

**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 `S EFFECTS IN INCREASING COMPOSITE
SOLID PROPELLANT BINDER `S RATE OF INCREASING
OF VISCOSITY AND HARDNESS)**

Afni Restasari, Retno Ardianingsih, Luthfia Hajar Abdillah

Pusat Teknologi Roket

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jalan Raya LAPAN Rumpin Bogor Indonesia

e-mail: afni.restasari@lapan.go.id

Diterima 3 April 2015, Direvisi 14 April 2015, Disetujui 17 April 2015

ABSTRACT

Good viscosity and hardness of composite solid propellant are able to produce a good performance. Those characteristics of propellant are increased with the increase in HTPB's vinyl content in propellant *binder*. The magnitudes of vinyl's effects depend on the mass percentage of HTPB in *binder* that changed when the hydroxyl number of HTPB and isocyanate number of curing agent changed. Therefore, this study aims to study the degree of correlation and the influence of the HTPB's mass percentage in propellant's *binder* to the magnitude of the increase in the rate of increasing of viscosity and hardness as a result of the increase in HTPB's vinyl content. In this study, *binder* B containing HTPB B with 25% vinyl were made and compared with *binder* A containing HTPB A with 59% vinyl. *Binder* compositions include mass ratio HTPB / TDI (Toluene diisocyanate) 10: 1, 11: 1, 12: 1, 13: 1, 14: 1 and 15: 1. *Binder*'s viscosities at the first and second 10 minutes of stirring and *binder*'s hardness after 2 days of curing were tested and its difference values between on *binder* A and B were counted. The graphs of % mass of HTPB versus the differences in the rate of increasing of viscosity and % mass of HTPB versus the differences in hardness were made to obtain % level of influence and the degree of correlation. It was found that there is a positive relationship between % mass of HTPB with the increase in *binder*'s rate of increasing of viscosity and the increase in *binder*'s hardness because of the increasing vinyl content. Mass percentage of HTPB 83.7% strongly correlates with *binder*'s increasing rate of increasing of viscosity. Mass percentage of HTPB also 80.9% strongly correlates with *binder*'s increasing hardness.

Keywords: *Hidroxy terminated polybutadiene, Hardness, Rate of increasing of viscosity, Vinyl, Propellant's binder*

ABSTRAK

Propelan padat komposit yang memiliki viskositas dan kekerasan yang baik dapat menghasilkan performa yang baik. Karakteristik propelan tersebut meningkat dengan kenaikan kandungan vinil HTPB dalam *binder*. Besarnya pengaruh vinil bergantung pada persentase massa HTPB dalam *binder* yang berubah apabila bilangan hidroksil HTPB dan bilangan isosianat *curing agent* berubah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mempelajari tingkat korelasi dan besarnya pengaruh persentase massa HTPB dalam *binder* propelan terhadap besarnya kenaikan laju kenaikan viskositas dan kekerasan sebagai akibat dari peningkatan kandungan vinil HTPB. Dalam penelitian ini, dibuat *binder* B dengan HTPB B yang mengandung 25% vinil dan dibandingkan dengan *binder* A dengan HTPB A yang mengandung 59% vinil. Komposisi *binder* meliputi perbandingan massa HTPB/TDI (Toluena diisosianat) 10:1, 11:1, 12:1, 13:1, 14:1 dan 15:1. Viskositas *binder* pada 10 menit pertama dan kedua pengadukan, serta kekerasan *binder* setelah 2 hari pematangan diuji dan perbedaan nilainya antara pada *binder* A dan B dihitung. Grafik % massa HTPB *versus* perbedaan laju kenaikan viskositas dan % massa HTPB *versus* perbedaan kekerasan dibuat untuk mendapatkan % besarnya pengaruh dan tingkat korelasi. Ditemukan bahwa terdapat hubungan positif antara % massa HTPB dengan kenaikan laju kenaikan viskositas dan kenaikan kekerasan *binder* sebagai akibat dari peningkatan kandungan vinil. Persentase massa HTPB berkorelasi sangat kuat sebesar 83,7 % dengan kenaikan laju kenaikan viskositas *binder*. Persentase massa HTPB juga berkorelasi sangat kuat sebesar 80,9% dengan kenaikan kekerasan *binder*.

Kata Kunci: *Hidroxy terminated polybutadiene, Kekerasan, Laju kenaikan viskositas, Vinil, Binder propelan*

1 PENDAHULUAN

Propelan padat komposit telah lama dikembangkan oleh LAPAN sebagai bahan bakar roket yang dalam pembakarannya tidak tergantung dari oksigen luar namun dari oksigen yang disuplai senyawa oksidator (Susanto A dan Abdillah L H, Sutton, 2014). Jenis propelan yang relatif aman dalam pembuatan dan penyimpanan tersebut menarik untuk dikembangkan oleh karena kemudahan serta keleluasaan untuk memvariasi komposisi, peningkatan sifat energetik dan sifat balistik (Syarkawi M, 2002). Bahan pembuatan propelan ini terdiri dari bahan padatan dan bahan cair. Bahan padatan berupa bahan bakar logam, oksidator dan aditif. Sedangkan, bahan cair meliputi *plasticizer* dan *binder*. Propelan padat komposit tergolong dalam propelan heterogen yang mana *fuel* dan oksidator tidak terjalin oleh ikatan kimiawi sehingga diperlukan *binder*. Bukan hanya mengikat *fuel* dan oksidator, senyawa *binder* juga berfungsi mengikat seluruh bahan penyusun propelan (Susanto A dan Abdillah LH,

Sutton, 2014). Senyawa *binder* terbentuk dari senyawa resin dan *curing agent*. Resin yang kini tengah dipakai dan dikembangkan oleh LAPAN adalah *Hidroxy Terminated Polybutadiene* (HTPB), sebelumnya *Carboxy terminated polybutadiene* (CTPB) digunakan.

HTPB terkenal luas digunakan sebagai *binder* dalam propelan padat oleh karena keunggulan-keunggulannya. Banyaknya kandungan hidrokarbon dalam HTPB (98,6 %) serta rendahnya viskositas (5000mPas pada 30° C) dan *spesific gravity* (0,90 g/cm³) menyebabkan HTPB mampu mengadsorpsi padatan hingga 86–88% tanpa kehilangan kemudahannya untuk diproses sehingga menghasilkan sistem propelan komposit yang memiliki sifat mekanis yang baik (Mahanta *et al.*, Muthiah *et al.*, 2012). Banyaknya kandungan hidrokarbon juga menyebabkan HTPB dapat terbakar dengan mudah dan terdekomposisi menjadi sejumlah besar volume dari molekul stabil berberat molekul rendah seperti karbonmonoksida, karbondioksida dan uap air sehingga meningkatkan impuls spesifik dari motor roket

(Mahanta *et al.*, Sadhegi *et al.*, 2012). Ketika dibakar, HTPB mampu melepaskan sejumlah energi sehingga dapat berfungsi sebagai bahan bakar. Jaringan poliuretan yang diperoleh HTPB dari proses *curing* dengan diisiosianat memberikan matriks yang baik untuk oksidator anorganik, bahan bakar metal dan bahan lain yang terdispersi dalam propelan padat (Mahanta *et al.*, 2010). Poliuretan tersebut juga memiliki stabilitas terhadap hidrolitik 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 (Mahanta *et al.*, Sadeghi *et al.*, 2012). Dey *et al* melaporkan bahwa poliuretan HTPB juga memiliki kemampuan mengabsorpsi guncangan (*shock*) sehingga menurunkan sensitifitas dan kerentanan dari material peledak (Dey *et al.*, 2015). Karakter-karakter unggul dari HTPB tersebut dapat berasal dari struktur mikro dalam rantai hidrokarbon yang menyusun 98,6% HTPB (Mahanta *et al.*, Muthiah *et al.*, 2012).

HTPB memiliki tiga isomer yaitu 1,2-vinil, 1,4-trans dan 1,4-cis. Produk komersial HTPB merupakan campuran dari ketiga isomer tersebut (Rosita, Geni, 2011). Rasio konsentrasi cis, trans dan vinil diketahui mempengaruhi karakteristik aliran, elastisitas, kuat tarik dan kekerasan bahan, termasuk propelan padat komposit sebagai bahan bakar, yang mengandung poliuretan berbahan HTPB (Dey *et al.*, 2015; Hamrang A dan Balkose D, 2015; Xu Chang *et al.*, 2010; Daley, R. F dan Daley, R. J, 2014). Diantara ketiga struktur mikro HTPB, isomer yang menarik untuk dipelajari adalah vinil. Hal ini karena kandungan vinil diketahui dapat meningkatkan viskositas dari matriks poliuretan yang masih cair, serta polimernya memiliki karakteristik yang keras (Dey *et al.*, 2015; Daley, R. F dan Daley, R. J, 2014).

Kekerasan dan viskositas merupakan karakteristik *binder* propelan yang penting untuk diuji. Hal ini karena kekerasan mengindikasikan kekuatan bahan dan ketahanannya untuk menggores dan mengausi (Kalpakjian *et al.*, 2006). Selain itu, data kekerasan juga dapat digunakan untuk penilaian beragam karakteristik bahan seperti kuat tarik, *yield strength*, *fatigue limit*, distribusi regangan residu dan ketangguhan terhadap patah (Gaško, M dan Gejza R, Ceschini *et al.*, Pavlina, E. J dan C.J. Van, 2011). Sedangkan, viskositas penting untuk diuji karena mengandung informasi tentang laju kenaikan viskositas yang diharapkan tidak terlalu cepat sehingga dapat mempermudah proses *casting* propelan sehingga terbentuk propelan yang homogen (Mahanta *et al.*, 2010).

Besar kecilnya pengaruh vinil HTPB terhadap peningkatan laju kenaikan viskositas dan kekerasan *binder* propelan bergantung pada persentase massa HTPB yang terkandung dalam *binder*. Persentase massa tersebut dapat berubah seiring dengan perubahan bilangan hidroksil HTPB dan bilangan isosianat *curing agent* yang digunakan karena untuk mendapatkan sifat mekanik propelan yang baik, *binder* harus dibuat dengan komposisi OH/NCO sebesar 1,0 atau 0,9 (Wibowo, HB, 2015). Dengan demikian, diperlukan penelitian untuk mempelajari tingkat korelasi dan besarnya pengaruh persentase massa HTPB dalam *binder* propelan terhadap besarnya kenaikan laju kenaikan viskositas dan kekerasan sebagai akibat dari peningkatan kandungan vinil HTPB.

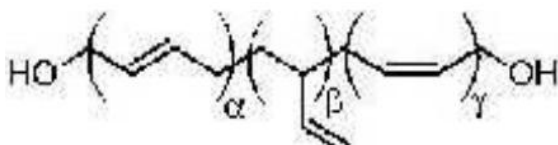
Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari tingkat korelasi dan besarnya pengaruh persentase massa HTPB dalam *binder* propelan terhadap besarnya kenaikan laju kenaikan viskositas dan kekerasan sebagai akibat dari peningkatan kandungan vinil HTPB. Manfaat dari penelitian ini ialah

didapatkannya pengetahuan untuk menganalisa kenaikan dari laju kenaikan viskositas dan kekerasan binder propelan dari data kandungan vinil HTPB dan persentase massa HTPB.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mikro Struktur Hidroxy Terminated Polybutadiene (HTPB)

Bahan *Hydroxyl Terminated Polibutadiene* (HTPB) adalah polibutadiena yang terbentuk dari unit pengulangan monomer butadiena dengan gugus kedua ujungnya adalah gugus hidroksil. HTPB memiliki tiga isomer yaitu 1,2-vinil, 1,4-trans dan 1,4-cis seperti terlihat pada Gambar 2-1 (Rosita, Geni, 2011). Campuran konfigurasi 1,4-cis, 1,4 trans dan 1,2- vinil dalam HTPB terdistribusi secara acak sepanjang rantai polimer (Dey *et al.*, 2015). Produk komersial HTPB merupakan campuran dari ketiga isomer tersebut (Rosita, Geni, 2011). Rata-rata HTPB untuk *fuel binder* propelan mensyaratkan kadar isomer cis tinggi (di atas 30%), kadar vinil di bawah 25% dan kadar trans bervariasi. Persyaratan *binder* propelan komposit yang baik adalah memiliki kadar vinil paling banyak 20% (Wibowo, HB, 2015). Sementara, menurut Dey *et al.*, HTPB ideal haruslah memiliki rasio trans: cis: vinil 55 : 25 : 20 (Dey *et al.*, 2015).

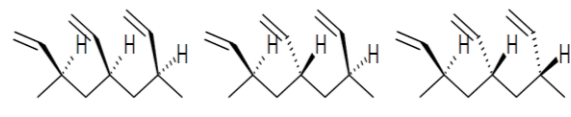


Trans Vinil Cis
Gambar 2-1: Struktur Mikro HTPB (Dey *et al.*, 2015)

Persentase masing-masing struktur yang dominan akan mempengaruhi sifat mekanik polimer yang dihasilkan (Rosita, Geni, 2011). Menurut Dey *et al.*, kandungan vinil yang lebih banyak dapat menyebabkan kenaikan viskositas dari matriks polimer poliuretan yang masih cair (Dey *et al.*, 2015). Hal ini karena keberadaan vinil bertindak seperti jangkar dan mencegah selip

molekuler sehingga kemampuan mengalir dibatasi (Akay, Mustafa, 2015). Viskositas juga dilaporkan meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan vinil dalam kasus penambahan etilen vinil asetat ke dalam komposisi *High Density Polyethylene* (HDPE). Hal ini menurut Alothman dikarenakan pembatasan pergerakan molekuler dan pengurangan volume bebas (Alothman, O. Y, 2012).

Isomer vinil diketahui memiliki *stereo* regularitas atau taktisitas yang merupakan isomer spasial yang menggambarkan penataan gugus vinil dalam mengitari rantai utama polimer. Pada bentuk isotaktik, semua gugus vinil berada pada sisi yang sama dari rantai polimer. Pada sindiotaktik, posisi gugus vinil berselang-seling terhadap rantai polimer. Sedangkan, bentuk ataktik menggambarkan posisi gugus vinil terhadap rantai polimer yang acak. *Stereo* regularitas mempengaruhi kemampuan polimer untuk mengkristal, derajat kristalisasi dan karakter polimer (Akay, Mustafa, 2015). Gambar 2-2 menyajikan ketiga isomer tersebut. Struktur vinil juga diketahui dapat membentuk ikatan silang dengan ikatan rangkap di dekatnya (Dey *et al.*, 2015). Ikatan silang yang lebih padat dapat meningkatkan kuat tarik propelan (Xu Chang *et al.*, 2010).

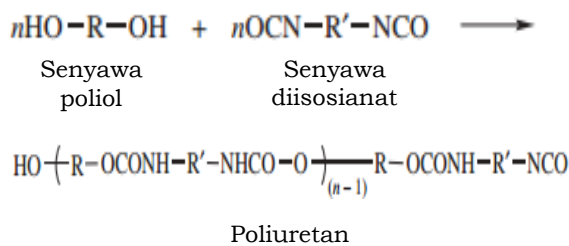


Isotaktik Sindiotaktik Ataktik
Gambar 2-2: Isomer dari Konfigurasi 1,2-vinil (Dey *et al.*, 2015)

Persentase relatif ketiga isomer HTPB (cis, trans, vinil) bergantung dari kondisi polimerisasi HTPB. HTPB yang dibuat dengan polimerisasi radikal memiliki kandungan unit-1,4 maksimum 79%. Sedangkan, HTPB yang dibuat dari polimerisasi anionik dapat memberikan kandungan unit-1,4 sampai 90% (Chen *et al.*, 2010).

2.2 Struktur Poliuretan

Gugus hidroksil pada ujung HTPB bereaksi dengan senyawa diisosiyanat membentuk polimer poliuretan yang bertindak sebagai matriks untuk bahan padatan dalam propelan padat komposit. Reaksi pembentukan poliuretan dipaparkan pada Gambar 2-3 (O dian, George, 2004). Fungsi dari matriks ini selain untuk menahan partikel padatan, juga melindungi permukaan partikel padatan dari kerusakan, menyalurkan tegangan yang diberikan pada bahan padatan dan memberikan hasil akhir yang baik pada propelan padat komposit (Akay, Mustafa, 2015).

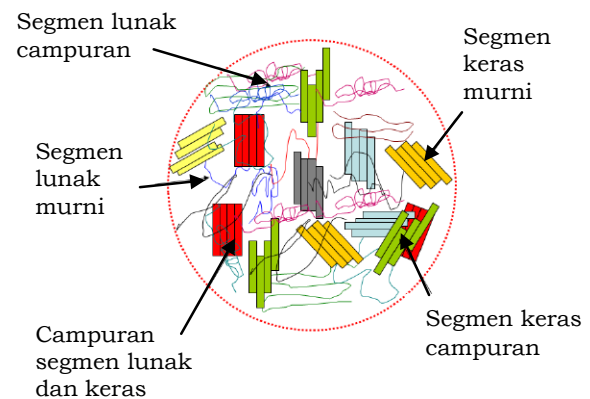


Gambar 2-3: Reaksi Pembentukan Poliuretan (O dian, George, 2004)

Performa poliuretan bergantung pada komposisi kimia, sifat segmen dan tingkat ikatan hidrogen. Kekakuan intramolekuler ialah hasil dari ikatan kimia dalam hal komposisi dari struktur rantai, percabangan dan ikatan silang. Ikatan fisik meningkatkan kekakuan intermolekuler dari derajat segmen keras dan ikatan hidrogen (Lem *et al.*, 2013).

Material poliuretan tersusun dari segmen lunak dan segmen keras. Segmen keras terdiri dari gugus uretan. Sementara segmen lunak terdiri dari polibutadiena yang berasal dari HTPB. Panjang segmen lunak sekitar 1000-2000 nm. Sedangkan segmen keras sekitar 150 nm (Abdillah, L. H, Hepburn, 2015). Segmen keras berkontribusi dalam sifat plastis poliuretan seperti kekuatan tarik, kekuatak sobek, ketahanan terhadap bahan kimia dan performa dalam temperatur tinggi. Ikatan hidrogen dari gugus uretan meningkatkan sifat platis dan mengurangi gerakan intermolekuler. Sedangkan, segmen lunak

berkontribusi dalam sifat elastomerik poliuretan yang berupa kekerasan, ketahanan terhadap ketegangan dan kompresi, fleksibilitas dan performa pada temperatur rendah. Lima morfologi yang potensial pada poliuretan adalah segmen keras murni, segmen lunak murni, campuran segmen lunak, campuran segmen keras dan campuran antara segmen keras dan lunak. Morfologi ini dapat dilihat pada Gambar 2-4 (Lem *et al.*, 2013).



Gambar 2-4: Morfologi Segmen Lunak dan Keras dalam Poliuretan (Lem *et al.*, 2013)

2.3 Kekerasan dan Laju Kenaikan Viskositas Binder Propelan

Kekerasan dan laju kenaikan viskositas *binder* propelan penting untuk diuji dalam menentukan komposisi *binder* yang lebih baik untuk propelan. Kekerasan merupakan ukuran resistensi bahan untuk deformasi plastis lokal (Callister, William D, 2007). Kekerasan mengindikasikan kekuatan bahan dan ketahanannya untuk menggores dan mengausi (Kalpakjian *et al.*, 2006). Kelebihan pengujian kekerasan meliputi dapat dilakukan dengan mudah, sederhana, cepat, tidak terlalu bersifat destruktif, dapat digunakan untuk penilaian beragam karakteristik bahan seperti kuat tarik, *yield strength*, *fatigue limit*, distribusi regangan residu dan ketangguhan terhadap patah (Zhang *et al.*, Li *et al.*, 2011; Gaško, M dan Gejza R, Ceschini *et al.*, Pavlina, E. J dan C.J. Van, 2011).

Viskositas polimer yang masih cair berkaitan dengan berat molekul polimer yang terbentuk (Ghosh, Premamoy, 2006). Semakin lama reaksi polimerisasi, semakin besar berat molekul poliuretan yang terbentuk sehingga viskositas matriks yang masih cair pun semakin meningkat (Mahanta *et al.*, 2010). Perkembangan berat molekul poliuretan dimulai dari bentuk koil atau gel berukuran nano kemudian gel berukuran mikro lalu makro hingga kemudian menjadi bentuk padatan yang meruah (Lem *et al.*, 2013). Laju kenaikan viskositas mempengaruhi kehomogenan dan performa propelan. Laju ini merupakan perwujudan dari laju polimerisasi antara HTPB dengan senyawa diisosiyanat sebagai penyusun *binder* propelan. Laju kenaikan viskositas yang terlalu cepat dapat menyebabkan propelan sulit dicetak sehingga dapat menyebabkan adanya pori (Mahanta *et al.*, 2010).

3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan

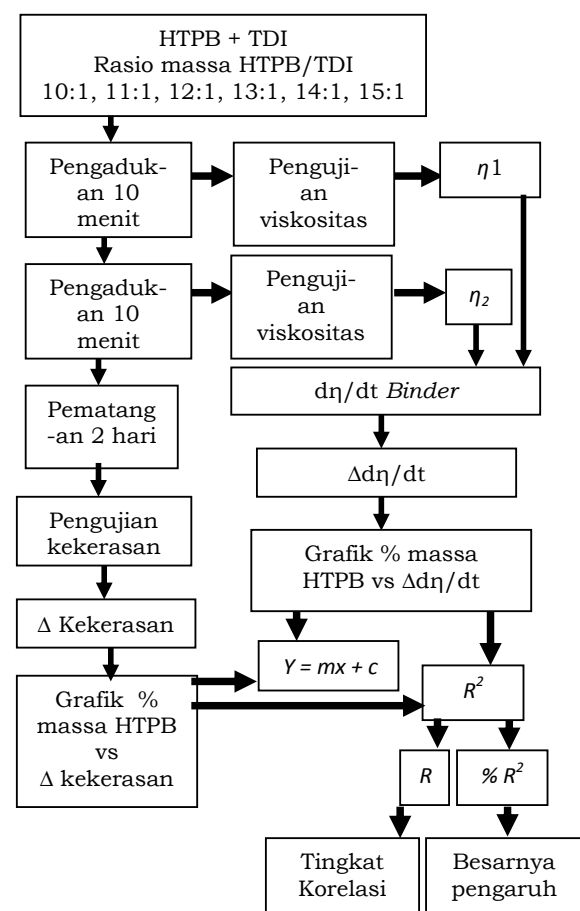
Bahan yang digunakan adalah HTPB A dan HTPB B dengan berat molekul 2470 g/mol serta TDI yang diproduksi oleh Dalian Chlorate co. Ltd. HTPB yang digunakan merupakan hasil dari polimerisasi radikal. Berdasarkan hasil analisis dengan spektrofotometri inframerah (FT - IR) Shimadzu yang dilakukan oleh Laboratorium HTPB, LAPAN, HTPB A mengandung vinil sebesar 59% dan HTPB B mengandung vinil sebesar 25%, sedangkan TDI mengandung 2,4-TDI 58,39% dan 2,6-TDI 41,61%. Hasil titrasi yang dilakukan oleh Laboratorium HTPB menunjukkan kandungan %NCO dalam TDI sebesar 40,42.

3.2 Metode

Binder yang dibuat dalam penelitian ini ialah *binder* B dengan bahan HTPB B dan TDI. *Binder* pembanding disebut sebagai HTPB A dengan bahan HTPB A dan TDI (Abdillah, L. H, 2015). Skema kerja

dapat dilihat pada Gambar 3-1. Pengadukan dilakukan pada suhu 42 – 45°C. Viskositas (η) diukur dengan menggunakan VT - 04F Rion Viscometer dengan spindle 01. Laju kenaikan viskositas ($d\eta/dt$) dihitung dengan persamaan 3-1 dan selisih laju kenaikan viskositas dihitung. Setelah pengadukan, *binder* dimatangkan pada suhu 60 °C. Kekerasan diukur menggunakan Durometer shore A. Selisih kekerasan dihitung, grafik dibuat dan penggolongan tingkat korelasi dilakukan berdasarkan Tabel 3-1.

$$d\eta/dt = (\eta_2 - \eta_1) / t \tag{3-1}$$



Gambar 3-1: Skema kerja penelitian

Tabel 3-1: PENGGOLONGAN TINGKAT KORELASI

Nilai r	Level
0.00 – 0.199	Sangat rendah
0.20 – 0.399	Rendah
0.40 – 0.599	Medium
0.60 – 0.799	Kuat
0.80 – 1.000	Sangat Kuat

(Sugiyono, 2011)

4 PEMBAHASAN

HTPB penyusun *binder* propelan memiliki tiga isomer yaitu 1,2-vinil, 1,4-trans dan 1,4-cis (Rosita, Geni, 2011). Kandungan vinil diketahui dapat meningkatkan viskositas dari matriks poliuretan yang masih cair, serta polimernya memiliki karakteristik yang keras (Dey *et al.*, 2015; Daley, R. F dan Daley, R. J, 2014). Data viskositas dapat diolah menjadi laju kenaikan viskositas sehingga vinil mempengaruhi pula laju kenaikan viskositas. Besar kecilnya pengaruh vinil tersebut bergantung pada persentase massa HTPB yang terkandung dalam *binder* dan untuk mempelajarinya, dibuat *binder* B kemudian dibandingkan dengan data *binder* A hasil penelitian Abdillah, L. H pada 2015. *Binder* A mengandung HTPB A dengan kandungan vinil 59% dan *binder* B mengandung HTPB B dengan kandungan vinil sebesar 25%. Kedua *binder* memiliki perbandingan massa HTPB/TDI 10:1, 11:1, 12:1, 13:1, 14:1 dan 15:1. Perbandingan massa tersebut dipilih oleh karena berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, rasio massa HTPB/TDI yang optimal adalah antara 12/1 sampai dengan 14/1 (Abdillah, L. H, 2015). Hasil pengukuran viskositas dan perhitungan laju kenaikan viskositas dapat dilihat pada Tabel 4-1.

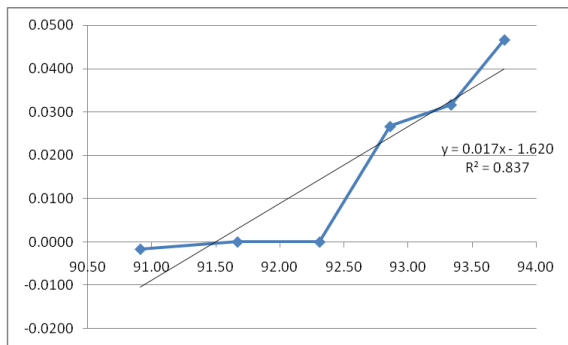
Pada Tabel 4-1, terlihat viskositas setelah 20 menit pengadukan lebih

besar daripada viskositas setelah 10 menit pengadukan. Viskositas polimer yang masih cair berkaitan dengan berat molekul polimer (Ghosh, Premamoy, 2006). Dalam hal ini, polimer tersebut adalah poliuretan sebagai hasil reaksi polimerisasi antara HTPB dan TDI (O dian, George, 20014). Semakin lama pengadukan antara HTPB dan TDI, semakin lama reaksi polimerisasi, semakin besar berat molekul poliuretan yang terbentuk sehingga semakin tinggi pula viskositas *binder* propelan. Hal ini sesuai dengan teori Mahanta *et al.*, dan Lem *et al* (Mahanta *et al.*, 2010; Lem *et al.*, 2013).

Oleh karena viskositas berkaitan dengan berat molekul poliuretan, maka laju kenaikan viskositas dapat menandakan laju penambahan berat molekul poliuretan yang terbentuk. Pada *binder* A, penambahan berat molekul poliuretan memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap kenaikan viskositas daripada *binder* B sehingga *binder* A memiliki laju kenaikan viskositas rata – rata lebih tinggi daripada *binder* B seperti terlihat pada Tabel 4-1. Hal ini dapat disebabkan oleh lebih tingginya kandungan vinil dalam *binder* A daripada *binder* B sesuai teori Dey *et al* (Dey *et al.*, 2015).

Tabel 4-1: VISKOSITAS DAN LAJU KENAIKAN VISKOSITAS *BINDER* A DAN *BINDER* B (Abdillah, LH, 2015 dan Data Laboratorium Komposisi Dasar)

Rasio Massa	% Massa HTPB	<i>Binder</i> A		$d\eta/dt$ A (P/s)	<i>Binder</i> B		$d\eta/dt$ B (P/s)
		η_1 (P)	η_2 (P)		η_1 (P)	η_2 (P)	
10 : 1	90.91	23	42	0.032	16	36	0.033
11 : 1	91.67	26	48	0.037	17	39	0.037
12 : 1	92.31	24	45	0.035	21	42	0.035
13 : 1	92.86	27	50	0.038	28	35	0.012
14 : 1	93.33	30	60	0.050	25	36	0.018
15 : 1	93.75	35	70	0.058	24	31	0.012
Rata – rata				0.042			0.024



Gambar 4-2: Grafik % massa HTPB vs Perbedaan Laju Kenaikan Viskositas

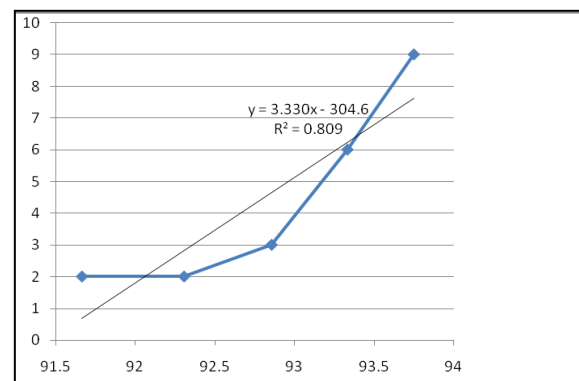
Grafik 4-2 menunjukkan hubungan positif antara % massa HTPB dan perbedaan laju kenaikan viskositas dengan persamaan garis $y = 0,017x - 1,620$, $r=0,915$, besarnya pengaruh sebesar 83,7% dan tingkat korelasi sangat kuat. Hal ini karena seiring dengan peningkatan % massa HTPB dalam *binder*, semakin banyak kandungan segmen lunak yang mengandung vinil sehingga pengaruh vinil semakin signifikan. Diketahui bahwa struktur vinil memiliki tiga bentuk isomer yaitu isotaktik, sindiotaktik dan ataktik, yang dapat mencegah selip molekuler dan membatasi pergerakan molekul sehingga meningkatkan viskositas *binder* yang masih cair (Dey *et al.*, 2015; Akay, Mustafa, 2015; Alothman, O. Y, 2012).

Selanjutnya, data hasil pengukuran kekerasan ditunjukkan pada Tabel 4-2. Kekerasan ialah ukuran resistensi bahan untuk deformasi plastis lokal (Callister, William D, 2007). Pada hari kedua pematangan, *binder* dengan rasio 10 : 1 belum dapat diukur kekerasannya karena masih lembek dan lengket di tangan.

Berdasarkan Tabel 4-2, *binder* A memiliki kekerasan rata-rata lebih tinggi daripada *binder* B karena *binder* A mengandung vinil lebih besar daripada *binder* B. Hal ini sesuai dengan karakter polimer vinil yang bersifat keras (Daley, R. F dan Daley, R. J, 2014). Grafik antara % massa HTPB dan perbedaan kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4-3.

Tabel 4-2: KEKERASAN *BINDER* A DAN B (Abdillah, L.H, 2015 dan Data Laboratorium Komposisi Dasar)

% Massa HTPB	<i>Binder</i> A (Shore A)	<i>Binder</i> B (Shore A)
91.67	4	2
92.31	14	12
92.86	20	17
93.33	21	15
93.75	15	6
Rata – rata	14.8	10.4



Gambar 4-3: Grafik % Massa HTPB dan Perbedaan Kekerasan

Grafik di atas menandakan hubungan positif antara % massa HTPB dan perbedaan kekerasan dengan persamaan garis $y = 3,330x - 304,6$, $r=0,809$, besarnya pengaruh sebesar 80,9% dan tingkat korelasi sangat kuat. Hal ini karena semakin besar % massa HTPB dalam *binder*, semakin tinggi kandungan segmen lunak yang mengandung vinil. Segmen lunak diketahui berkontribusi terhadap kekerasan poliuretan (Lem et al, 2013).

5 KESIMPULAN

Ditemukan bahwa terdapat hubungan positif antara % massa HTPB dengan kenaikan laju kenaikan viskositas dan kenaikan kekerasan *binder* sebagai akibat dari peningkatan kandungan vinil. Persentase massa HTPB berkorelasi sangat kuat sebesar 83,7 % dengan peningkatan laju kenaikan viskositas *binder*. Persentase massa HTPB juga berkorelasi sangat

kuat sebesar 80,9% dengan kenaikan kekerasan *binder*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Kendra Hartaya, M.Si selaku Koordinator Laboratorium Komposisi Dasar Propelan dan Dr. Heri Budi Wibowo, M.T yang telah memberikan bimbingan, motivasi, saran dan dukungan atas tersusunnya karya tulis ilmiah ini, Dra. Geni Rosita dan para teknisi Laboratorium HTPB, Pustekroket, LAPAN atas data kandungan HTPB dan TDI, serta para teknisi Laboratorium Komposisi Dasar Propelan atas bantuan dan dukungannya dalam penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdillah, Luthfia Hajar, 2015. *Penelitian Swelling Prepolimer HTPB-TDI Sebagai Penjajagan Peningkatan Solid Loading Pada Formulasi Propelan*, Teknologi Pesawat Terbang Sebagai Mitra Pengembang Teknologi Roket dan Satelit Nasional, Jakarta: Indonesia Book Project.
- Alothman, Othman Y., 2012. *Processing and Characterization of High Density Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate Blends with Different VA Contents*, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2012.
- Callister, William D., 2007. *Materials Science and Engineering An Introduction*, John Wiley and Sons, Inc, USA.
- Ceschini, A. Morri, A. Morri, G. Pivetti, 2011. *Mater*, Des 321367-1375.
- Chen, J., Zai-jun L., Guang-qin P., Yong-xin Q., Jian-jun Y., Hai-jian B., 2010. *Synthesis of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Possessing High Content of 1,4-Units Via Anionic Polymerization*, Chinese Journal of Polymer Science Volume 28, Issue 5, 715-720.
- Daley, Richard F dan Sally J Daley, 2014. *Organic Chemistry Part 3 of 3*, Daley Press.
- Dey, A., Md Abdul Shafeeuulla K., Javaid A., Arun Kanti S., Santanu C., 2015. *Effect of Microstructure on HTPB Based Polyurethane (HTPB-PU)*, Journal of Materials Science and Engineering B 5 (3-4) (2015) 145-151.
- Gaško, Martin and Gejza Rosenberg, 2011. *Correlation Between Hardness and Tensile Properties In Ultra-High Strength Dual Phase Steels-Short Communication*, Materials Engineering-Materiálové inžinierstvo 18 (2011) 155-159, ISSN 1335-0803.
- Ghosh, Premamoy, 2006. *Polymer Science Fundamentals of Polymer Science Molecular Weights of Polymers*, Polymer Study Centre, Kolkata.
- Hamrang, Abbas and Devrim Balkose, 2015. *Applied Methodologies in Polymer Research and Technology*, Apple Academic Press, Inc, Canada.
- Hepburn, C, 1992. *Polyurethane Elastomers*, 2nd ed, Elsevier Science Publishers Ltd. New York, USA. ISBN 1-85166-589-7.
- Kalpakistan, S., Stephen R. S., Hamidan M., 2006. *Manufacturing Engineering and Technology SI 6th Edition*, Prentice Hall, New Jersey.
- Lem, K. W., J. R. Haw, S. Curran, S. E. Sund, C. Brumlik, G. S. Song, D. S. Lee, 2013. *Effect of Hard Segment Molecular Weight on Dilute Solution Properties of Ether Based Thermoplastic Polyurethanes*, Nanoscience and Nanoengineering 1(3): 123-133,2013,DOI:10.13189/nn.2013.010301.
- Li, P., X. F. Zhu., G. P. Zhang, J. Tan, W. Wang, B. Wu, 2010. *Philos. Mag.* 90 (2010) 3049-3067.
- Mahanta, A. K., 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, [Http://www.intechopen.com/books/polyurethane/httpb-polyurethane-a-versatile-fuel-binder-for-composite-solid-propellant](http://www.intechopen.com/books/polyurethane/httpb-polyurethane-a-versatile-fuel-binder-for-composite-solid-propellant); download July 29, 2015, 229- 230.
- Mahanta, Abhay K., Monika Goyal, Davendra D Pathak, 2010. *Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based*

- Solid Propellant Slurry*, E-Journal of Chemistry 2010, 7 (1), 171 – 179.
- Mustafa, Akay, 2015. *An Introduction to Polymer Matrix Composite*, Bookboon.com.
- Mustafa, Akay, 2015. *Introduction to Polymer Science and Technology*, Bookboon.com.
- Muthiah, R. M., Krishnamurthy, V.N., Gupta B. R., 1992. *Rheology of HTPB Propellant, Effect of Solid Loading, Oxidizer Particle Size, and Aluminum Content*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 44, 2043-2052.
- Odian, George, 2004. *Principles of Polymerization 4th Edition*, John Wiley & Sons, Inc, Canada.
- Pavlina, E. J and C.J. Van Type: J. Mater. Eng. Perform, 17 (2008) 6 888-893.
- Rosita, Geni, 2011. *Pengaruh Jumlah Katalisator, Waktu Reaksi, Dan Waktu Alir Gas Butadiena Terhadap Pembentukan Hydroxyl Terminated Polybutadiene (HTPB)*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara Vol 6, No.2 Juni (2011).
- Sadeghi, G. M. M., Morshedean J., Barikani, M, 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, 255-266.
- Sugiyono, 2011. *Statistika Untuk Penelitian*, Penerbit Alfabeta, Bandung, 372, 224 – 231.
- Susanto, A dan L. H. Abdillah, 2014. *Propelan dan Teknologi Pembuatannya*, Berita Dirgantara Vol. 15 No. 2 Desember 2014: 50-57.
- Sutton, G. P dan Biblarz, O., 2001. *Rocket Propulsion Elements*. California: John Willey & Son.
- Syarkawi, Atwirman, 2002. *Kinerja Propelan Padat Komposit Polibutadien dalam Kaitannya dengan Komposisi Bahan-Bahannya*, Majalah LAPAN Vol 4, No.1 Maret.
- Wibowo, Heri Budi, 2015. *Peningkatan Sifat Mekanik Propelan Mandiri, Berbasis Pengaruh Bilangan OH Terhadap Kinerja Propelan*, Hasil Penelitian dan Pemikiran Ilmiah Tentang Teknologi Pesawat Terbang Tanpa Awak, Roket serta Satelit 2014, Jakarta : Indonesia Book Project.
- Wibowo, Heri Budi, 2015. *Reduksi Struktur Vynil untuk Peningkatan Kualitas HTPB (Hydroxy Terminated Polybutadiene) Dengan Penggeseran Kesetimbangan Penataulangan Isomer*, Hasil Penelitian dan Pemikiran Ilmiah Tentang Teknologi Pesawat Terbang Tanpa Awak, Roket serta Satelit 2014, Jakarta: Indonesia Book Project, Halaman 273-290.
- Xu Chang, L., Jian J., Jun Yan Y., Liang W., 2010. *Study on the Relationship between Microscopic Structure and Mechanical Properties of HTPB Propellant*, Advanced Materials Research, Vol. 152-153, 1151- 1155, Oct. 2010.
- Zhang, P., S. X. Li, Z. F. Zhang, 2011. *General Relationship Between Strength and Hardness*, Materials Science and Engineering A 529 (2011), 62 – 73.