

PENELITIAN LAJU KENAIKAN VISKOSITAS DENGAN *IMPELLER* BALING – BALING DAN JANGKAR DALAM PENGEMBANGAN KOMPOSISI *BINDER PROPELAN*

Afni Restasari

Pusat Teknologi Roket, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

afni.restasari@lapan.go.id

Abstrak

Bentuk *impeller* yang digunakan dalam pengadukan diketahui mempengaruhi kesempurnaan pengadukan *Hidroxy Terminated Polybutadiene* (HTPB) dan *Toluene diisocyanate* (TDI) dalam menghasilkan prepolimer untuk menentukan komposisi binder propelan. Penentuan bentuk *impeller* terbaik dapat dilakukan dengan menganalisa pengaruh persentase massa TDI terhadap laju kenaikan viskositas. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui jenis dan tingkatan korelasi antara persentase massa TDI dengan laju kenaikan viskositas pada prepolimer yang dibuat dengan menggunakan *impeller* baling – baling dan jangkar, agar dapat ditentukan bentuk *impeller* terbaik untuk pengadukan HTPB dan TDI. Dalam penelitian ini, dibuat prepolimer A dan B dengan rasio massa HTPB : TDI 15:1, 16:1, 17:1 dan 18:1. Prepolimer A menggunakan *impeller* baling – baling, sedangkan prepolimer B menggunakan *impeller* jangkar. HTPB dan TDI diaduk dengan kecepatan 100 rpm selama 10 menit pada suhu 45 °C, diukur viskositasnya, diaduk kembali selama 10 menit lalu viskositas diukur. Laju kenaikan viskositas dihitung, grafik hubungan antara persentase massa TDI dengan laju kenaikan viskositas dibuat, persamaan linier dan tingkat korelasinya ditentukan. Diketahui terdapat korelasi yang positif antara persentase massa TDI dan laju kenaikan viskositas baik pada prepolimer A maupun prepolimer B. Pada prepolimer A, korelasi tersebut menghasilkan persamaan $y = 0,004x - 0,016$ dengan tingkat korelasi sangat rendah. Sedangkan pada prepolimer B, korelasi tersebut menghasilkan persamaan $y = 0,002x - (6.10^{-5})$ dengan tingkat korelasi yang rendah. Berdasarkan tingkat korelasinya yang lebih tinggi, maka disimpulkan bahwa *impeller* bentuk jangkar lebih baik digunakan daripada *impeller* bentuk baling – baling dalam pengadukan HTPB dan TDI sebagai binder propelan.

Kata Kunci : Prepolimer, *Impeller*, Laju kenaikan viskositas.

Abstract

The shape of the impeller used in the mixing is known to affect the mixing's perfection of Hydroxy Terminated Polybutadiene (HTPB) and Toluene diisocyanate (TDI) in producing prepolymer to determine the propellant's binder composition. Determination of the best impeller shape can be done by analyzing the effect of the percentage of TDI's mass on the rate of increasing viscosity. Therefore, the aim of this study is to know the correlation's type and level between the percentage of TDI's mass and the rate of increasing viscosity of prepolymers that are made by using propeller and anchor impeller, so that the best impeller's shape for mixing HTPB and TDI can be determined. In this study, prepolymers were made with mass ratios HTPB: TDI 15: 1, 16: 1, 17: 1 and 18: 1. Prepolymer A using propeller impeller and prepolymer B using anchor impeller. HTPB and TDI were stirred with speed of 100 rpm for 10 minutes at a temperature of 45 °C, its viscosity was measured, stirred again for 10 minutes and its viscosity was measured again. Rate of increasing viscosity were counted, correlation graphs between the mass percentage of TDI and rate of increasing viscosity were made and the level of correlation were determined. It is found that there is a positive correlation between the percentage of TDI's mass and rate of increasing viscosity on both of prepolymer A and B. In the prepolymer A, the correlation yields the equation $y = 0,004x - 0,016$ with a very low degree of correlation. While the prepolymer B, this correlation yields the equation $y = 0,002x - (6.10^{-5})$ with low correlation. Based on its higher correlation level, it is concluded that the anchor impeller is better to be used than propeller impeller in mixing HTPB and TDI as a propellant's binder.

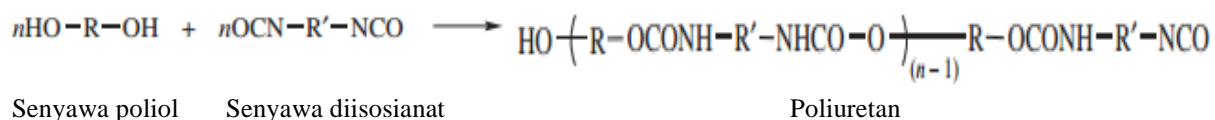
Keywords : Prepolymer, Impeller, Rate of increasing viscosity.

1. PENDAHULUAN

Propelan yang kini dikembangkan oleh LAPAN adalah propelan padat komposit yang tergolong dalam propelan heterogen. Dalam propelan heterogen, *binder* berperan sebagai pengikat *solid content* yang meliputi oksidator seperti Amonium perklorat dan bahan bakar logam seperti serbuk Aluminium[1][2][3]. *Binder* juga sangat berkontribusi pada sifat mekanik propelan, seperti kekerasan, kuat tarik dan elastisitas. Sifat mekanik ini penting untuk propelan dapat bertahan pada berbagai tipe tekanan selama penanganan dan transportasi, pensiklusian termal, penekanan dadakan saat pemantikan dan percepatan selama penerbangan motor roket[4][5]. Jenis binder yang digunakan LAPAN adalah *poliuretan*.

Poliuretan mengandung ikatan uretan. Jenis ikatan ini dipilih sebagai *binder* propelan karena memberikan matriks yang baik untuk oksidator anorganik, bahan bakar logam dan bahan lain yang terdistribusi dalam propelan padat. *Poliuretan* tersebut juga memiliki stabilitas terhadap hidrolisis yang baik, penyerapan terhadap air yang rendah, fleksibilitas pada temperatur rendah yang baik, kecocokan yang tinggi dengan pengisi dan *extender* serta fleksibilitas yang baik terhadap formulasi[1][6][7]. *Dey et al* melaporkan bahwa *poliuretan* HTPB juga memiliki kemampuan mengabsorpsi guncangan (*shock*) sehingga menurunkan sensitivitas dan kerentanan dari material peledak[1][8].

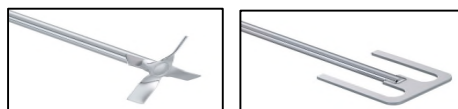
Poliuretan terbentuk melalui proses polimerisasi yang mana gugus hidroksil bereaksi dengan gugus isosianat[9]. Dalam hal ini, gugus hidroksil berasal dari HidroxyTerminated Polybutadiene (HTPB) dan gugus isosianat berasal dari *Toluene diisocyanate* (TDI). Reaksi pembentukan ikatan uretan ditunjukkan pada Gambar 1-1. Komposisi binder sangat mempengaruhi karakteristik jaringan *poliuretan* yang terbentuk sehingga sangat mempengaruhi pula sifat mekanik propelan yang dihasilkan[10]. Oleh karena itu, penelitian untuk menentukan komposisi binder yang terbaik untuk propelan selalu dilakukan sebelum pembuatan propelan dilaksanakan.



Gambar 1-1. Reaksi pembentukan *poliuretan*[9].

Penelitian untuk menentukan komposisi binder terbaik propelan dilakukan dengan mengaduk HTPB dan TDI dengan berbagai rasio massa. Prepolimer poliuretan yang dihasilkan dimatangkan kemudian diuji tarik. Komposisi prepolymer dengan hasil uji tarik yang terbaik selanjutnya digunakan sebagai komposisi binder propelan.

Karakteristik *prepolimer – prepolymer* yang mewakili komposisinya dapat dihasilkan dari proses pengadukan yang sempurna. Hal ini didukung dengan pernyataan Jayesh R *Techchandaney*, bahwa pengadukan merupakan proses yang sangat penting dan mempengaruhi kualitas dari produk akhir, dalam hal ini *prepolimer* [11]. Pengadukan yang sempurna dipengaruhi oleh ketepatan pemilihan jenis alat, salah satunya adalah bentuk *impeller* pengaduk yang merupakan bagian yang berputar dan terletak di ujung pengaduk yang berhubungan langsung dengan campuran yang diaduk[12]. Pengaduk yang kini dimiliki oleh Laboratorium Komposisi Dasar ialah pengaduk dengan *impeller* bentuk baling – baling dan jangkar, seperti terlihat pada Gambar 1-2.



Gambar 1-2. Pengaduk dengan *impeller* baling-baling (kiri) dan jangkar (kanan)[13]

Bentuk *impeller* ini berkaitan dengan penyebaran energi di dalam wadah. Diketahui bahwa daerah yang paling banyak mendapatkan energi ialah di sekitar ujung *impeller* dan daerah yang paling rendah energinya ialah daerah yang paling jauh dari ujung *impeller*. Untuk *impeller* bentuk baling – baling, diketahui apabila diameter baling - baling 50% dari diameter wadah, maka rasio energi tertinggi dan energi terendah mencapai lebih dari 500 : 1. Semakin kecil rasio diameter baling - baling dengan diameter wadah, semakin tinggi rasio energi tersebut hingga apabila diameter baling - baling kurang dari 10% diameter wadah, maka rasio energi tersebut dapat mencapai 2000 : 114. Energi tersebut sangat penting untuk dimulainya reaksi polimerisasi, karena reaksi baru akan berhasil apabila energi minimal yang dibutuhkan untuk bereaksi (energi aktivasi) dapat terpenuhi[15].

Kesempurnaan pengadukan dengan penggunaan bentuk *impeller* pengaduk yang tepat dapat diketahui dengan didapatkannya grafik persentase massa TDI versus laju kenaikan viskositas yang berkorelasi positif. Hal ini karena Dairanieh (2004) mengungkapkan bahwa laju kenaikan viskositas lebih dipengaruhi oleh geometri pengaduk daripada temperatur[16]. Korelasi yang positif tersebut sudah seharusnya dihasilkan karena proses polimerisasi antara HTPB dan TDI menyebabkan kenaikan berat molekul poliuretan sehingga menyebabkan kenaikan viskositas prepolimer cair[17]. Banyaknya TDI yang direaksikan berbanding lurus dengan laju pembentukan poliuretan. Dengan demikian, semakin banyak TDI yang direaksikan, semakin besar pula laju kenaikan viskositas prepolimer cair[15]. Laju kenaikan viskositas ini dapat diperoleh dari Persamaan 1, yang mana $d\eta/dt$ ialah laju kenaikan viskositas, η adalah viskositas dan t adalah waktu[18].

$$d\eta/dt = (\eta_2 - \eta_1) / t \quad [18] \quad (1)$$

Dengan demikian, ketepatan pemilihan *impeller* dalam pengadukan dapat dianalisa dari pengaruh persentase massa TDI terhadap laju kenaikan viskositas prepolimer. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui jenis dan tingkatan korelasi antara persentase massa TDI dengan laju kenaikan viskositas pada prepolimer yang dibuat dengan menggunakan *impeller* baling – baling dan jangkar, agar dapat ditentukan bentuk *impeller* terbaik untuk pengadukan HTPB dan TDI.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. BAHAN DAN ALAT

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah HTPB dengan bilangan hidroksil 47 mg KOH/g dan TDI dengan perbandingan massa 15 : 1, 16 : 1, 17 : 1 dan 18 : 1 dengan persentase TDI seperti ditunjukkan pada Tabel 2-1. Persentase tersebut didapat dari Persamaan (2) dan contoh perhitungannya sebagai berikut:

$$\% \text{ Massa TDI} = (\text{Bagian TDI} : (\text{Bagian TDI} + \text{Bagian HTPB})) \cdot 100\% \quad (2)$$

Contoh perhitungan:

Pada rasio HTPB : TDI 15 : 1, bagian TDI ialah 1 dan bagian dari HTPB sebesar 15. Sehingga % massa TDI dapat dihitung dengan cara:

$$\% \text{ Massa TDI} = (1 / (1 + 15)) \cdot 100\% = (1/16) \cdot 100\% = 6,25\%$$

Tabel 2-1. Komposisi dan Persentase Massa TDI

HTPB : TDI	Persentase Massa TDI
15 : 1	6,25
16 : 1	5,88
17 : 1	5,55
18 : 1	5,26

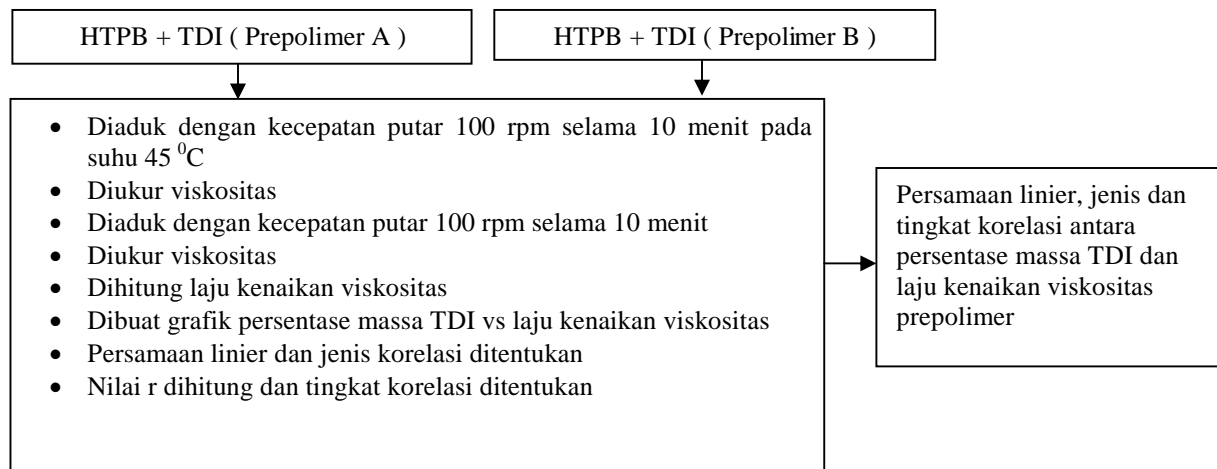
Dalam penimbangan, alat yang digunakan berupa timbangan digital, gelas *beaker* dan spatula. Pemanasan dilakukan dengan *water bath*. Sementara, pengukuran suhu dilakukan dengan menggunakan termometer. IKA *Mechanical Stirer* RW 20 digital dengan *impeller* pengaduk tipe baling – baling IKA R 1342 dan *impeller* pengaduk tipe jangkar IKA R 1330 digunakan dalam pengadukan. Spesifikasi kedua *impeller* tersebut ditunjukkan pada Tabel 2-2. Viskositas diukur dengan *Rion Viscometer* VT 04F *Spindle* 01.

Tabel 2-2. Spesifikasi *Impeller* Pengaduk[13]

Spesifikasi	Baling - Baling	Jangkar
Diameter <i>impeller</i> (mm)	50	45
Diameter batang pengaduk (mm)	8	8
Panjang batang pengaduk	350	350
Kecepatan maksimum (rpm)	2000	1000
Tipe aliran	Aksial	Tangensial

2.2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dibuat dua jenis prepolimer yaitu prepolimer A dan prepolimer B. Prepolimer A dibuat dengan pengadukan menggunakan *impeller* jenis baling – baling. Sementara, prepolimer B dibuat dengan pengadukan menggunakan *impeller* jenis jangkar. Skema kerja dijabarkan seperti Gambar 2-1 di bawah ini. Perhitungan persentase besarnya korelasi dan koefisien korelasi ditentukan berturut – turut dengan Persamaan (3) dan (4). Sementara, penentuan tingkat korelasi berdasarkan Tabel 2-3.



Gambar 2-1. Alur kerja penelitian

$$\% r^2 = r^2 \times 100\% [19] \quad (3)$$

$$r = (r^2)^{1/2} [19] \quad (4)$$

Tabel 2-3. Tingkatan Korelasi

Nilai r	Tingkatan
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 [19]

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. HASIL

Dalam penelitian ini dibuat dua jenis prepolimer yaitu prepolimer A dan prepolimer B. Prepolimer merupakan sebutan untuk hasil pengadukan HTPB dan TDI yang mana reaksi polimerisasinya belum sempurna. Prepolimer A dibuat dengan pengadukan menggunakan *impeller* jenis baling – baling. Sementara, prepolimer B dibuat dengan pengadukan menggunakan *impeller* jenis jangkar. Prepolimer yang dibuat berbahan HTPB dan TDI sesuai komposisi dasar binder propelan padat komposit yang sedang dikembangkan LAPAN. Selama pengadukan, gugus hidroksil dari HTPB bereaksi dengan gugus isosianat dari TDI membentuk poliuretan seperti persamaan kimia pada Gambar 1-1[9]. Menurut Gogoi *et al*, semakin lama polimerisasi yang terjadi selama pengadukan, berat molekul poliuretan yang terbentuk semakin besar sehingga mengakibatkan peningkatan viskositas prepolimer cair[17].

Sebelum pengadukan, viskositas HTPB diukur dan datanya tersaji pada Tabel 3-1 dan Tabel 3-2 kolom 3. Viskositas prepolimer dalam penelitian ini diukur dua kali. HTPB dan TDI diaduk selama 10 menit lalu diukur viskositasnya. Data hasil pengukuran viskositas yang pertama ini pada prepolimer A disampaikan pada Tabel 3-1 kolom 4. Sementara pada prepolimer B disampaikan pada Tabel 3-2 kolom 4. Prepolimer kemudian diaduk lagi selama 10 menit dan diukur kembali viskositasnya. Data hasil pengukuran viskositas yang kedua ini pada prepolimer A disampaikan pada Tabel 3-1 kolom 5. Sementara pada prepolimer B disampaikan pada Tabel 3-2 kolom 5. Gambar 3-1 memperlihatkan proses pengadukan. Sementara Gambar 3-2 memperlihatkan pengukuran viskositas dengan Viskometer Rion VT 04F*Spindle* 01.



Gambar 3-1. Pengadukan HTPB dan TDI



Gambar 3-2. Pengukuran viskositas prepolimer dengan viskometer rion VT 04F*Spindle* 01

Tabel 3-1. Data Viskositas dan Laju Kenaikan Viskositas Prepolimer A

Rasio HTPB : TDI	Persentase Massa TDI	Viskositas HTPB awal (poise)	Prepolimer A		
			Viskositas (poise)		Laju Kenaikan Viskositas (P/s)
			t=10'	t=20'	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
15:1	6,25	49	39	40,0	0,0017
16:1	5,88	49	34	48,0	0,0233
17:1	5,55	49	36	42,0	0,0100
18:1	5,26	49	34	40,0	0,0100

Tabel 3-2. Data Viskositas dan Laju Kenaikan Viskositas Prepolimer B

Rasio HTPB : TDI	Persentase Massa TDI	Viskositas HTPB awal (poise)	Prepolimer A		
			Viskositas (poise)		Laju Kenaikan Viskositas (P/s)
			t=10'	t=20'	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
15:1	6,25	49	36	43,0	0,0117
16:1	5,88	49	35	45,0	0,0167
17:1	5,55	49	34	42,0	0,0133
18:1	5,26	49	38	44,0	0,0100

3.2. PEMBAHASAN

Setelah mendapatkan data viskositas hasil pengukuran pertama dan kedua, laju kenaikan viskositas dihitung dengan menggunakan Persamaan (1). Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3-1 untuk prepolimer A dan Tabel 3-2 untuk prepolimer B, masing – masing pada kolom 6. Contoh perhitungan untuk data pada Tabel 3-1 nomor 1 ialah sebagai berikut :

Diketahui: $\eta_2 = 40.0 \text{ P}$; $\eta_1 = 39 \text{ P}$; $t = 10 \text{ menit} = 600 \text{ detik}$.

Maka, laju kenaikan viskositas sebesar:

$$d\eta/dt = (\eta_2 - \eta_1) / t = (40-39) / 600 = 0,0017 \text{ P / s.}$$

Kemudian, grafik persentase massa TDI versus laju kenaikan viskositas pada prepolimer A dapat dilihat pada Gambar 3-3. Grafik tersebut pada prepolimer B disajikan pada Gambar 3-4. Grafik beserta persamaan linier dan nilai r^2 tersebut dibuat dengan bantuan Microsoft Excel. Besarnya pengaruh persentase massa TDI terhadap laju kenaikan viskositas ($\% \dot{\eta}$) dihitung dengan Persamaan (2). Sementara koefisien korelasi dihitung dengan Persamaan (3). Koefisien korelasi ini kemudian dikelompokkan berdasarkan Tabel 2-3 untuk mengetahui tingkat korelasinya. Contoh perhitungan disajikan di bawah ini. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 3-3.

Diketahui, r^2 pada prepolimer A sebesar 0,031. Maka, persentase besarnya korelasi didapat dari perhitungan:

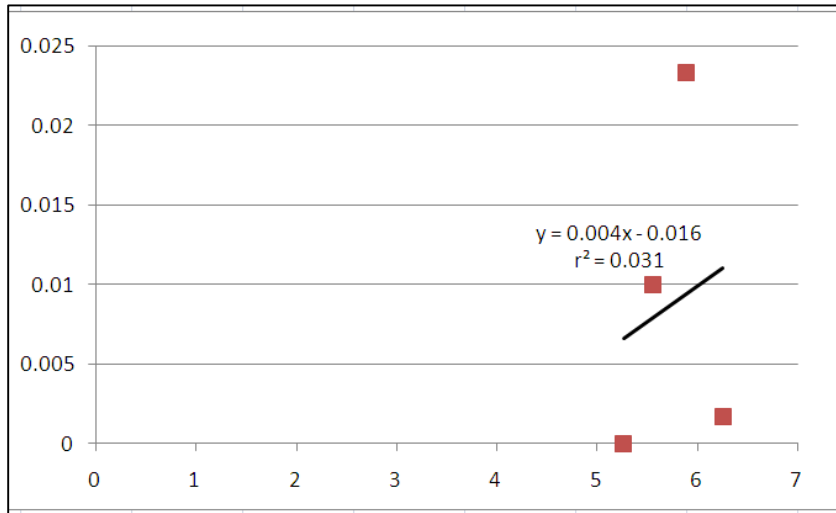
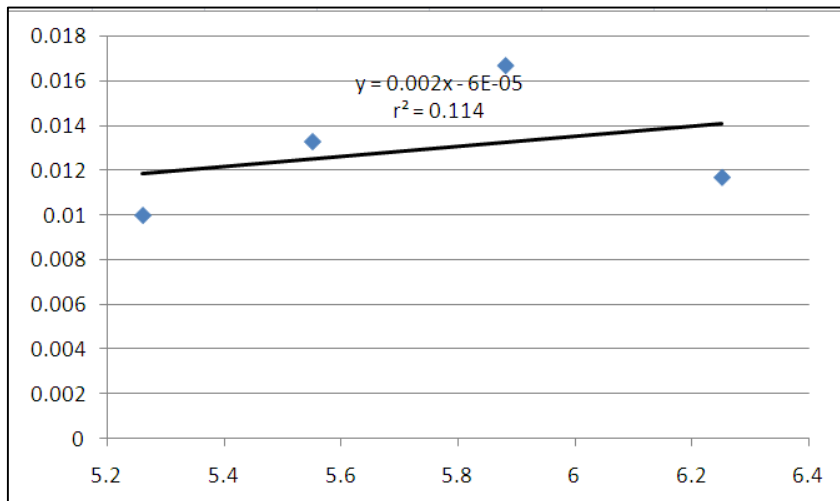
$$\% r^2 = r^2 \times 100\% = 0,031 \times 100\% = 3,1\%$$

Sedangkan, koefisien korelasi didapat dari perhitungan:

$$r = (r^2)^{1/2} = (0,031)^{1/2} = 0,17607.$$

Tabel 3-3. Data Korelasi antara Persentase Massa TDI vs Laju Kenaikan Viskositas

Jenis Prepolimer	Persamaan Linier	Besarnya Korelasi	Koefisien Korelasi	Tingkat Korelasi
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
A	$y = 0,004x - 0,016$	3,1%	0,17607	Sangat Rendah
B	$y = 0,002x - (6.10^{-5})$	11,4%	0,3376	Rendah

**Gambar 3-3. Grafik persentase massa TDI versus laju kenaikan viskositas pada prepolimer A****Gambar 3-4. Grafik persentase massa TDI versus laju kenaikan viskositas pada prepolimer B**

Pada Tabel 3-3 kolom 2, koefisien x yang positif pada persamaan linier baik pada prepolimer A maupun B menunjukkan bahwa persentase massa TDI berbanding lurus dengan laju kenaikan viskositas prepolimer. Hal ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Gogoi *et al* (2010)[17]. Namun pada kolom 3 Tabel 3-3, terlihat persentase pengaruh massa TDI terhadap laju kenaikan viskositas prepolimer A lebih kecil daripada pada prepolimer B. Pada kolom 5 Tabel 3-3 terlihat bahwa tingkat korelasi hubungan antara persentase massa TDI dan laju kenaikan viskositas prepolimer A lebih rendah daripada prepolimer B. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan *impeller* baling – baling dalam mengaduk HTPB

dan TDI kurang sesuai dibanding dengan *impeller* bentuk jangkar. Penyebabnya dapat berupa kekurang efektifan *impeller* baling – baling dalam menyebarkan energi yang diperoleh dari pemanasan pada bagian bawah wadah ke seluruh campuran di dalam wadah. Menurut *Equip Solution Team*, daerah yang paling banyak mendapatkan energi ialah di sekitar ujung *impeller* dan daerah yang paling rendah energinya ialah daerah yang paling jauh dari ujung *impeller*[14]. Energi tersebut penting untuk memulai reaksi polimerisasi[15].

4. KESIMPULAN

Dari uraian subbab pembahasan yang disajikan pada Tabel 3-3 terdapat korelasi yang positif antara persentase massa TDI dan laju kenaikan viskositas baik pada prepolimer A maupun prepolimer B. Pada prepolimer A, korelasi tersebut menghasilkan persamaan $y = 0,004x - 0,016$ dengan tingkat korelasi sangat rendah. Sedangkan pada prepolimer B, korelasi tersebut menghasilkan persamaan $y = 0,002x - (6.10^{-5})$ dengan tingkat korelasi yang rendah. Berdasarkan tingkat korelasinya yang lebih tinggi, maka disimpulkan bahwa *impeller* bentuk jangkar lebih baik digunakan daripada *impeller* bentuk baling – baling dalam pengadukan HTPB dan TDI sebagai *binder* propelan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Teknologi Roket Drs.Sutrisno, M.Si, dan Koordinator Lab. Komposisi Dasar Drs. Kendra Hartaya, M.Si yang telah memberikan bimbingan atas tersusunnya karya tulis ilmiah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh staf Laboratorium Komposisi Dasar atas kerjasama dan terlaksananya penelitian ini.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi menjadi tanggungjawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) Restasari, A., R. Ardianingsih, dan L. H. Abdillah, 2015, *Pengaruh Massa Hidroxy Terminated Polybutadiene (HTPB) Terhadap Besarnya Pengaruh Vinil Dalam Meningkatkan Laju Kenaikan Viskositas Dan Kekerasan Binder Propelan Padat Komposit (The Effects Of Hidroxy Terminated Polybutadiene (HTPB)`s Mass On The Magnitude Of Vynil` Effects In Increasing Composite Solid Propellant Binder`S Rate Of Increasing Of Viscosity And Hardness)* Jurnal Teknologi Dirgantara, Vol. 13 no. 1, PP. 61 – 70.
- 2) Susanto, A., dan L. H. Abdillah, 2014, *Propelan dan Teknologi Pembuatannya*, Berita Dirgantara, Vol. 15 no. 2, PP. 50 - 57.
- 3) Sutton, G. P., dan O. Biblarz, 2001, *Rocket Propulsion Elements*. John Willey & Son, California.
- 4) Mahanta, A. K., dan D. D. Pathak, 2012, *HTPB-Polyurethane: A Versatile Fuel Binder for Composite Solid Propellant*, Polyurethane, Dr. Fahmina Zafar (Ed.), ISBN: 978-953-51-0726-2, InTech, DOI: 10.5772/ 47995, PP. 229- 230, tersedia di: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/38599.pdf>, diakses Juli 2015.

- 5) Restasari, A., R. Ardianingsih, dan L. H. Abdillah, 2015, *Effects of Toluene Diisocyanate`s Chemical Structure on Polyurethane`s Viscosity and Mechanical Properties for Propellant* Proceeding ISAST III 2015 International Seminar of Aerospace and Technology, Development of Aeronautics and Space Technology to Support Maritime Application, PP. 59 – 67.
- 6) Mahanta, A. K., M. Goyal, dan D. D. Pathak, 2010, *Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry*, E-Journal of Chemistry, Vol. 7 no 1, PP. 171 – 179.
- 7) Sadeghi, G. M. M., J. Morshedian, dan M. Barikani, 2006, *The Effect of Solvent on the Microstructure, Nature of Hydroxyl End Groups and Kinetics of Polymerization Reaction in Synthesis of Hydroxyl Terminated Polybutadiene*. Reactive and Functional Polymers, Vol. 66, PP. 255 - 266.
- 8) Dey, A., S. Khan, J. Athar, dan S. Chattopadhyay, 2015, *Effect of Microstructure on HTPB Based Polyurethane (HTPB-PU)*, Journal of Materials Science and Engineering B, Vol. 5 (3-4), PP. 145-151.
- 9) Odian, G., 2004, *Principles of Polimerization 4th Edition*, John Wiley & Sons Inc, Canada.
- 10) Rosita, G., 2014, *Pengaruh Perbandingan HTPB Lokal dengan Toluen Diisiosianat dan Persentase Fuel Binder Pada Pembuatan Propelan. Hasil Penelitian dan Pemikiran Ilmiah tentang Teknologi Pesawat Terbang Tanpa Awak, Roket serta Satelit 2014*. Indonesia Book Project, Jakarta. PP. 171 – 180.
- 11) Tekchandaney, J. R., 2012, *Knowing What`s Next in Mixing of High Viscosity Materials*, Unique Mixers and Furnaces Pvt Ltd, India.
- 12) Pierce, S., 2014, *Mixer Basics*, tersedia di: www.blog.mixerdirect.com, diakses April 2016.
- 13) IKA, 2016. *Data Sheet R 1342 Propeller Stirrer 4-Bladed and R 1330 Anchor Stirrer*, tersedia di: www.IKA.com, diakses Maret 2016.
- 14) EquipSolutions Team, 2012, *Understanding Polymer Activation Principles*, EquipSolutions, <http://equip-solutions.net/wpcontent/uploads/2012/02/TempestEQSPolymerActivationMechanics.pdf> , diakses April 2016.
- 15) Malone, L. J., dan T. O. Dolter, 2010, *Basic Concepts of Chemistry 8th Edition*. John Wiley and Sons, USA.
- 16) Dairanieh, 2004, *Viscosity buildup in condensation reaction: Reaction conditions and reactor size effects*. Society of Plastics Engineers, Vol 31 Issue 5. PP. 376 – 380. tersedia di: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.760310509/pdf>, diakses April 2016.
- 17) Gogoi, R., M. S. Alam, dan R. K. Khandal, 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, Vol. 3 no. 2. PP. 118-123.
- 18) Vandenbossche, L., L. Dupr´ea, dan J. Melkebeeka, 2007, *On-line Cure Monitoring of Polyurethane Foams by Dielectrometric Viscosity Measurements*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 25. PP. 589 – 593.
- 19) Sugiyono, 2011, *Statistika Untuk Penelitian*, Penerbit Alfabeta, Bandung.