secara visual mudah untuk dibandingkan satu sama lain. Pengujian SEM terhadap Aluminium *powder* ini dilakukan di Lembaga Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT UGM).

Dengan melihat hasil uji SEM nampak bahwa ke-4 jenis Aluminium bentuknya tidak bulat dan tidak bisa dipastikan dimensi dan ukurannya sehingga sulit untuk membandingkan pengaruh ukuran terhadap Impuls spesifik. Namun secara umum pada skala yang sama yaitu 20 mikron, nampak bahwa Gambar 4-2a lebih didominasi oleh ukuran kecil dan bentuk bulat terlihat lebih banyak. Oleh sebab itu penting untuk melihat bentuk ini dalam mempertimbangkan Isp propelan yang dihasilkan.

Bentuk-bentuk kecil juga lebih banyak terlihat pada Gambar 4-2d, bahkan nampak seperti bentuk lembaran. Lembaran-lembaran dan partikel kecil pada Gambar 4-2d bisa saja merupakan pelapisnya (bahan yang digunakan sebagai pelapis). Umumnya bahan pelapis adalah bahan organik sehingga dalam sampel Al *powder* (Gambar 4-2d) didominasi bahan pelapis. Akibatnya kemurnian A *powder* ini sangat rendah, 59,9%.

Sebagai penegasan dari uraian ini terhadap Gambar 4-2 dan Tabel 4-1, secara visual Gambar 4-2a (ALLPn) menunjukkan bentuk yang paling kecil dibanding Gambar 4-2b, 4-2c. 4-2d, sehingga dilihat dari bentuknya propelan dengan Al ini akan menghasilkan Isp paling tinggi dibanding dengan Al *powder* gambar 4-2b, 4-2c, 4-2d. Sampel ALPnc (4-2b) memiliki kemurnian sedikit

lebih tinggi daripada ALLPn namun Isp propelan dengan ALLPn (4-2a) tetap menjadi harapan lebih tinggi daripada Isp propelan dengan ALPnc (4-2a) karena bentuk ALLPn nampak lebih kecil dan lebih seragam dibanding ALPnc. Alasan ini juga didukung karena selisih kemurnian ALLPn dan ALPnc sedikit yaitu 2,1% (ALLPn 89,6% dan ALPnc 91,7%).

4.2.2 Rentang dan toleransi nilai Isp

Sebelum membahas Isp, penting untuk memperhatikan Tabel 4-2 menyajikan komposisi dan Isp. Data dalam Tabel 4-2 ini merupakan hasil penelitian yang diambil dari sebuah rujukan. Yang penting untuk diperhatikan dalam tabel komposisi dan Isp di bawah ini adalah bahwa pada setiap komposisi, Isp yang dihasilkan memiliki rentang kecil (batas atas - batas bawah) maksimum 10 detik dan minimal 3 detik. Dengan kata lain toleransinya terhadap data tengah (median) adalah 1,5-5 detik (2% sampai 3%). Dari tabel ini memberikan inspirasi kepada kita bahwa jika dalam satu kali proses yang dilakukan menghasilkan dua atau tiga silinder propelan (sebagaimana dilakukan di Lab komposisi), semua silinder propelan ini akan menghasilkan Isp yang sama atau berdekatan (maksimum selisih 5 detik) sebagaimana data Tabel 4-2 ini. Jika ternyata selisih Isp terlalu jauh dari beberapa pengujian, maka kemungkinan disebabkan campuran yang tidak homogen atau validitas instrumen yang perlu diperbaiki.

4.2.3 Pengaruh kemurnian Al terhadap Isp

Pengujian kemurnian Al dilakukan dengan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS Lab Kimia Analit UGM). Hasil pengujian dilakukan pada Tabel 4-1 di atas. Nampak bahwa Al *powder* ALPct Gambar 4-1d memiliki kemurnian paling rendah sebesar 59,5%, dan yang paling tinggi ALPnc Gambar 4-1b sebesar

91,7%. Sampel ALLpn Gambar 4-1a memiliki kemurnian 89,6% sedikit lebih rendah daripada Gambar 3b, namun masih lebih besar daripada AlDhn pada Gambar 4-1c. Namun sampel ALLpn Gambar 4-1a dikatakan paling penting atas dasar bentuk dan ukurannya dari keempat sampel Al powder dan dari segi kemurnian ALLpn memiliki kemurnian relatif tinggi, lebih sedikit di bawah AlPnc.

Dari hasil pengujian Propelan yang disajikan pada Tabel 4-1, bisa dihitung nilai tengah (rata-rata) Isp, toleransi, dan rentang, yang hasilnya disajikan pada Tabel 4-3. Pentingnya nilai rentang kecil agar diperoleh

toleransi yang kecil. Karena dua buah propelan yang diuji statik adalah hasil dari satu kali proses (Batch yang sama). Jika campuran dalam satu proses adalah homogen maka sudah selayaknya Isp kedua propelan tidak jauh berbeda. Sebuah kenaikan Isp 10 detik akan sangat bermakna jika toleransinya kecil (<3% sebagaimana Tabel 4-2). Tidak mudah menaikkan Isp 10 detik dengan rentang kedua pengujian yang selalu berubah-ubah besarnya dan tidak ajek. Komposisi propelan yang dibuat sudah sesuai dengan komposisi teoritis yang harus menghasilkan Isp maksimum 265 detik.

Tabel 4-2: Isp BERBAGAI JENIS PROPELAN

No.	Jenis propelan	Isp, detik	No.	Jenis propelan	Isp, detik
1.	DB	220-230	7	PBAN/AP/Al	260-263
2.	DB/AP/Al	260-265	8	CTPB/AP/Al	260-265
3.	DB/AP-HMX/Al	265-270	9	HTPB/AP/Al	260-265
4.	PVC/AP/Al	260-265	10	PBAA/AP/Al	260-265
5.	PS/AP/Al	240-250	11	AN/Polimer	180-190
6.	PU/AP/Al	260-265			

Keterangan: DB, Double Base, AP: AmoniumPerklorat, Al: Aluminium, HMX: High Melting Explosive, PS: Polystyrene, PU: PoliUretan, PVC: PoyVynil Chloride, PBAN: Polybutadien Akrilonitril, CTPB: Carboxyl Terminated Polybutadien, AN: Akrilonitril, PBAA: Polybutadiene Acrylic Acid

Tabel 4-3: Isp PROPELAN DENGAN BERBAGAI JENIS Al

No.	Sampel	Kemurnian Al, %	Isp, detik	Rentang	Toleransi	Median Isp, detik
1.	ALLpn	89,6	179,5881 170,8406	8,75	5%	175,21
2.	AlPnc	91,7	192,2838 161,5489	30,73	17,4%	176,92
3.	AlDhn	85	155,0650 165,8692	10,8	6,7%	160,47
4.	AlPct	59,5	156,9623 189,8533	32,9	19%	173,41

Keterangan: Toleransi adalah besarnya penyimpangan terhadap nilai tengah Isp

Pentingnya untuk melakukan kalibrasi terhadap instrumen pengujian. Kalibrasi bisa meliputi kalibrasi internal atau eksternal dan meliputi validitas dan reliabilitas. Dari dua silinder propelan pada komposisi yang sama sudah selayaknya menghasilkan Isp yang sama atau mirip, dengan selisih kecil, ini yang dimaksudkan validitas. Besarnya selisih Isp dari dua silinder propelan pada komposisi yang sama seharusnya senantiasa ajeg, kapanpun propelan itu dibuat dan diuji, ini yang dinamakan reliabilitas. Reliabilitas eksternal bisa dihitung dari data Isp hasil uji. Secara tegas bisa dinyatakan bahwa instrumen yang baik adalah yang akan menghasilkan data yang sama (selisih sedikit) pada komposisi yang sama. Kalau ternyata berbeda sedikit, maka perbedaan ini harus ajeg pada setiap pengujian pada komposisi yang sama. Toleransi yang paling kecil dari 4 data Isp dalam Tabel 4-3 adalah propelan dengan ALLpn (Al Lapan) dan AlDhn, sedang dua data lainnya toleransinya jauh lebih besar.

Propelan AlDhn dan ALLpn penting untuk dibandingkan sehingga ulasan pembahasan mengarah pada kesimpulan. Perbandingan ini penting karena keduanya memiliki nilai Isp yang berdekatan. Nilai Isp pada propelan AlDhn wajar lebih rendah daripada ALLpn karena selain kemurnian AlDhn lebih rendah, AlDhn memiliki ukuran lebih besar dari pada ALLpn. Artinya bahwa makin kecil ukuran Al akan meningkatkan nilai Isp (Gambar 4-4a dan 4-4c). Propelan ALPnc memiliki kemurnian paling tinggi dan Isp sedikit lebih tinggi daripada propelan ALLpn. Namun Isp propelan dengan ALPnc ini toleransinya besar (>5%). Selain itu ALPnc memiliki bentuk seperti batang/balok (tidak mendekati bulat). Karena tidak bulat dan bentuknya seperti balok maka pada pemakaian sebagai sumber energi termal dikhawatirkan akan menghasilkan propelan dengan kekeroposan

lebih tinggi dan penyebaran keropos tidak merata. Ini terjadi karena kristal berbentuk balok dalam pencampuran sangat sulit bergerak menyebar dibanding bentuk bulat. Memang ada sedikit bentuk yang bulat dalam ALPnc, dan mendapatkan Al bulat dengan cara mengayak (*screening*) dari bentuk ALPnc sangatlah tidak mudah.

5 KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan dan pembahasan yang telah diuraikan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Ada 4 jenis Al *powder* tidak bulat yang bisa digunakan sebagai *fuel* propelan yaitu ALLpn (yang digunakan Lapan selama ini), AlDhn (diperoleh dari PT dahana), ALPnc dan ALPct (diperoleh dari PT Pindad)
- Dari Aluminium *powder* tidak bulat tersebut, Al Lapan memiliki kemurnian relatif tinggi dan propelan dengan Aluminium ini menghasilkan Isp 179,6-170,8 detik. Toleransi Isp ini kecil yaitu 4,4 detik (2,4%) di sekitar median Isp 184 detik
- Selain faktor kemurnian, Isp propelan diakibatkan suhu bakar tinggi. Ini karena muatan Al lebih banyak, dan ini hanya dengan dimensi kecil. Al Lapan dengan perbesaran sama nampak memiliki dimensi kecil (bentuk tidak bulat dan ukuran relatif kecil).
- Faktor bentuk juga membuat muatan Al dalam propelan lebih banyak. Al Lapan memiliki bentuk mendekati bulat sehingga akan bisa diharapkan lebih banyak masuk dalam propelan sebagai aditif.
- AlDhn serupa ALLpn berbentuk mendekati bulat namun dimensinya besar, kemurniannya lebih rendah, dan Isp lebih rendah, Isp 155,0-165,9 detik, rentang rendah 10,9 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Kepala Bidang Teknologi

Teknologi Propelan Dr. Heru Supriyatno dan Kepala Lab Komposisi, Ir. Siti Prangili yang telah mengijinkan fasilitas dan peralatan dalam pembuatan propelan K-round. Terimakasih juga kami sampaikan kepada Kepala Lab Uji kualitas, Ir. Dwi Setyaningsih dalam pengujian mekanik propelan. Terima kasih juga kepada Kepala Bidang Teknologi Motor Roket yang telah mengijinkan pengujian statik untuk mendapatkan data Isp propelan. Juga tak lupa kami sampaikan kepada Para Teknisi litkayasa dalam pembuatan propelan dan *assembling* propelan yang siap uji statik.

DAFTAR RUJUKAN

- Cohen, S Muray, 2009. *Advanced Binders For Solid Propellant - a Review* Hunley, J.D., History of Solid Propellant Rocketry.
- Il'in, A.P, A.A Gromov, G. V. Yablunovskii, 2001. *Reactivity of Aluminum Powders*, Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 37, No. 4, pp. 418-422.
- Jain, S.R., 2002. *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol 61, hal 899-911.
- Libardi, Juliano, Sergio P Ravagnani, Ana Marlene F Morais, Antonio Roque Cardoso, 2009. *Study of Plasticizer Diffusion in a Solid Rocket Motor'S Bondline* *Journal of Aerospace and Technology Management*, V. 1, n. 2, Jul. - Dec. 2009.
- Nair, U.R., S.N Asthana, A Subhananda Rao, B R. Gandhe, 2010. *Advances in High Energy Materials Defence Science Journal*, Vol. 60, No. 2, March 2010, pp. 137-151.
- Naminosuke Kubota, 2002. *Propellant and Explosive: Thermochemical Aspec of Combustion*, Wiley-VCH.
- Wingborg, Niklas, *Improving the Mechanical Properties of Composite Rocket Propellants*, Department of Fibre and Polymer Technology, Royal Institute of Technology.

Lampiran

Standard Reduction Potentials at 25°C*

Half-Reaction	E° (V)
$\text{Li}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}_{(\text{s})}$	-3.05
$\text{K}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightarrow \text{K}_{(\text{s})}$	-2.93
$\text{Ba}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ba}_{(\text{s})}$	-2.90
$\text{Sr}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Sr}_{(\text{s})}$	-2.89
$\text{Ca}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ca}_{(\text{s})}$	-2.87
$\text{Na}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}_{(\text{s})}$	-2.71
$\text{Mg}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Mg}_{(\text{s})}$	-2.37
$\text{Be}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Be}_{(\text{s})}$	-1.85
$\text{Al}^{3+}_{(\text{aq})} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Al}_{(\text{s})}$	-1.66
$\text{Mn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}_{(\text{s})}$	-1.18
$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})} + 2 \text{OH}^-_{(\text{aq})}$	-0.83
$\text{Zn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Zn}_{(\text{s})}$	-0.76
$\text{Cr}^{3+}_{(\text{aq})} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Cr}_{(\text{s})}$	-0.74
$\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}_{(\text{s})}$	-0.44
$\text{Cd}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cd}_{(\text{s})}$	-0.40
$\text{PbSO}_{4(\text{s})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pb}_{(\text{s})} + \text{SO}_{4^{2-}}_{(\text{aq})}$	-0.31
$\text{Co}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Co}_{(\text{s})}$	-0.28
$\text{Ni}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ni}_{(\text{s})}$	-0.25
$\text{Sn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Sn}_{(\text{s})}$	-0.14
$\text{Pb}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pb}_{(\text{s})}$	-0.13
$2 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})}$	0.00
$\text{Sn}^{4+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}_{(\text{aq})}$	+0.13
$\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+_{(\text{aq})}$	+0.13
$\text{SO}_{4^{2-}}_{(\text{aq})} + 4 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{SO}_{2(\text{g})} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0.20
$\text{AgCl}_{(\text{s})} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}_{(\text{s})} + \text{Cl}^-_{(\text{aq})}$	+0.22
$\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}_{(\text{s})}$	+0.34
$\text{O}_{2(\text{g})} + 2 \text{H}_2 + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-_{(\text{aq})}$	+0.40
$\text{I}_{2(\text{s})} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{I}^-_{(\text{aq})}$	+0.53
$\text{MnO}_{4^-}_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_{2(\text{s})} + 4 \text{OH}^-_{(\text{aq})}$	+0.59
$\text{O}_{2(\text{g})} + 2 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{2(\text{aq})}$	+0.68
$\text{Fe}^{3+}_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})}$	+0.77
$\text{Ag}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}_{(\text{s})}$	+0.80
$\text{Hg}_{2^{2+}}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Hg}_{(\text{l})}$	+0.85
$2 \text{Hg}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_{2^{2+}}_{(\text{aq})}$	+0.92
$\text{NO}_{3^-}_{(\text{aq})} + 4 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_{(\text{g})} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0.96
$\text{Br}_{2(\text{l})} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Br}^-_{(\text{aq})}$	+1.07
$\text{O}_{2(\text{g})} + 4 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{MnO}_{2(\text{s})} + 4 \text{H}^+_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.23

$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14 \text{H}^+(\text{aq}) + 6 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7 \text{H}_2\text{O}$	+1.33
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$	+1.36
$\text{Au}^{3+}(\text{aq}) + 3 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Au}(\text{s})$	+1.50
$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8 \text{H}^+(\text{aq}) + 5 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 4 \text{H}_2\text{O}$	+1.51
$\text{Ce}^{4+}(\text{aq}) + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Ce}^{3+}(\text{aq})$	+1.61
$\text{PbO}_2(\text{s}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{PbSO}_4(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.70
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.77
$\text{Co}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{Co}^{2+}(\text{aq})$	+1.82
$\text{O}_3(\text{g}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	+2.07
$\text{F}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^- \text{-----} \rightarrow \text{F}^-(\text{aq})$	+2.87