

PENGARUH KOMPOSISI AP TERHADAP PROSESIBILITAS SLURRY PROPELAN DENGAN KANDUNGAN ALUMINIUM TINGGI (EFFECTS OF AMMONIUM PERCHLORATE COMPOSITION ON HIGH CONTENT ALUMINIUM PROPELLANT SLURRY)

Afni Restasari¹, Rika Suwana Budi, Kendra Hartaya
Pusat Teknologi Roket
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia
¹e-mail: afni.restasari@lapan.go.id

Diterima 8 Desember 2016; Direvisi 11 Desember 2017; Disetujui 12 Desember 2017

ABSTRACT

As propellant solid contents, Ammonium perchlorate (AP) affect the fluid characteristics of propellant slurry that are important in mixing and casting process to produce homogenous solid propellant. Therefore, this research aims to find out the effects of Ammonium perchlorate compositions (fine AP (AP_h) : coarse AP (AP_k)) on the slurry's fluid characteristics which are viscosity, pot life, and pseudoplasticity index. In this research, propellant A ($AP_h : AP_k$ 1:2), propellant B ($AP_h : AP_k$ 1:1), propellant C ($AP_h : AP_k$ 3:2), and propellant D ($AP_h : AP_k$ 2:1) were made. The methods include the measurement of viscosity by using Brookfield RVT viscometer spindle 07 at 0,3 rpm every 15 minutes. While, at 35th minute, the viscosity at 0,3; 0,5 and 0,6 rpm were measured. Based on the data of viscosity, graphs of \ln viscosity vs time as well as viscosity vs shear rate were made to determine the equations of viscosity build-up and Power Law. It is known that the initial viscosity of propellants are 11,493 – 52945 P. The lowest viscosity and pot life (13,12 minutes) are shown by propellant A. While, pseudoplasticity index of propellants are 0,655 – 0,991. The lowest point is shown by propellant D and the highest point is shown by propellant B. Based on this index, propellant A is not suitable to be casted in vacuum. On the other hand, propellant C is relatively suitable to be improved because its viscosity (17,506 P) and rate of increasing viscosity (247 P/minute) are not much different from propellant A. In addition, its pseudoplasticity index (0,972) is suitable for vacuum casting. The conclusion is that the correlation between $AP_h : AP_k$ and fluid characteristics of of propellant slurry (viscosity, pot life and pseudoplasticity are various because of packing factor of particles in propellant composition.

Keywords: *propellant slurry, pseudoplasticity, viscosity, pot life*

ABSTRAK

Sebagai padatan pengisi propelan, Ammonium perklorat (AP) dapat mempengaruhi sifat fluida dari *slurry* propelan yang penting dalam pencetakan untuk menghasilkan propelan yang homogen. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menemukan pengaruh komposisi AP (AP halus (AP_h): AP kasar (AP_k)) terhadap sifat fluida *slurry* yang meliputi viskositas, *pot life* dan indeks pseudoplastisitas. Dalam penelitian ini, dibuat *slurry* propelan A ($AP_h : AP_k$ 1:2), propelan B ($AP_h : AP_k$ 1:1), propelan C ($AP_h : AP_k$ 3:2) dan propelan D ($AP_h : AP_k$ 2:1). Metode yang digunakan meliputi pengukuran viskositas dengan viskometer Brookfield RVT *spindle* 07 pada 0,3 rpm setiap 15 menit. Sementara, di menit ke-35, viskositas pada 0,3; 0,5 dan 0,6 rpm diukur. Berdasarkan data tersebut, grafik \ln viskositas vs waktu serta viskositas vs *shear rate* dibuat untuk menentukan persamaan *viscosity build-up* dan *Power Law*. Diketahui, nilai viskositas awal propelan dalam jangkauan 11.493 – 52945 P, dengan viskositas terendah dan *pot life* (13,12 menit) dimiliki oleh propelan A. Sementara, nilai indeks pseudoplastisitas propelan yang jangkauan 0,655 – 0,991, nilai terendahnya ditunjukkan oleh propelan D dan tertingginya ditunjukkan oleh propelan B, yang mana propelan A diketahui tidak sesuai untuk pencetakan dengan teknik vakum. Pada sisi lain, propelan C relatif baik untuk dikembangkan karena memiliki viskositas (17.506 P) dan laju kenaikan viskositasnya (247 P/menit) yang tidak berbeda jauh dengan propelan A, serta indeks pseudoplastisitas (0,972) sesuai untuk pencetakan dengan vakum. Disimpulkan, hubungan antara rasio $AP_h : AP_k$ dengan sifat fluida propelan (viskositas, *pot life* dan pseudoplastisitas) beragam oleh karena faktor *packing* dari partikel – partikel penyusun propelan.

Kata kunci: *slurry propelan, pseudoplastisitas, viskositas, pot life*

1 PENDAHULUAN

Propelan padat komposit merupakan padatan bahan bakar roket yang dihasilkan dari pencetakan *slurry* (bubur) propelan. *Slurry* propelan komposit adalah suspensi koloid dari padatan, seperti Aluminium *powder* dan Ammonium perklorat (AP), dalam pengikat polimerik seperti poliuretan yang terbentuk dari *Hydroxy terminated polybutadiene* (HTPB) dan Toluena diisosiyanat (TDI) (Manu, 2009).

Propelan yang baik memiliki hubungan yang konsisten antara komposisi dan nilai spesifik impuls (Isp). Konsistensi ini tercapai apabila homogenitas propelan tercapai. Salah satu faktor yang dapat diusahakan dalam mencetak propelan yang homogen adalah prosesibilitas propelan yang ditentukan oleh pengisi padatan seperti Aluminium dan AP. Mengembangkan prosesibilitas propelan pada komposisi Aluminium yang optimum ialah penting untuk dilakukan karena selain diperoleh Isp yang tinggi, juga diperoleh propelan

yang homogen (Aziz, Mamat, Ali, & Perang, 2015).

Menurut Tuzun (2005), kandungan optimum aluminium pada propelan ialah 18%. Namun menurut Muthiah *et al*, (1992), konsentrasi tersebut di luar *range* kandungan aluminium yang menghasilkan prosesibilitas terbaik propelan (5 – 10%). Hal ini didukung oleh penelitian Kendra Hartaya (2016) yang menemukan bahwa energi pembakaran propelan turun dengan naiknya persentase aluminium dari 16% ke 18%, yang mana hal tersebut tidak sesuai dengan perhitungan teoritis dan diduga disebabkan oleh patahnya propelan akibat semburan/tekanan nyala propelan yang dapat disebabkan oleh proses pembuatan yang kurang baik (Hartaya, 2016). Prosesibilitas dapat dikembangkan dengan memvariasi AP (Tüzün, 2005). Parameter untuk prosesibilitas ini dapat berupa viskositas, *pot life*, dan pseudoplastisitas.

AP merupakan oksidator yang sering digunakan dalam pembuatan propelan padat komposit. Hal ini karena

kandungan oksigen dalam senyawa ini cukup tinggi yaitu mencapai 54% berat, tidak meninggalkan residu pada saat oksidasi terhadap bahan bakar, sifatnya stabil, dan laju bakar propelan dapat dikontrol dengan mengkombinasikan ukuran partikel AP. (Aziz et al. 2015; Price 1967 dalam Pinalia 2014; Andric 2007).

AP dapat mempengaruhi viskositas *slurry* propelan melalui ukuran dan bentuk. Diketahui, bentuk yang bulat (*spheric*) dapat menurunkan viskositas. Sementara dalam hal ukuran, penggunaan AP bimoda (AP kasar dan AP halus) telah dilakukan beberapa penelitian. Jain et al, (2009) dengan AP berukuran 300 μm dan 60 μm , menemukan bahwa semakin kecil ukuran AP, semakin tinggi viskositas *slurry* propelan. Hal ini juga ditemukan oleh Nair et al, (2013) yang menggunakan AP berukuran 340 μm dan 40 μm . Namun, menurut penelitian Ke-Xi et al, (1986) yang menggunakan ukuran 1000 μm untuk AP kasar, pengaruh persentase AP halus terhadap viskositas *slurry* propelan bervariasi tergantung ukuran partikel AP halus serta rasio AP kasar: AP halus (Jain, Nandagopal, Singh, Radhakrishnan, & Bhattacharya, 2009; Ke-xi, Ze-ming, & Guo-juan, 1986; Nair, Devi, Prasad, & Ninan, 2013). Berdasarkan itulah, maka viskositas *slurry* propelan dengan kandungan aluminium 18% dapat dikembangkan dengan variasi rasio AP kasar : AP halus.

Viskositas merupakan ukuran resistensi untuk mengalir. Viskositas propelan dapat dirumuskan seperti persamaan (1-1). Pada persamaan tersebut, μ adalah viskositas propelan, μ_0 adalah viskositas dari sistem isian cair yaitu HTPB dan TDI, ϕ adalah fraksi volume dari padatan pengisi dan ϕ_m merupakan fraksi volume maksimal dari padatan pengisi yaitu AP dan Aluminium. Untuk partikel bulat, nilai dari ϕ_m ini berhubungan dengan *tap density* partikel (German, 2016).

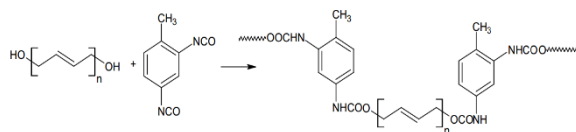
$$\mu = \mu_0 [1 - (\phi/\phi_m)] \quad (1-1)$$

Viskositas *slurry* propelan yang tinggi menyulitkan proses pencetakan propelan dan dapat menyebabkan *void* (bagian yang kosong) serta porositas yang dapat memicu masalah pada insulasi termal dan kegagalan struktural. Menurut Doll dan Lund (1999), viskositas *slurry* di bawah 20.000 P dapat memberikan performa yang tinggi (Doll & Lund, 1999; A. K. Mahanta, Dharmasakti, & Pattnayak, 2007; Remakanthan, Kk, Gunasekaran, Thomas, & Thomas, 2015). Sementara, menurut Dombe et al, (2008), viskositas *slurry* yang ideal untuk teknik pencetakan dengan vakum, seperti yang selama ini digunakan, adalah di bawah 16.000 P (Dombe, Jain, Singh, Radhakrishnan, & Bhattacharya, 2008).

Viskositas *slurry* berkaitan erat dengan *pot life slurry* propelan. Hal ini karena setelah *curing agent* ditambahkan, viskositas *slurry* propelan meningkat seiring berlangsungnya reaksi antara HTPB dan TDI membentuk poliuretan yang dijelaskan pada Gambar 1-1. Variasi viskositas selama proses pematangan (*curing*) dimodelkan oleh Tajima dan Crozier dengan persamaan *viscosity build-up* seperti pada persamaan (1-2) dan (1-3) yang mana η_t merupakan viskositas setelah waktu tertentu, η_0 ialah viskositas awal, k adalah konstanta *viscosity build-up* dan t adalah waktu (K, Monika, & D, 2010). Interval waktu yang tersedia hingga viskositas *slurry* mencapai batas tertentu, yang mana setelah batas tersebut *slurry* sulit dicetak, disebut *pot life* (Chai et al., 2016). Dalam hal ini, batas tersebut dapat sebesar 16.000 P seperti yang dilaporkan oleh Dombe et al, (2008).

Slurry propelan yang memiliki *pot life* lebih lama memberikan lebih banyak waktu untuk pencetakan yang mudah sehingga dihasilkan propelan yang homogen (Doll & Lund, 1999; A. K. Mahanta et al., 2007). Hal ini penting apabila ukuran propelan yang akan dicetak tersebut besar dan banyak. Menurut Sutrisno, waktu pencetakan propelan skala K-Round sekitar 15 menit (Sutrisno, 2010) dan dapat lebih lama

hingga sekitar 30 menit jika viskositas propelan tinggi.



Gambar 1-1: Reaksi Pembentukan Poliuretan (K *et al.*, 2010)

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot e^{-k \cdot t} \tag{1-2}$$

$$\ln \eta(t) = \ln \eta_0 + k \cdot t \tag{1-3}$$

Dalam hubungannya dengan *shear rate*, *slurry* propelan diketahui memiliki sifat pseudoplastis yaitu viskositas menurun dengan kian meningkatnya *shear*. Indeks pseudoplastisitas merupakan sifat fisik sejati dari *fluid* tersebut. Indeks ini merupakan parameter penting dalam pendistribusian partikel selama pengadukan dan pencetakan propelan. Indeks pseudoplastisitas dapat dihitung dengan persamaan (1-4), yang mana *K* adalah indeks viskositas, $\dot{\gamma}$ adalah *shear rate* dan *n* adalah indeks pseudoplastisitas (A. K., Mahanta *et al.*, 2007; Abhay K Mahanta, Goyal, & Pathak, 2010; Muthiah, Krishnamurthy, & Gupta, 1992).

$$\eta = K \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \tag{1-4}$$

Untuk sifat Newtonian dari *fluid*, nilai *n* sama dengan 1, yang berarti besarnya nilai viskositas tidak dipengaruhi oleh *shear rate*. Indeks yang mendekati 1 lebih dikehendaki karena mudah diproses. Sementara, diketahui bahwa *slurry* yang baik untuk teknik pencetakan dengan vakum dilaporkan memiliki nilai indeks pseudoplastisitas sebesar 0,8 - 1 (Dombe *et al.*, 2008; A. K. Mahanta *et al.*, 2007; Muthiah *et al.*, 1992).

Dengan adanya acuan bahwa prosesibilitas *slurry* propelan dapat dicapai dengan baik jika *slurry* memiliki viskositas di bawah 16.000 P selama sekitar 30 menit dan indeks pseudoplastisitas antara 0,8 - 1, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui

pengaruh rasio AP halus : AP kasar terhadap viskositas, *pot life* dan pseudoplastisitas *slurry* propelan LAPAN. Selanjutnya, diharapkan pengetahuan tersebut dapat dijadikan dasar untuk pengembangan komposisi propelan selanjutnya hingga tercapai parameter yang menjadi acuan di atas.

2 METODOLOGI

2.1 Bahan

Dalam penelitian ini dibuat 4 jenis propelan dengan 67% AP yang variasi komposisinya tersaji pada Tabel 2-1. Pada kolom 3, AP kasar (AP_k) berukuran 200 μm, sedangkan, AP halus (AP_h) berukuran 50 μm. Persentase pada kolom 4 merupakan % berat AP_h dari keseluruhan. Komposisi lainnya meliputi 18% Alumunium (30 μm) dan isian cair berupa HTPB dan TDI dengan perbandingan 14:1. *Bulk density* poliuretan, hasil reaksi TDI dan HTPB, sebesar 1,053250 g/mL (Abdillah, 2015).

Tabel 2-1: VARIASI AP PADA PROPELAN

No	Jenis Propelan	Rasio AP _h : AP _k	% AP _h
1	2	3	4
1	Propelan A	1 : 2	22
2	Propelan B	1 : 1	34
3	Propelan C	3 : 2	40
4	Propelan D	2 : 1	45

2.2 Metode Penelitian

Dalam pembuatan *slurry* propelan, AP kasar dan halus diaduk secara merata terlebih dahulu sebelum ditambahkan ke campuran HTPB dan Aluminium. Kemudian TDI ditambahkan dan diaduk dengan *mixer* tangan selama 20 menit. Viskositas *slurry* kemudian diukur setiap 15 menit pada 0,3 rpm dengan viskometer *Brookfield RVT spindle 07* pada suhu ruang. Grafik *ln* viskositas *vs* waktu (menit) dibuat untuk mendapatkan persamaan (1-3) yang selanjutnya digunakan untuk menentukan *pot life*

dengan batas 16.000 P dan viskositas awal. Sementara, saat 35 menit, viskositas diukur pada 0,3; 0,5 dan 0,6 rpm untuk membuat grafik viskositas (P) vs shear rate (rps) sehingga didapat persamaan (1-4) dan dari persamaan tersebut dapat ditentukan indeks pseudoplastisitas slurry.

Shear rate didapat dengan mengalikan kecepatan putar dengan 0,21 sesuai persamaan (2-3) yang merupakan turunan dari persamaan (2-1) dan (2-2). Dalam ketiga persamaan tersebut, N adalah kecepatan putar (rpm), R_c adalah jari-jari wadah (2,25 cm), R_b adalah jari-jari spindle (0,16 cm) dan x adalah jarak dimana shear rate diukur (cm). Oleh karena slurry pseudoplastis sangat sensitif terhadap shear rate, maka shear rate yang diukur dianggap pada permukaan spindle sehingga $x^2 = R_b^2$ dan persamaan (2-2) diperoleh. Dengan substitusi nilai R_b dan R_c, persamaan (2-3) diperoleh (Brookfield Engineering Laboratories, 2014; Triantafillopoulos, 2000).

$$\gamma = \{2 \cdot (2\pi/60) \cdot N \cdot R_c^2 \cdot R_b^2\} \cdot \{x^2 (R_c^2 - R_b^2)\} \quad (2-1)$$

$$\gamma = \{4\pi/60\} \cdot N \cdot R_c^2 \cdot (R_c^2 - R_b^2) \quad (2-2)$$

$$\gamma = N \cdot 0,21 \quad (2-3)$$

Pengukuran tap density dilakukan dengan menimbang 20 mL AP_h, AP_k dan Aluminium. AP_h dan AP_k dioven selama 4 jam terlebih dahulu sebelum penimbangan. Tap density digunakan untuk menghitung fraksi volume maksimum partikel dengan menggunakan persamaan (2-4) dan (2-5), yang mana ρ_{Al} adalah tap density dari aluminium dan ρ_{AP} adalah tap density AP. Sementara, w adalah fraksi massa dari komponen.

$$X = (w_{Al} \cdot \rho_{Al}) + (w_{APh} \cdot \rho_{APh}) + (w_{APk} \cdot \rho_{APk}) \quad (2-4)$$

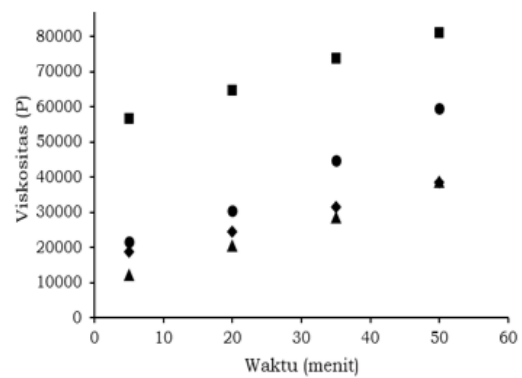
$$\phi = X / [X + (w_{binder} \cdot \rho_{binder})] \quad (2-5)$$

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Komposisi AP_h: AP_k Terhadap Viskositas dan Pot Life Propelan

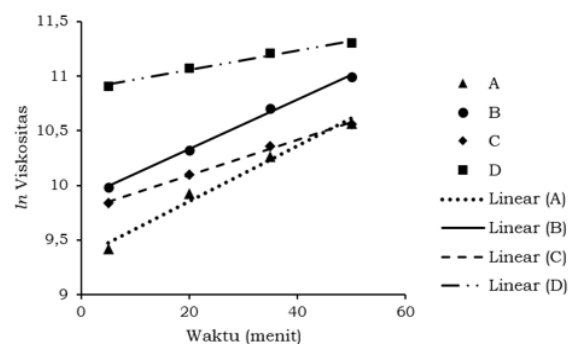
Hasil pengukuran viskositas pada kecepatan putar 0,3 rpm terhadap keempat jenis slurry propelan hingga 50 menit setelah pengadukan disajikan

pada Gambar 3-1. Sebelumnya, Priyanto (2016) telah mengukur viskositas tersebut namun pada range waktu hanya sampai 20 menit dan kecepatan putar 0,6 rpm (Priyanto, 2016). Range pengukuran pada kecepatan putar tersebut kurang memadai (hanya sampai 66.670 P) sehingga kecepatan putar 0,3 rpm dengan range pengukuran hingga 133.300 P dipilih untuk penelitian ini (Brookfield Engineering Laboratories, 2014). Jangka waktu pengukuran yang panjang dikehendaki agar lebih akurat dalam menentukan pot life.



Gambar 3-1: Viskositas (P) vs Waktu (menit)

Gambar 3-1 memperlihatkan bahwa pada keempat komposisi, semakin lama, viskositas slurry semakin besar. Dalam arti lain, slurry semakin sulit untuk mengalir. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya matriks poliuretan yang terbentuk dari HTPB dan TDI, seperti dijelaskan pada Gambar 1-1 (Gogoi, Alam, & Khandal, 2014; K et al., 2010). Selanjutnya, untuk mendapatkan persamaan (1-3), grafik ln viskositas vs waktu tersaji pada Gambar 3-2.



Gambar 3-2: ln Viskositas vs Waktu (menit)

Tabel 3-1: PERSAMAAN VISCOSITY BUILD UP DAN HASIL PERHITUNGANNYA

No.	Jenis Propelan	%AP _h	$\ln \eta_t = k.t + \ln \eta_0$	r	Tingkat Korelasi	η_0 (Poise)	Pot Life (menit)	$\Delta\eta/\Delta t$ (P/menit)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	A	22	$\ln \eta_t=0,0252t+9,3495$	0,99	sangat kuat	11493	13,12	163
2	B	34	$\ln \eta_t=0,0228t+9,8769$	0,99	sangat kuat	19475	-	443
3	C	40	$\ln \eta_t=0,0161t+9,7703$	0,99	sangat kuat	17506	-	247
4	D	45	$\ln \eta_t=0,0089t+10,887$	0,99	sangat kuat	52945	-	767

Pada Tabel 3-1 kolom 2, 5, dan 6 terlihat bahwa persamaan (1-3) yang didapat (kolom 4) memiliki tingkat korelasi yang sangat kuat sehingga dapat digunakan untuk menghitung *pot life* (kolom 8), viskositas awal *slurry* (kolom 7) dan laju kenaikan viskositas *slurry* pada 5 menit pertama (kolom 9). Terlihat bahwa hanya komposisi A yang memiliki *pot life*, yaitu 13,12 menit sebelum mencapai viskositas 16.000 P. Hal ini karena komposisi lainnya memiliki viskositas awal yang telah melebihi 16.000 P. Kolom 7 dan 9 memperlihatkan perubahan viskositas awal dan laju kenaikan viskositas pada 5 menit pertama yang tidak selalu berbanding lurus dengan kenaikan kandungan AP halus pada kolom 3.

Menurut penelitian Nair *et al.*, (2013) dengan ukuran AP_k (340 μm), AP_h (40 μm) dan range %AP_h meliputi 9,5 – 22,5%, semakin besar fraksi AP_h, semakin besar pula viskositas *slurry*. Menurut Jain *et al.*, (2009), hal ini karena AP_h memiliki luas permukaan yang lebih besar daripada AP_k sehingga semakin besar kandungan AP_h, semakin sedikit *binder* (fasa pengikat) yang tersedia untuk pembasahan (*wetting*) *powder* padatan pengisi propelan sehingga viskositasnya meningkat. Hal serupa juga ditemukan oleh Ke-xi *et al.*, (1986) dengan ukuran AP_k (1000 μm), AP_h (50 μm) dan range %AP_h meliputi 30, 50 dan 70% dari total massa AP. Sementara, dalam penelitian ini, viskositas yang naik seiring dengan bertambahnya persentase AP_h terjadi pada propelan A (11.493 P) ke

B (19.475 P) dan C (17.506 P) ke D (52.945 P), sedangkan dari B ke C, hubungan tersebut berkebalikan, dengan penurunan viskositas sekitar 2000 P. (Jain *et al.*, 2009; Ke-xi *et al.*, 1986; Nair, Prasad, & Ninan, 2013).

Tabel 3-2: HASIL PENGUKURAN TAP DENSITY

No	Jenis Partikel	Tap Density (g/cm ³)
1	2	3
1	Aluminium	1,39
2	AP _h	0,9755
3	AP _k	1,1875

Turunnya viskositas dari B ke C dapat disebabkan oleh tercapainya keadaan *close packing* yaitu saat partikel - partikel kecil tertata mengisi rongga-rongga antar partikel besar sehingga tercapai densitas optimal. Hal ini dikemukakan oleh Ke-xi *et al* (1986) dalam penelitiannya terhadap AP_h 33 μm dan AP_k 425 μm dalam range AP_h 10 - 80% dari total massa AP (Ke-xi *et al.*, 1986).

Keadaan *close packing* dipengaruhi oleh nilai ϕ_m . Tabel 3-2 menunjukkan hasil pengukuran *tap density* yang digunakan untuk menghitung ϕ_m yang hasilnya ditampilkan pada Tabel 3-3. Pada kolom 3 baris 3 di tabel tersebut, komposisi C memiliki nilai ϕ_m sebesar 0,8434. Berdasarkan persamaan (1-1), untuk mencapai viskositas rendah, maka nilai rasio fraksi volume partikel dengan fraksi volume maksimum, ϕ/ϕ_m , harus besar. Dengan demikian, nilai dari fraksi

volume partikel yang terbentuk pada propelan C mendekati 0,8434.

Tabel 3-3: NILAI ϕ_m PROPELAN

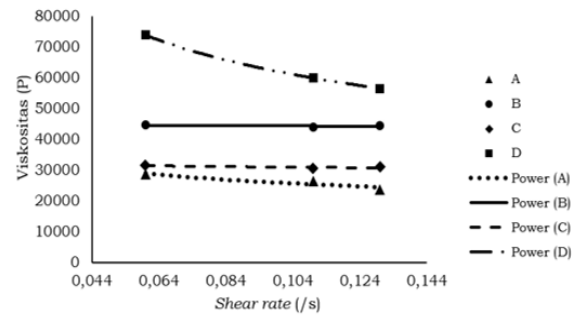
No	Jenis Propelan	ϕ_m
1	2	3
1	Propelan A	0,8376
2	Propelan B	0,8413
3	Propelan C	0,8434
4	Propelan D	0,8448

Selain mempengaruhi viskositas, keadaan *close packing* juga mempengaruhi laju kenaikan viskositas yang tersaji pada Tabel 3-1 kolom 9. Sejalan dengan *trend* yang ditunjukkan oleh viskositas, laju kenaikan viskositas naik dari propelan A (163 P/menit) ke B (443 P/menit) dan C (247 P/menit) ke D (767 P/menit). Sementara, dari propelan B ke C, laju kenaikan viskositas menurun sebesar sekitar 200 P/menit sehingga, selanjutnya, propelan C lebih baik untuk dimodifikasi daripada propelan B dan D dalam rangka mendapatkan *pot life*. Modifikasi ini membawa keuntungan pada nilai spesifik impuls dari propelan karena propelan C mengandung lebih banyak AP_h daripada propelan A sehingga nilai spesifik impuls propelan C dapat lebih tinggi dari propelan A.

3.2 Pengaruh Komposisi AP_h : AP_k Terhadap Pseudoplastisitas Propelan

Indeks pseudoplastisitas adalah merupakan parameter untuk mengetahui seberapa besar sifat pseudoplastik *slurry* propelan (A. K. Mahanta et al., 2007). Untuk mengetahui pengaruh komposisi AP_h:AP_k terhadap indeks pseudoplastisitas *slurry* propelan, dibuat grafik *shear rate* (rps) vs viskositas (Poise) pada saat 35 menit untuk semua komposisi yang tersaji pada Gambar 3-3. Pemilihan waktu ini karena pencetakan propelan bisa sampai sekitar 30 menit. Kecepatan putar 0,3; 0,5; 0,6 rpm setelah dihitung

dengan persamaan (2-3) menghasilkan *shear rate* sebesar 0,064; 0,11; 0,13 s⁻¹.



Gambar 3-3: Grafik *Shear Rate* (rps) vs Viskositas (Poise)

Gambar 3-4 menunjukkan bahwa viskositas *slurry* propelan menurun dengan naiknya *shear rate*. Sifat tersebut karena viskositas *slurry* propelan merupakan efek total dari *binder*, padatan partikulat yang terdispersi, beragam gaya kohesi dan adhesi yang terjadi di antara bahan-bahan serta berlangsungnya reaksi pembentukan jejaring polimer antara polioliol dan *curing agent*. Partikel-partikel dari fasa padat membentuk agregat karena gaya kohesi dan adhesi. Efek *shearing* pada agregat dapat menghasilkan sifat pseudoplastik. Dengan meningkatnya *shear rate*, agregat pecah menjadi gumpalan-gumpalan yang individual sehingga viskositas *slurry* menurun. Sedangkan, ketika *shear rate* rendah, agregat-agregat terbentuk kembali (Abhay K Mahanta et al., 2010). Untuk lebih memahami sifat ini, pada Tabel 3-4 disajikan persamaan Power Law dari grafik pada Gambar 3-3 beserta nilai *r* yang menunjukkan tingkatan korelasinya dan indeks pseudoplastisitas.

Tabel 3-4 kolom 5 dan 6 menunjukkan adanya tingkatan korelasi yang variatif untuk persamaan pada kolom 4. Korelasi yang kuat hingga sangat kuat ditunjukkan oleh propelan komposisi A, C, dan D. Sementara, propelan B memiliki korelasi yang sedang. Nilai indeks pseudoplastisitas ditampilkan pada kolom 7 dengan acuan bahwa sifat Newtonian ditunjukkan dengan nilai *n* = 1. Nilai tersebut juga bervariasi, sama seperti yang ditemukan

oleh Muthiah *et al.*, (1992) terhadap ukuran AP kasar (300 – 320 μm), AP halus 40 – 45 μm pada range 20 – 50% dari total massa AP (Muthiah *et al.*, 1992).

Menurut Muthiah *et al.*, (1992) sifat *slurry* yang mendekati Newtonian adalah optimum. Semetara menurut Dombe *et al.*, (2008), nilai indeks pseudoplastisitas dari *slurry* propelan yang cocok untuk teknik pencetakan dengan vakum adalah 0,8 – 1. Dalam penelitian ini pada Tabel 3-4 kolom 7 terlihat bahwa syarat-syarat tersebut dimiliki oleh propelan B dan C. Sifat propelan B dan C mendekati Newtonian dengan indeks pseudoplastisitas masing-masing sebesar 0,991 dan 0,972. Namun oleh karena tingkat korelasi propelan B lebih rendah ($r = 0,56$) daripada propelan C ($r = 0,79$), maka indeks pseudoplastisitas propelan C lebih akurat sehingga dapat dikatakan bahwa komposisi yang optimal dalam hal pseudoplastisitas adalah propelan C, yaitu $AP_h : AP_k$ 3:2. Hasil ini berbeda dengan yang ditemukan oleh Muthiah *et al.* ($AP_h : AP_k$ 1:3) dalam penelitiannya yang telah dijelaskan di atas.

Hal ini disebabkan oleh perbedaan ukuran AP. Ukuran AP mempengaruhi pseudoplastisitas dalam hal kekuatan adhesi dalam *wetting* oleh HTPB dan

kohesi dalam pembentukan agregat (Dombe *et al.*, 2008; Abhay K Mahanta *et al.*, 2010; Muthiah *et al.*, 1992).

Korelasi antara indeks pseudoplastisitas pada kolom 7 dengan kandungan AP halus pada kolom 3 tidak selalu berbanding lurus. Ini menunjukkan bahwa faktor *packing* mempengaruhi indeks pseudoplastisitas *slurry* propelan. Dengan diasumsikan bahwa propelan C telah mencapai keadaan *close packing* dengan alasan yang telah diuraikan pada bab 3.1, maka ini mengandung arti bahwa pada keadaan *close packing*, *slurry* propelan memiliki sifat yang mendekati *Newtonian* karena pada keadaan tersebut, jumlah agregat yang terbentuk minimum sehingga tidak begitu mempengaruhi sifat alir *slurry* propelan.

Dalam hal pemilihan teknik pencetakan, teknik dengan tekanan seperti yang dirancang oleh Dombe *et al.*, (2008) dapat diaplikasikan untuk propelan A dan D. Hal ini karena indeks pseudoplastisitas yang dimiliki propelan tersebut antara 0,6 – 1, yaitu propelan A dengan indeks sebesar 0,788 dan propelan D dengan indeks sebesar 0,655. Selain itu, metode *die-casting* juga dapat diterapkan karena sesuai untuk *slurry* yang bersifat pseudoplastik (Davenas, 1991; Dombe *et al.*, 2008).

Tabel 3-4: INDEKS PSEUDOPLASTISITAS *SLURRY* PROPELAN

No.	Jenis Propelan	%AP h	Persamaan Power Law	r	Tingkat Korelasi	Indeks Pseudoplastisitas (n)
1	2	3	4	5	6	7
1	A	22	$y = 15964x^{-0,212}$	0.92	Sangat kuat	0,788
2	B	34	$y = 43541x^{-0,009}$	0.56	Sedang	0,991
3	C	40	$y = 29105x^{-0,028}$	0,79	Kuat	0,972
4	D	45	$y = 28016x^{-0,345}$	1	Sangat kuat	0,655

4 KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa propelan dengan komposisi $AP_h : AP_k$ 1:2 menunjukkan viskositas terendah dan satu-satunya komposisi yang memiliki *pot life* yaitu 13,12 menit untuk mencapai viskositas 16.000 P, namun berdasarkan indeks pseudoplastisitas, propelan tersebut tidak baik untuk dicetak dengan vakum. Pada sisi lain, propelan dengan $AP_h : AP_k$ 3:2 relatif ideal untuk dikembangkan karena viskositas (17.506 P) dan laju kenaikan viskositasnya (247 P/menit) yang dimiliki tidak berbeda jauh dengan propelan dengan $AP_h : AP_k$ 1:2 dan indeks pseudoplastisitas (0,972) yang dimiliki sesuai untuk pencetakan dengan vakum. Berdasarkan analisa dan pembahasan yang sudah diuraikan, diduga propelan tersebut telah mencapai keadaan *close packing* sehingga disimpulkan bahwa hubungan antara rasio $AP_h : AP_k$ dengan viskositas, *pot life* dan pseudoplastisitas tidak selalu berbanding lurus oleh karena faktor *packing* dari partikel-partikel penyusun propelan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Teknologi Roket, LAPAN, atas dukungannya serta seluruh staf Laboratorium Komposisi Dasar Propelan atas bantuannya.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdillah, L. H., 2015. *Penelitian Swelling Prepolimer HTPB-TDI Sebagai Penjajagan Peningkatan Solid Loading Pada Formulasi Propelan*. In Teknologi Pesawat Terbang sebagai Mitra Pengembang Teknologi Roket dan Satelit Nasional (359–374). Jakarta: Indonesia Book Project.
- Andric, A. M. Ž., 2007. *Crystallization of Ammonium-Perchlorate from Solution of Electrolytically Produced Sodium-Perchlorate in a Pilot-Scale Plant*. In European Congress of Chemical Engineering-6 (1–11). Copenhagen.
- Aziz, A., Mamat, R., Ali, K. W., & Perang, M. R. M., 2015. *Review on Typical Ingredients For Ammonium Perchlorate Based Solid Propellant*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 10(15), 6188–6191.
- Brookfield Engineering Laboratories, 2014. *More Solutions for Sticky Problems*. Massachusetts: Brookfield Engineering Laboratories, Inc.
- Chai, T., Liu, Y. C., Ma, H., Yu, Y. W., Yuan, J. M., Wang, J. H., & Guo, J. H., 2016. *Rheokinetic Analysis on the Curing Process of HTPB-DOA- MDI Binder System*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 137, 1–7). IOP Publishing.
- Davenas, A., 1991. *Composite Propellants*. In Solid Rocket Propulsion Technology (439–460). Oxford: Pergamon Press.
- Doll, D. W., & Lund, G. K., 1999. *Processing and Curing Aid for Composite Propellants*. United State.
- Dombe, G., Jain, M., Singh, P. P., Radhakrishnan, K. K., & Bhattacharya, B., 2008. *Pressure Casting of Composite Propellant*. Indian Journal of Chemical Technology, 15, 420–423.
- German, R. M., 2016. *Particulate Composites Fundamentals and Application*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Gogoi, R., Alam, M. S., & Khandal, R. K., 2014. *Effect of Increasing NCO/OH Molar Ratio on The Physicomechanical and Thermal Properties of Isocyanate Terminated Polyurethane Prepolymer*. International Journal of Basic and Applied Sciences, 3(2), 118–123.
- Hartaya, K., 2016. *Analisis Kandungan Aluminium Powder Propelan Berdasar Energi Pembakaran dari Bomb Kalorimeter*. Jurnal Teknologi Dirgantara, 14(1), 73–80.
- Jain, S., Nandagopal, S., Singh, P. P., Radhakrishnan, K. K., & Bhattacharya, B., 2009. *Size and Shape of Ammonium Perchlorate and their Influence on Properties of Composite Propellant*. Defence Science Journal, 59(3), 294–299.
- K, M. A., Monika, G., & D, P. D., 2010. *Empirical Modeling of Chemoviscosity of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid*

- Composite Propellant Slurry*. Malaysian Polymer Journal, 5(1), 1–16.
- Ke-xi, Y., Ze-ming, T., & Guo-juan, W., 1986. *Viscosity Prediction*. In *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* (Vol. 11, 167–169). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Mahanta, A. K., Dharmasakti, I., & Pattnayak, P. K., 2007. *Rheological Behaviour of HTPB-Based Composite Propellant: Effect of Temperature and Pot Life on Casting Rate*. Defence Science Journal, 57(4), 435–442.
- Mahanta, A. K., Goyal, M., & Pathak, D. D., 2010. *Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry*. E-Journal of Chemistry, 7(1), 171–179.
- Manu, S. K., 2009. *Glycidyl Azide Polymer (GAP) as a High Energy Polymeric Binder for Composite Solid Propellant Applications*. Mahatma Gandhi University.
- Muthiah, R., Krishnamurthy, V. N., & Gupta, B. R., 1992. *Rheology of HTPB Propellant . 1 . Effect of Solid Loading, Oxidizer Particle Size, and Aluminum Content*. Journal of Applied Polymer Science, 44, 2043–2052.
- Nair, C. P. R., Devi, C. H., Prasad, V., & Ninan, K. N., 2013. *Effect of Process Parameters on the Viscosity of AP / Al / HTPB Based Solid Propellant Slurry*, 1, 1–9.
- Nair, C. P. R., Prasad, C. D. V., & Ninan, K. N., 2013. *Effect of Process Parameters on the Viscosity of AP / Al / HTPB Based Solid Propellant Slurry*. Journal of Energy and Chemical Engineering, 1(1), 1–9.
- Pinalia, A., 2014. *Reduksi Ukuran Partikel Ammonium Perklorat (AP) dengan Metode Spray Drying (Particle Size Reduction of Ammonium Perchlorate Using Spray Drying Method)*. Majalah Sains Dan Teknologi Dirgantara, 75–80.
- Priyanto, 2016. *Laporan Penelitian: Pengaruh Perbandingan AP 200: 50 Terhadap Kualitas Propelan*. Tangerang: Universitas Pamulang.
- Remakanthan, S., Kk, M., Gunasekaran, R., Thomas, C., & Thomas, C. R., 2015. *Analysis of Defects In Solid Rocket Motors Using X-Ray Radiography*. The E-Journal of Nondestructive Testing, 20(6).
- Sutrisno, 2010. *Pengaruh Penambahan Plasticizer DOA terhadap Kinerja Propelan HTPB*. In *Prosiding SIPTEKGAN XIV* (123–127). Tangerang: LAPAN.
- Triantafillopoulos, N., 2000. *Measurement of Fluid Rheology and Interpretation of Rheograms (2nd ed.)*. Michigan: Kaltec Scientific.
- Tüzün, F. N., 2005. *The Effect of Aluminum Content Variation on Burning Rate, Pressure-Propellant Area Ratio Relationship, and Other Properties of Hydroxyl Terminated Polybutadiene Based Composite Propellants*. Journal of ASTM International, 2(4), 1–15.