

PENGARUH *DIOCTYL ADIPATE* TERHADAP *POT-LIFE* PROPELAN BERFORMULA AP TRIMODA

EFFECTS OF DIOCTYL ADIPATE ON TRIMODE AP FORMULATED PROPELLANT'S POT-LIFE

Afni Restasari dan Luthfia Hajar Abdillah
Pusat Teknologi Roket, LAPAN
afni.restasari@lapan.go.id

Abstrak

Pembuatan propelan membutuhkan *pot-life* yang lama agar pencetakannya menghasilkan propelan yang merata tanpa void. Salah satu cara untuk memperoleh hal tersebut adalah dengan penambahan DOA. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan DOA terhadap *pot-life* propelan. Propelan 1, 2, 3 dengan kandungan DOA berturut-turut 0%, 3% dan 4% dibuat dan viskositas *slurry* diukur. Grafik viskositas *slurry* dan \ln viskositas terhadap waktu dibuat. Diketahui, dengan penambahan DOA 3%, *pot-life* lebih panjang 7 kali daripada propelan tanpa DOA, sedangkan dengan DOA 4%, *pot-life* lebih panjang 21 kali. Penyebab dari hal ini meliputi peran DOA sebagai pelumas internal HTPB dalam menurunkan viskositas HTPB, sebagai penyebab gerakan mikro-Brownian dan pendispersi partikel padatan dalam menurunkan viskositas *slurry* dan memberikan efek pengenceran dalam menurunkan laju peningkatan viskositas.
Kata kunci: *Diocetyl adipate*, *pot-life*, propelan padat.

Abstract

The manufacturing of propellant requires a long pot-life in order to obtain a non-void propellant when it's casted. One of the way to obtain this is by adding DOA. Therefore, the objective of this study was to determine the effect of DOA on the pot-life of propellant. Propellant 1, 2, 3 with the content of DOA respectively, 0%, 3% and 4%, were made and slurry's viscosities were measured. Graph of slurry's viscosity and \ln viscosity vs. time were made. It was known that the addition of DOA 3%, the pot-life was 7 times longer than the propellant without DOA, while propellant with DOA 4%, the pot-life was 21 times longer. The cause of these occurrence were include the role of DOA as an internal lubricant of HTPB in reducing HTPB's viscosity, as a micro-Brownian motion maker and as solid particles disperser in lowering the viscosity of the slurry and provide a dilution effect in reducing the rate of viscosity build up.
Keywords: *Diocetyl adipate*, *pot-life*, solid propellants.

1. PENDAHULUAN

Propelan merupakan bahan bakar yang tidak membutuhkan oksigen dari lingkungan untuk pembakarannya. Oksigen tersebut berasal dari oksidator yang telah terkandung di dalamnya. Ukuran propelan disesuaikan dengan kebutuhan. Beberapa penggunaan propelan berukuran kecil adalah propelan untuk roket Teknologi Modifikasi Cuaca yang memiliki diameter 10 cm dan panjang 100 cm serta penggunaan propelan sebagai *booster* pesawat *Electric Ducted Fan* (EDF) RKX 200 TJ/Booster. Wahana yang telah dikembangkan sejak tahun 2013 ini menggunakan mesin turbojet (TJ) sebagai pendorong utamanya dan propelan padat sebagai pendorong saat lepas landas. Spesifikasi *booster* yang digunakan meliputi diameter luar 7,5 cm, panjang 23,5 cm, dan berat total 1,6 kg [1]–[4].

Propelan padat komposit merupakan hasil pencetakan dan pematangan (*curing*) dari *slurry* propelan yang termasuk dalam sistem koloid. *Slurry* propelan terbentuk dari partikel – partikel padatan kristal yang tersuspensi dalam polimer pengikat (*binder*) [5]. Diameter yang kecil memberikan tantangan tersendiri bagi proses pencetakan propelannya. Hal ini menyangkut viskositas *slurry* karena apabila *slurry* propelan yang berviskositas tinggi dicetak, gelembung udara dapat terjebak di dalam *slurry* yang kemudian akan menjadi *void* atau bagian yang kosong di dalam propelan yang dimatangkan (*cured*) dalam oven. Apabila gelembung udara tersebut berhasil keluar ke permukaan, gelembung

tersebut dapat menyebabkan bentuk *void* berekor. Ekor yang tajam menjadi awal permulaan keretakan propelan sehingga propelan tidak dapat dipakai. *Void – void* yang berkumpul dapat bergabung membentuk poros. Keberadaan poros ini tentu tidak dikehendaki karena dapat menyebabkan struktur propelan yang kurang memadai dan menjadi masalah dalam insulasi termal [6].

Viskositas merupakan ketahanan internal suatu cairan atau *fluid* untuk mengalir [7]. Komposisi pembentuk *slurry* propelan sangat berperan pada nilai viskositas *slurry* yang dihasilkan. Hal ini karena viskositas *slurry* propelan dipengaruhi oleh viskositas dari sistem isian cair dan viskositas struktural dari sistem. Hal ini dijelaskan pada persamaan (1) yang mana μ adalah viskositas propelan. μ_0 adalah viskositas dari sistem isian cair, yaitu bahan – bahan pembentuk polimer di antaranya toluena diisosiyanat (TDI) dan *hydroxy terminated polybutadiene* (HTPB). Sedangkan μ_s adalah viskositas struktural dari sistem yang berhubungan langsung dengan fraksi volume dari isian padatan (seperti aluminium *powder* dan ammonium perklorat (AP)) serta viskositas sistem isian cair. Hal ini dijelaskan dengan persamaan (2) [8].

Pada persamaan (2), K adalah konstanta yang berhubungan dengan sifat permukaan partikel dari sistem. ϕ adalah fraksi volume dari padatan pengisi dan ϕ_m merupakan fraksi volume maksimal dari padatan pengisi. Apabila persamaan (2) disubstitusikan ke persamaan (1), akan didapatkan persamaan (3) [8].

$$\mu = \mu_0 + \mu_s \quad (1)$$

$$\mu_s = \mu_0 \cdot K \cdot \phi : ((1/\phi) - (1/\phi_m)) \quad (2)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot [1 + ((K \cdot \Phi^2 \cdot \Phi_m) : (\Phi_m - \Phi))] \quad (3)$$

Viskositas yang ideal untuk pencetakan propelan bergantung dari teknik pencetakan yang dilakukan. Teknik pencetakan propelan yang digunakan LAPAN adalah teknik vakum. Menurut Dombe *et al* (2008), teknik ini membutuhkan nilai viskositas *slurry* di bawah 16.000 Poise [9]. Viskositas tersebut merupakan ambang batas yang berlaku sampai propelan selesai dicetak. Viskositas *slurry* propelan akan terus meningkat seiring berjalannya waktu, maka *pot-life* merupakan parameter yang tepat untuk mendesain formula propelan agar mudah dicetak [10].

Pot-life merupakan lamanya waktu yang tersedia untuk dapat mencetak *slurry* propelan dengan viskositas ideal, dalam hal ini 16.000 Poise [9], [11], [12]. *Pot-life* dapat ditentukan dengan persamaan *viscosity build-up* (pola peningkatan viskositas dari waktu ke waktu) dari *slurry* propelan, seperti dijelaskan pada persamaan (4) dan (5) yang mana η_t merupakan viskositas setelah waktu tertentu, η_0 ialah viskositas awal, k adalah konstanta *viscosity build-up* dan t adalah waktu [13].

$$\eta_t = \eta_0 \cdot e^{k \cdot t} \quad (4)$$

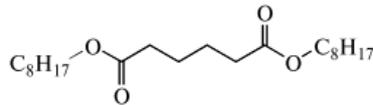
$$\ln \eta_t = \ln \eta_0 + k \cdot t \quad (5)$$

Telah banyak penelitian dilakukan untuk memperpanjang *pot-life slurry* propelan, seperti dengan penggantian *curing agent*, peningkatan suhu pencetakan dan penambahan *plasticizer*. Jawalkar *et al.*, melaporkan bahwa penggantian *curing agent* TDI dengan *isophorone diisocyanate* (IPDI) diketahui dapat memperpanjang *pot-life* namun tidak baik untuk integritas struktur propelan. Selain itu, kebutuhan akan suhu pematangannya yang tinggi (70 °C) dapat meningkatkan tegangan termal pada propelan [14]. Sementara menurut Chai *et al.*, *pot-life* dapat diperpanjang dengan meningkatkan suhu [11]. Namun hal ini tentu akan menyebabkan pemborosan energi listrik sehingga kurang sesuai untuk diterapkan. Sementara, penambahan *plasticizer* diketahui efektif untuk mengendalikan *pot-life* [13], [15], [16].

Plasticizer merupakan material dengan berat molekul rendah yang ditambahkan pada bahan berpolimer dan berinteraksi pada level molekular untuk meningkatkan mobilitas rantai polimer [17]. Pada propelan, *plasticizer* merupakan bahan cair dengan viskositas relatif rendah yang ditambahkan untuk meningkatkan prosesibilitas *slurry* propelan seperti viskositas yang rendah untuk pengadukan dan pencetakan serta *pot-life* yang panjang. *Plasticizer* juga dapat berperan sebagai bahan bakar (*fuel*) atau senyawa cairan yang energetik [18]. Pada persamaan 1, 2 dan 3 di atas, keberadaan *plasticizer* berperan pada besarnya μ_0 .

Menurut Muthiah *et al.*, *plasticizer* yang paling kompatibel untuk propelan berbahan HTPB adalah IDP (*Isodecyl pelargonate*) dan DOA (*Diocetyl adipate*) [16]. Menurut Manu S. K., DOA diketahui lebih baik daripada *Diocetyl phthalate* dalam menurunkan viskositas *slurry* propelan [13]. Menurut Li *et al.*, DOA ialah yang optimum dalam pengaruhnya terhadap sensitivitas, sifat rheologi dan mekanik dibandingkan dengan *Diocetyl sebacate* maupun *Dibutyl phthalate* [19]. DOA juga merupakan

plasticizer yang paling banyak digunakan di dunia [20]. Struktur kimia DOA ditunjukkan pada Gambar 1, sementara sifat – sifatnya tersaji pada Tabel 1.



Gambar 1. Struktur DOA [21]

Tabel 1. Sifat – Sifat Dioctyl adipate [16, 22, Millsian software]

| | |
|-------------------------------|--|
| Rumus Kimia | C ₂₂ H ₄₂ O ₄ |
| Massa Molekul | 370,57 g/mol |
| Titik Didih | 417 °C |
| Titik Leleh | -67,8 °C |
| Densitas pada 25 °C | 922 kg/m ³ |
| Tekanan Uap pada 25 °C | 0,113 kPa |
| Viskositas kinematik | 8,2 cSt |
| Tegangan Permukaan pada 20 °C | 29 mN/m |
| Viskositas pada 25 °C | 14 cP |
| Viskositas pada 50 °C | 8 cP |
| Calorie value | 8150 cal/g |
| Momen dipol | 0,0019 D |
| Energi ikatan total | 280, 4897 eV |
| Sifat | Inert |

Muthiah et al. meneliti efek DOA terhadap perkembangan viskositas propelan berbasis HTPB hingga melampaui 16000 P, namun tidak disebutkan *curing agent* yang digunakan [16]. Sementara di LAPAN, penelitian mengenai pengaruh penambahan DOA terhadap propelan berbasis HTPB dan *curing agent* TDI pernah dilakukan oleh Sutrisno (2010). Diketahui dengan penambahan DOA 3%, viskositas *slurry* propelan turun 52,69% dan waktu yang dibutuhkan untuk pencetakan pun berhasil turun sebesar 66,67%, yaitu dari 15 menit menjadi 5 menit [23]. Namun demikian, pengaruh DOA terhadap *pot-life* propelan LAPAN belum diungkap.

Dari uraian di atas, maka penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan DOA terhadap *pot-life* propelan. Manfaat dari penelitian ini adalah bertambahnya pengetahuan mengenai propelan sehingga dapat dijadikan dasar untuk pengembangan komposisi selanjutnya.

2. METODOLOGI

Dalam penelitian ini dibuat 3 jenis propelan dengan variasi persentase DOA. Propelan – propelan tersebut dibuat dengan komposisi isian cair 15% dan isian padat 85%. Isian cair meliputi DOA, TDI dan HTPB yang berasal dari polimerisasi dengan radikal bebas. Rasio massa HTPB : TDI yang digunakan adalah 14:1. Propelan 1 tidak mengandung DOA. Sedangkan propelan 2 mengandung 3% DOA dan propelan 3 mengandung 4% DOA. Isian padat meliputi serbuk aluminium 7,5 % dan ammonium perklorat trimoda dengan perbandingan ukuran kasar : sedang : halus 1:1:1.

Dalam prosedur pembuatannya, pada tahap awal, untuk propelan 2 dan 3, DOA dicampur dengan HTPB dan diaduk selama 15 menit. Kemudian, masing-masing bahan padat dan cair dicampurkan ke dalam *mixer* secara bertahap selama waktu tertentu hingga proses *mixing* berakhir. Proses *mixing* dilakukan pada suhu ruang. Setelah membentuk *slurry*, viskositas *slurry* diukur dengan viskometer Brookfield RVT dengan *spindle* 07 pada kecepatan putar 2 rpm. Untuk propelan 1, pengukuran viskositas dilakukan hingga mencapai 16.000 Poise. Sementara, untuk propelan 2 dan 3, pengukuran viskositas tersebut dilakukan 10 kali dengan jangka waktu tertentu. Data yang diperoleh kemudian dibuat grafik waktu vs viskositas untuk melihat *viscosity build up dari slurry*. Grafik waktu vs *ln* viskositas juga dibuat untuk menentukan persamaan *viscosity build up* sesuai Persamaan (5). Persamaan yang didapat tersebut digunakan untuk menentukan *pot-life* dengan batas viskositas 16000 Poise. Nilai R² yang didapat dari Microsoft Excel untuk masing-masing persamaan tersebut kemudian diklasifikasikan berdasarkan Tabel 2. Untuk mendukung analisa dan pemahaman data, data momen

dipol dicari dengan cara menginput SMILES senyawa – senyawa yang bersangkutan ke Millisian Software yang berbasis Newton Raphson.

Tabel 2. Tingkatan Korelasi [24]

| R | Tingkatan Korelasi |
|--------------|--------------------|
| 0.00 – 0.199 | Sangat rendah |
| 0.20 – 0.399 | Rendah |
| 0.40 – 0.599 | Sedang |
| 0.60 – 0.799 | Kuat |
| 0.80 – 1.000 | Sangat Kuat |

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

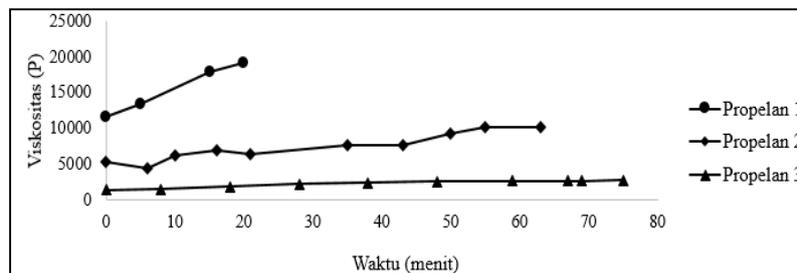
3.1. Pengaruh DOA Terhadap Viskositas Slurry Propelan

Viskositas dari ketiga jenis *slurry* propelan tepat setelah proses *mixing* selesai diukur untuk mengetahui seberapa besar pengaruh %DOA terhadap viskositas *slurry* propelan. Hasil pengukuran ini dapat dilihat pada Tabel 3. Setelah itu dilakukan pengukuran viskositas *slurry* dari waktu ke waktu untuk melihat perubahan nilai viskositas *slurry*. Hasil pengukurannya ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 3. Viskositas Akhir *Mixing* Slurry Propelan

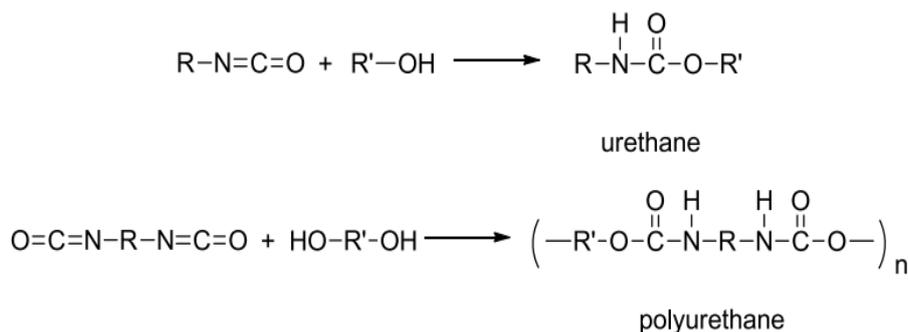
| No | Jenis Propelan | % Berat DOA | Viskositas Akhir <i>Mixing</i> (Poise) | Penurunan Viskositas Akhir <i>Mixing</i> |
|-----|----------------|-------------|--|--|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| 1 | Propelan 1 | 0 | 11600 | - |
| 2 | Propelan 2 | 3 | 5220 | 55% |
| 3 | Propelan 3 | 4 | 1380 | 88% |

Tabel 3 memperlihatkan bahwa semakin besar kandungan DOA, semakin rendah nilai viskositas akhir *mixing* dan semakin besar persentase penurunan viskositas *slurry* propelan. Pada kolom 5 baris 2, *slurry* propelan dengan kandungan DOA 3% mengalami penurunan viskositas sebesar 55%. Nilai ini berbeda dengan yang ditemukan oleh Sutrisno (2010) yang sebesar 52,69% [23]. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh perbedaan spesifikasi bahan dan komposisi propelan seperti persentase *liquid content*, rasio HTPB : TDI, ukuran dan rasio AP yang digunakan, serta sistem *mixing*. Sedangkan pada kolom 4 baris 2 dan 3, viskositas propelan 2 menurun 73,56% yaitu dari 5220 P menjadi 1380 P. Nilai ini juga berbeda dengan yang ditemukan Muthiah et al, yang mana penurunan sebesar 16,67% yaitu dari sekitar 9000 P menjadi 7500 P. Hal ini juga dapat disebabkan oleh perbedaan komposisi yang digunakan yang mana tidak disebutkan mengenai *curing agent* yang digunakan Muthiah et al [16].



Gambar 2. Perubahan nilai viskositas slurry propelan tiap waktu

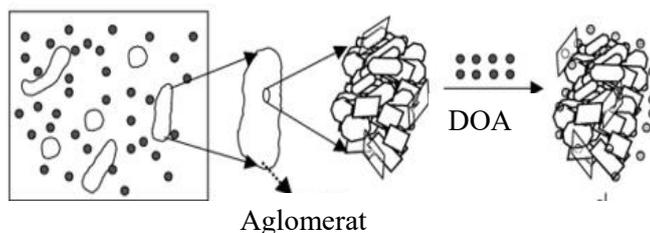
Gambar 2 memperlihatkan bahwa pada setiap waktu pengukuran, *slurry* propelan 3 dengan kandungan DOA lebih tinggi menghasilkan nilai viskositas yang lebih rendah daripada propelan 1 dan propelan 2. Hal ini menunjukkan bahwa DOA berperan dalam penurunan viskositas *slurry*. Berdasarkan Persamaan (3), viskositas *slurry* propelan dipengaruhi oleh isian cair dan isian padat. Dalam hal isian cair, sebelum reaksi polimerisasi terjadi, DOA berfungsi sebagai pelumas yang membuka *coil* rantai HTPB dan mengurangi gaya kohesi HTPB sehingga HTPB menjadi lebih mudah mengalir dan viskositasnya menurun [17], [25], [26].



Gambar 3. Reaksi polimerisasi pembentukan poliuretan [27]

Dalam kaitannya dengan isian padat, mekanisme DOA dapat sebagai penyebab gerak mikro-Brownian dan pemecah aglomerat. Sebagai penyebab gerakan mikro-Brownian, *Gel Theory* dapat diterapkan. Setelah TDI ditambahkan dan reaksi polimerisasi seperti pada Gambar 3 dimulai, DOA dengan parameter solubilitas sebesar $18,2 \text{ (MPa)}^{0,5}$ melarutkan poliuretan yang memiliki parameter solubilitas sebesar $17 - 20 \text{ (MPa)}^{0,5}$. Parameter solubilitas ini mencerminkan interaksi intermolekular seperti interaksi dipol – dipol, gaya dispersi dan *Van Der Waals* [28]. Dalam pelarutan tersebut, gugus fungsi adipat pada DOA yang polar melarutkan gugus uretan yang juga polar. Selain itu, gugus fungsi DOA yang polar tersebut juga dapat mengikat isian padat. Sementara, rantai - rantai hidrokarbon dari senyawa – senyawa DOA cenderung membentuk kluster. Dengan demikian gugus – gugus polar menjadi tidak terlindungi sehingga terbentuk kontak yang kuat antar bagian yang polar. Hal ini juga menghasilkan struktur gel yang bertanggung jawab terhadap sifat alir *slurry* yaitu dengan terbentuknya gerakan mikro-Brownian [17][29]. Dengan demikian, semakin besar kandungan DOA, semakin banyak gerakan mikro-Brownian, maka semakin rendah pula viskositas *slurry* propelan.

Sebagai pemecah aglomerat, DOA diketahui dapat diserap oleh aglomerat (kumpulan partikel padat) dari isian padat (*filler*) yang berupa AP dan Aluminium *powder*. DOA mengisi ruang kosong antar partikel *filler* sehingga aglomerat dapat saling memisah. Dalam hal ini, DOA hanya mendispersi *filler*. Momen dipol DOA (0,0019 D) yang berbeda dengan ion perklorat (1,4008 D) dan ion lauril sulfat (1,9993 D), sebagai zat pelapis AP, membuat DOA tidak dapat melarutkan AP. Saling terpecahnya aglomerat dan lebih terdispersinya *filler* membuat *filler* lebih mudah bergerak dan menyebabkan viskositas *slurry* menjadi turun. Hal ini dijelaskan pada Gambar 4 [17][30].

Gambar 4. Ilustrasi masuknya DOA ke Aglomerat *Filler* [17]

3.2. Pengaruh DOA Terhadap Kenaikan Viskositas *Slurry* Propelan

Oleh karena data *pot-life* berkaitan dengan kemampuan *slurry* propelan dalam mencapai 16000 Poise, maka analisa terhadap peningkatan viskositas *slurry* propelan diperlukan untuk lebih memahami pengaruh DOA terhadap *pot-life*. Gambar 3 memperlihatkan bahwa ketiga jenis propelan mengalami peningkatan viskositas seiring dengan berjalannya waktu akibat dari terjadinya reaksi polimerisasi seperti yang telah dijelaskan pada Gambar 4. Gugus hidroksil (-OH) dari HTPB dan gugus isosianat (-NCO) dari TDI membentuk ikatan uretan. Semakin lama reaksi berlangsung, berat molekul polimer yang dihasilkan semakin bertambah. Pertambahan berat molekul menyebabkan kesulitan rantai – rantai untuk mengalir sehingga meningkatkan viskositas *slurry* propelan [10]. Gambar 3 juga memperlihatkan bahwa kemiringan grafik semakin turun dengan semakin besarnya kandungan DOA. Kemiringan tersebut menggambarkan laju kenaikan viskositas *slurry*. Data laju kenaikan viskositas *slurry* propelan dalam jangka waktu pengukuran disajikan pada Tabel 4.

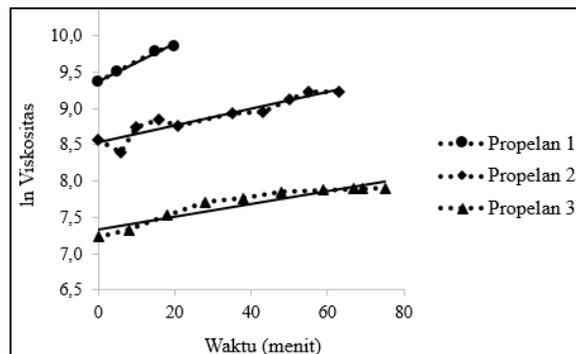
Tabel 4. Data laju kenaikan viskositas *slurry* propelan

| No | Jenis Propelan | η_0 (P) | η akhir (P) | $\Delta\eta$ (P) | Δt (menit) | $\Delta\eta / \Delta t$ (P/menit) | % Penurunan $\Delta\eta / \Delta t$ |
|-----|----------------|--------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| 1 | Propelan 1 | 11600 | 19180 | 7580 | 20 | 379,00 | - |
| 2 | Propelan 2 | 5220 | 10200 | 4980 | 63 | 79,05 | 79 |
| 3 | Propelan 3 | 1380 | 2700 | 1320 | 75 | 17,60 | 95 |

Pada Tabel 4, *slurry* propelan 1 mempunyai nilai laju rata-rata kenaikan viskositas yang paling tinggi di antara ketiga jenis propelan yaitu sebesar 379 poise per menit, sedangkan propelan 3 nilai laju rata-rata kenaikan viskositasnya paling rendah yaitu hanya 17,6 poise per menit. Dengan semakin tingginya kandungan DOA akan semakin rendah pula laju rata-rata kenaikan viskositas *slurry* dan semakin besar persentase penurunan laju rata-ratanya. Hal ini mengindikasikan pengaruh DOA terhadap reaktivitas reaktan. Menurut Wyphych (2012), hal ini dapat disebabkan terjadinya efek pengenceran oleh DOA [17].

3.3. Pengaruh DOA Terhadap Pot-Life Propelan

Pot-life merupakan lamanya waktu yang tersedia untuk dapat mencetak *slurry* propelan dengan viskositas ideal [9], [11], [12]. Viskositas ideal *slurry* propelan untuk sistem pencetakan vakum adalah maksimal 16000 poise. Untuk melihat *pot-life* *slurry* propelan dapat ditentukan melalui Persamaan (5). Persamaan (5) diperoleh dengan membuat grafik antara logaritma natural viskositas vs waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Persamaan yang didapat dari grafik tersebut merupakan persamaan linier dengan tingkat korelasi yang tinggi, sebagaimana yang tersaji pada Tabel 5.

**Gambar 5. Grafik ln Viskositas vs Waktu****Tabel 5. Korelasi persamaan viskositas *build up***

| No | Jenis Propelan | $\ln \eta = k.t + \ln \eta_0$ | R^2 | r | Tingkat Korelasi |
|-----|----------------|-------------------------------|--------|-------|------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| 1 | Propelan 1 | $y = 0,0259x + 9,3683$ | 0,9904 | 0,995 | Sangat Kuat |
| 2 | Propelan 2 | $y = 0,0116x + 8,5284$ | 0,8844 | 0,940 | Sangat Kuat |
| 3 | Propelan 3 | $y = 0,0088x + 7,3384$ | 0,8821 | 0,939 | Sangat Kuat |

Tabel 5 memperlihatkan ditemukannya persamaan linier dengan tingkat korelasi sangat kuat untuk propelan 1, 2 dan 3. Dari persamaan linier tersebut dicari nilai *pot-life* (t) dari *slurry* propelan. Dengan memasukkan nilai logaritma natural dari 16000 poise sebagai variabel y dari persamaan linier tersebut, maka akan diperoleh nilai variabel x sebagai nilai *pot-life* (t menit) dari *slurry* propelan. Hasilnya ditampilkan di dalam Tabel 6.

Tabel 6. *Pot-life* Propelan

| No | Jenis Propelan | $\ln \eta = k.t + \ln \eta_0$ | <i>Pot-life</i> (menit) | Perpanjangan <i>Pot-life</i> |
|-----|----------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| 1 | Propelan 1 | $y = 0,0259x + 9,3683$ | 12,05 | - |
| 2 | Propelan 2 | $y = 0,0116x + 8,5284$ | 99,31 | 7 x |
| 3 | Propelan 3 | $y = 0,0088x + 7,3384$ | 266,13 | 21 x |

Dari Tabel 6, diketahui semakin besar persentase DOA, semakin lama *pot-life* yang dibutuhkan untuk mencapai viskositas 16000 Poise. Dengan penambahan DOA 3%, *pot-life* propelan lebih panjang 7 kali yaitu selama 99,31 menit daripada propelan tanpa kandungan DOA, sedangkan dengan DOA 4%, *pot-life* lebih panjang 21 kali yaitu sebesar 266,13 menit. Menurut penelitian Muthiah et al, *pot-life* untuk mencapai 16000 P ialah selama 2,5 jam untuk propelan dengan 3% DOA dan 3 jam untuk propelan dengan 4% DOA. Perbedaan hasil ini disebabkan oleh perbedaan komposisi yang digunakan yang mana tidak disebutkan mengenai *curing agent* dan bahan aditif lainnya yang digunakan Muthiah et al [16]. Hubungan yang berbanding lurus antara *pot-life* dan konsentrasi DOA disebabkan oleh peran DOA sebagai lubrikan internal HTPB dalam menurunkan viskositas HTPB, sebagai penyebab gerak mikro-Brownian dan pendispersi partikel padatan dalam menurunkan viskositas *slurry*, serta memberikan efek pengenceran dalam menurunkan laju peningkatan viskositas [17].

4. KESIMPULAN

Disimpulkan dari penelitian ini bahwa semakin besar kandungan DOA dalam komposisi propelan, semakin lama *pot-life* propelan tersebut. Dengan penambahan DOA 3%, *pot-life* lebih lama 7 kali, sedangkan dengan DOA 4%, *pot-life* lebih lama 21 kali. Penyebab dari hal ini meliputi peran DOA sebagai lubrikan internal HTPB dalam menurunkan viskositas HTPB, penyebab gerak mikro-Brownian dan pendispersi partikel padatan dalam menurunkan viskositas *slurry* dan memberikan efek pengenceran dalam menurunkan laju peningkatan viskositas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Kendra Hartaya, M.Si selaku Leader WBS Formulasi dan Sintesa Bahan Baku Propelan dan Bayu Prianto, M.T yang telah memberikan bimbingan, motivasi, saran dan dukungan atas tersusunnya karya tulis ilmiah ini, serta para teknisi Laboratorium Komposisi Dasar Propelan, Pusat Teknologi Roket, LAPAN atas bantuan dan dukungannya dalam penelitian ini.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Uji Statik Booster RKX-200 EDF/TJ," Pusat Teknologi Roket LAPAN, 2014. [Online]. Available: <http://pustekroket.lapan.go.id/index.php/subblog/read/2014/31/Uji-Statik-Booster-RKX-200-EDFTJ/berita>.
- [2] S. P. Laksono and Hakiki, "Prediksi Letak Pusat Gravitasi RKX 200 TJ Booster," in Seminar Nasional IPTEK Penerbangan dan Antariksa XX-2016, 2016, pp. 1–8.
- [3] D. Setyaningsih, "Propelan Padat Komposit," Ber. Dirgant., vol. 8, no. 4, 2007.
- [4] "Rancang Bangun Roket dengan Banyak Fungsi dan Biaya Murah," 2009. [Online]. Available: www.kesimpulan.com.
- [5] A. K. Mahanta, M. Goyal, and D. D. Pathak, "Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry," E-Journal Chem., vol. 7, no. 1, pp. 171–179, 2010.
- [6] S. Remakanthan, M. Kk, R. Gunasekaran, C. Thomas, and C. R. Thomas, "Analysis of Defects In Solid Rocket Motors Using X-Ray Radiography," e-Journal Nondestruct. Test., vol. 20, no. 6, 2015.
- [7] H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. W. F.R.S, "An Introduction to Rheology." Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, p. 11, 1989.

- [8] Y. Ke-xi, T. Ze-ming, and W. Guo-juan, "Viscosity Prediction," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, vol. 11, no. 6, pp. 167–169, 1986.
- [9] G. Dombe, M. Jain, P. P. Singh, K. K. Radhakrishnan, and B. Bhattacharya, "Pressure casting of composite propellant," *Indian J. Chem. Technol.*, vol. 15, pp. 420–423, 2008.
- [10] R. Gogoi, M. S. Alam, and R. K. Khandal, "Effect of Increasing NCO/OH Molar Ratio on The Physicomechanical and Thermal Properties of Isocyanate Terminated Polyurethane Prepolymer," *Int. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 118–123, 2014.
- [11] T. Chai, Y. C. Liu, H. Ma, Y. W. Yu, J. M. Yuan, J. H. Wang, and J. H. Guo, "Rheokinetic Analysis on The Curing Process of HTPB-DOA- MDI Binder System," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 137, pp. 1–7.
- [12] V. Rodic and M. Petric, "The Effect of Additives on Solid Rocket Propellant Characteristics," *Sci. Tech. Rev.*, vol. LIV, no. 3–4, pp. 9–14, 2004.
- [13] S. K. Manu, "Glycidyl Azide Polymer (GAP) as a High Energy Polymeric Binder for Composite Solid Propellant Applications," 2009.
- [14] S. N. Jawalkar, Mehilal, R. Kurva, P. P. Singh, and B. Bhattacharya, "Influence of bicurative on processibility of composite propellant," *Def. Sci. J.*, vol. 57, no. 5, pp. 669–675, 2007.
- [15] A. Aziz, R. Mamat, K. W. Ali, and M. R. M. Perang, "Review on Typical Ingredients For Ammonium Perchlorate Based Solid Propellant," *ARNP J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 15, pp. 6188–6191, 2015.
- [16] R. Muthiah, U. I. Somasundaran, T. L. Verghese, and V. A. Thomas, "Energetics and compatibility of plasticizers in composite solid propellants," *Def. Sci. J.*, vol. 39, no. 2, pp. 147–155, 1989.
- [17] G. Wypych, *Handbook of Plasticizers*, 2nd ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2012.
- [18] M. Kohga, "From Cross-linking to Plasticization – Characterization of Glycerin/HTPB Blends." *Propellants Explosives Pyrotechnics* 34(5), pp. 436 – 443, 2009.
- [19] H. Li, J. Wang, and C. An, "Study on the Rheological Properties of CL-20 / HTPB Casting Explosives," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 11, no. 2, pp. 237–255, 2014.
- [20] C. Wilkes, C. Daniels, and J. Summers, *Plasticizers*. Ohio: Hanser, 2005.
- [21] D. Kumari, R. Balakshe, S. Banerjee, and H. Singh, "Energetic Plasticizers for Gun & Rocket Propellants 1," vol. 2, no. 3, pp. 240–262, 2012.
- [22] A. Wypych, *Plasticizer Databook*. Toronto: ChemTec Publishing, 2013.
- [23] Sutrisno, "Pengaruh penambahan plasticizer doa terhadap kinerja propelan htpb," in *Prosiding SIPTEKGAN XIV*, 2010, pp. 123–127.
- [24] Sugiyono, *Statistika untuk Penelitian*. Bandung: Penerbit Alfabeta, 2011.
- [25] M. S. Fulmer, "Introduction to Lubricants and Additives for Polymer Compounds." 2000.
- [26] A. K. Mahanta and P. K. Pattnayak, "Green analytical methods for determination of intrinsic viscosity of hydroxyl terminated polybutadiene," vol. 6, no. 9, pp. 2377–2385, 2015.
- [27] A. H. Telli, "Synthesis and Characterization of Toluene Diisocyanate," *Kırıkkale*, 2014.

- [28] D. G. Peiffer, "The Molecular Factors Affecting The Solubility Parameter," J. Appl. Polym. Sci., vol. 25, pp. 369–380, 1980.
- [29] J. F. Brady and G. Bossis, "The rheology of concentrated suspensions of spheres in simple shear flow by numerical simulation," J. Fluid Mech, vol. 155, pp. 105–129, 1985.
- [30] R. J. Fessenden and J. S. Fessenden, Kimia organik. Jakarta: Erlangga, 1997.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS 1

DATA UMUM

Nama Lengkap : Afni Restasari
Tempat & Tgl. Lahir : Semarang, 7 September 1986
Jenis Kelamin : Perempuan
Instansi Pekerjaan : Pusat Teknologi Roket, LAPAN
NIP. / NIM. : 19860907 201504 2 001



DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMU N 11 Semarang Tahun: 2004
STRATA 1 (S.1) : Universitas Diponegoro Tahun: 2009

ALAMAT

Alamat Kantor / Instansi : Jalan Raya LAPAN, Kel. Mekarsari, Kec. Rumpin, Kab. Bogor
Email : afnichemist@gmail.com

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS 2

DATA UMUM

Nama Lengkap : Luthfia Hajar Abdillah
Tempat & Tgl. Lahir : Surabaya, 3 Januari 1986
Jenis Kelamin : Perempuan
Instansi Pekerjaan : Pusat Teknologi Roket, LAPAN
NIP. / NIM. : 19860103 200901 2 005



DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMU N 5 Surabaya Tahun: 2004
STRATA 1 (S.1) : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya Tahun: 2008

ALAMAT

Alamat Kantor / Instansi : Jalan Raya LAPAN, Kel. Mekarsari, Kec. Rumpin, Kab. Bogor
Email : lu_haab@yahoo.com