

# **PENGARUH PENAMBAHAN FILLER $\text{SiO}_2$ , *CARBON BLACK*, DAN $\text{TiO}_2$ PADA SIFAT MEKANIK LINER EPOKSI POLISULFIDA MOTOR ROKET *CASE BONDED* (THE EFFECT OF $\text{SiO}_2$ , CARBON BLACK AND $\text{TiO}_2$ FILLER ADDING TO MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY POLYSULFIDE LINER OF CASE BONDED MOTOR ROCKET)**

**Wiwiek Utami Dewi <sup>\*,\*\*</sup>, dan Bambang Soegiono<sup>\*</sup>**

<sup>\*</sup>) Ilmu Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Jakarta

<sup>\*\*</sup>) Perekrayasa Bidang Propelan, Pusat Teknologi Roket, Lapan

e-mail: wiwiekdewi@yahoo.com

## **ABSTRACT**

Virgin epoxy polysulfide liner (without filler) is considered to be not strong enough to withstand the structural loading and extreme condition during rocket operation. Filler adding is a crucial matter that has to be done to improve the mechanical strength of liner.  $\text{SiO}_2$ , carbon black and  $\text{TiO}_2$  have been chosen as the filler to reinforce epoxy polysulfide liner matrix in Lapan case bonded rocket motor. The influence of those fillers adding in liner mechanical properties has been investigated. Nine type of liner composition have been made and underwent several test in order to reveal mechanical properties such as hardness, maximum stress, maximum strain, and adhesive strength (liner to metal). The results show that hardness is proportional to tensile strength and maximum strain is proportional to adhesive strength, meanwhile tensile strength has polynomial profile toward maximum strain. The highest maximum strain (52%) was achieved when the tensile strength was on  $16.25 \text{ kg/cm}^2$ .

keywords: *Mechanical of liner, Epoxy polysulfide, Filler, Case bonded*

## **ABSTRAK**

*Liner* epoksi polisulfida *virgin* (tanpa *filler*) tidak cukup kuat untuk menahan beban struktural dan kondisi yang ekstrem selama roket beroperasi oleh karena itu penambahan *filler* sangat penting dilakukan untuk meningkatkan kekuatan mekanik *liner*.  $\text{SiO}_2$ , *carbon black* dan  $\text{TiO}_2$  telah dipilih sebagai *filler* untuk memperkuat matriks *liner* epoksi polisulfida pada motor roket *case bonded* Lapan. Pengaruh penambahan ketiga *filler* tersebut pada sifat mekanik *liner* telah diselidiki dalam penelitian ini. Sembilan jenis komposisi *liner* telah dibuat dan melalui beberapa proses pengujian sifat mekanik yang meliputi: kekerasan, tegangan tarik maksimum, regangan maksimum, dan kekuatan rekat (*liner* terhadap logam). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan *liner* sebanding dengan nilai tegangan tarik maksimum *liner* dan nilai kekuatan rekat *liner* terhadap logam sebanding dengan nilai regangan maksimum, sementara itu tegangan tarik maksimum *liner* memiliki hubungan polinomial dengan regangan maksimumnya. Regangan maksimum tertinggi (52%) dicapai pada nilai tegangan tarik maksimum  $16,25 \text{ kg/cm}^2$ .

Kata kunci: *Sifat mekanik liner, Epoksi polisulfida, Filler, Case bonded*

## **1 PENDAHULUAN**

*Liner* adalah lapisan tipis lengket yang akan hangus (*charred*) secara bertahap. *Liner* biasanya terbuat dari

material polimer dan diaplikasikan pada tabung motor roket untuk menciptakan ikatan yang kuat antara propelan dan tabung motor roket atau antara propelan

dan lapisan *insulator*. *Liner* memiliki fungsi perekatan, fungsi insulasi (membatasi aliran panas ke tabung motor roket selama proses pembakaran propelan) dan sekaligus fungsi restriksi (menunda pembakaran yang tidak diinginkan pada bagian tertentu) [Sutton, G. P. And Biblarz, Oscar, 2001].

Proses pengaplikasian *liner* pada motor roket tergantung pada jenis proses produksi yang digunakan. Ada dua metode proses produksi motor roket padat yang dikenal saat ini [Sutton, G. P. And Biblarz, Oscar, 2001]. Pertama adalah *free standing*. Pada metode ini propelan beserta *insulator* dibuat terpisah dari motor roket. Jika roket akan diluncurkan, propelan yang sudah dilapisi dengan *insulator* dimasukkan ke tabung motor roket. Pada motor roket *free standing*, propelan tidak menempel permanen pada tabung sehingga tabung motor roket dapat dipakai kembali. Sementara metode *case bonded* sebaliknya. Tabung motor roket terlebih dahulu di lapis dengan *liner-insulator* lalu langsung dicetak propelan didalamnya. Propelan akan merekat kuat di dalam tabung motor roket sehingga motor roket tidak bisa dipakai ulang.

Selama ini proses produksi motor roket LAPAN dilakukan dengan perpaduan antara metode *free standing* dan *case bonded*. Propelan dibuat terpisah menggunakan cetakan propelan. Propelan yang dihasilkan kemudian disesuaikan dimensinya dengan kebutuhan desain lalu dilapisi dengan protektor termal (*insulator*) dan dimasukkan ke dalam tabung motor roket. Selanjutnya celah antara permukaan propelan dengan dinding tabung diisi dengan material *liner*. Material *liner* berfungsi sebagai perekat antara propelan dengan tabung motor roket. Proses pembuatan motor roket yang seperti ini mengakibatkan massa propelan yang ada dalam motor roket tidak optimal. Celah antara propelan dan tabung motor roket harus cukup lebar agar cairan *liner* yang viskositasnya tinggi dapat mengalir

dengan mengandalkan gaya gravitasi. Hal ini mengakibatkan lapisan *liner* menjadi tebal. Selain itu proses *assembling* motor roket juga memakan waktu relatif lebih lama.

Solusi untuk permasalahan ini adalah melalui penggunaan teknologi proses produksi propelan secara *case bonded*. Massa propelan yang dihasilkan akan lebih besar karena lapisan *liner-insulator* dibuat lebih tipis. Volume propelan pada motor roket akan terisi lebih optimal. Material *liner* nantinya akan diaplikasikan pada tabung motor roket dengan cara *spinning* dengan kecepatan 1000 rpm selama 4 jam [Rohman, Fathur, 2011].

Selain sifat termal, sifat yang paling penting bagi *liner* adalah sifat mekaniknya. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menyelidiki sifat mekanik dari berbagai macam jenis material *liner*. Rodic [Rodic, Vesna, 2007] menyelidiki pengaruh perbedaan matriks *liner* (HTPB, CTPB, CTBN) dan jenis *filler* pada sifat mekanik *liner* dan kerekatannya terhadap propelan, Navale [Navale, S.B, dkk., 2004] menyelidiki pengaruh penambahan  $Sb_2O_3$  dan *carbon black* pada *liner* berbasis HTPB, Erryani [Erryani, Aprilia, 2011] menyelidiki pengaruh penambahan zirkonium silikat pada *liner* berbasis HTPB sementara Giant [Giants, T.W., 1991] menggunakan *liner* berbasis HTPB yang diberi aditif *bonding agent* HX-868 sebagai lapisan *liner* pada roket *case bonded*-nya. Banyak paten mengenai material *liner* yang telah diklaim oleh para ahli [Nelson, R. W., dkk., 2000] [Sayles, D.C., 1993]. Pada beberapa paten, HTPB adalah material *liner* yang umum digunakan sebagai *liner*. Beberapa paten tersebut antara lain seperti US Patent No. 5.209.876 yang menggunakan HTPB dan *carbon black*, US Patent No. 6.054.521 yang menggunakan HTPB,  $TiO_2$  dan  $SiO_2$ .

Tidak seperti proses *curing* *liner* HTPB yang memakan waktu hingga 48 jam pada suhu  $70^\circ C$  [Rodic, Vesna, 2007] atau memakan waktu hingga lima

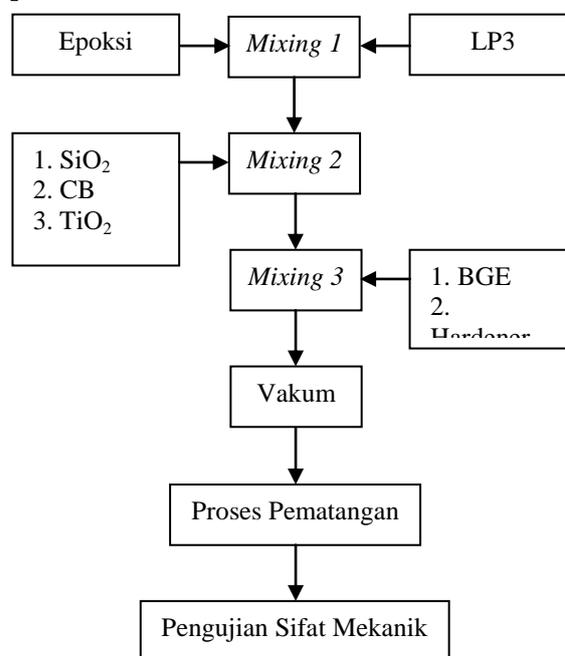
hari pada kondisi ambien, proses *curing liner* epoksi polisulfida hanya memakan waktu sekitar 4 jam pada kondisi ambien [Dewi, Wiwiek U., 2011] sehingga akan mempersingkat proses produksi dan menghemat penggunaan energi (tidak menggunakan oven atau *autoclave*). Selain keunggulan tersebut, epoksi polisulfida adalah material yang biasa digunakan dalam memproduksi lapisan penahan panas (*liner, insulator, dan inhibitor*) pada motor roket padat LAPAN sehingga tidak diperlukan pembelian material baru dan material yang tersedia dapat dimaksimalkan penggunaannya.

SiO<sub>2</sub> dan *carbon black* telah secara luas dipakai sebagai bahan penguat matriks *liner* sementara TiO<sub>2</sub> telah secara umum digunakan sebagai *flame retardant* dan peningkat ketahanan termal polimer [Industrial Mineral and Their Uses: A Handbook & Formulary, 1996]. Penambahan ketiga jenis *filler* ini diharapkan akan meningkatkan kekuatan mekanik matriks *liner* berbasis epoksi polisulfida. Pada penelitian ini akan diketahui pengaruh penambahan SiO<sub>2</sub>, *carbon black* dan TiO<sub>2</sub> pada sifat mekanik *liner* epoksi polisulfida yang meliputi: kekerasan, tegangan tarik maksimum, regangan maksimum, dan kekuatan rekat (*liner* terhadap logam). Sifat mekanik *liner* penting diketahui untuk memperkirakan kekuatan struktural material *liner* terhadap deformasi oleh gaya yang dikenakan selama roket beroperasi.

## 2 METODOLOGI PENELITIAN

Material *liner* yang digunakan sebagai *liner* adalah resin berbasis epoksi polisulfida. Resin epoksi (tipe DGEBA), *hardener* (tipe aminopoliamida) dan polisulfida LP3 (Morton International) akan dicampur dengan perbandingan berat 1: 1: 1,5. BGE (pengencer epoksi) diberikan sebanyak 10 phr dari jumlah epoksi dan *hardener*. Proses pencampuran resin dan *filler* dilakukan pada sebuah *mixer* dengan kecepatan 60 rpm dalam kondisi ambien (tekanan dan

suhu ruang). *Slurry liner* kemudian divakum pada *vacuum chamber*, lalu dituang ke dalam kotak sampel aluminium. Proses pematangan sampel dilakukan dalam kondisi ambien selama 24 jam. Urutan pencampuran bahan dan diagram blok penelitian dapat dilihat pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Diagram blok pembuatan dan pengujian bahan *liner*

Setelah matang, *liner* akan melalui proses pengujian kekuatan mekanik. Nilai kekerasan diuji menggunakan durometer Tecklock Type GS-709N sementara nilai tegangan tarik maksimum dan regangan maksimum *liner* didapat melalui pengujian secara uniaxial menggunakan alat tensilon UTM III- 100 dengan model sampel *Joint- Army – Navy – Air – Force* (JANAF). Kekuatan rekat *liner* terhadap logam aluminium diuji dengan metode *t-peel test* juga dengan menggunakan alat tensilon UTM III-100. Pada pengujian kekuatan rekat, *liner* setebal 5 mm dibiarkan matang di atas sebuah plat aluminium tebal 0,3 mm panjang 18 cm dengan bagian yang tidak merekat pada *liner* sepanjang 3 cm di salah satu ujungnya. Kapasitas 1kN *single coloum* UTM digunakan untuk pengujian kuat rekat. Pada Tabel 2-1 dapat dilihat variasi komposisi TiO<sub>2</sub> (T), SiO<sub>2</sub> (S) dan *carbon black* (CB) yang digunakan.

Tabel 2-1: KOMPOSISI LINER

Nama Liner	Filler	Composition (phr – parts per hundred resin)				
		Total Resin	Filler			
			Total	CB	S	T
L1	-	100	-	-	-	-
L2	SiO <sub>2</sub>	100	15	-	15	-
L3	CB	100	15	15	-	-
L4	TiO <sub>2</sub>	100	15	-	-	15
L5	F1	100	5	2	2	1
L6	F2	100	10	4	4	2
L7	F3	100	15	6	6	3
L8	F4	100	20	8	8	4
L9	F5	100	25	10	10	5

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Resin campuran polisulfida dan epoksi terbentuk dengan mereaksikan dua mol resin epoksi dengan satu mol resin polisulfida [Morton International, 1988]. Sama seperti reaksi antara HTPB dan TDI (matriks yang umum digunakan sebagai *binder liner*), reaksi antara epoksi, polisulfida dan *hardener* juga menghasilkan gugus OH (hidroksil). Alasan inilah yang membuat resin epoksi polisulfida juga cocok digunakan sebagai material matriks (*binder liner*).

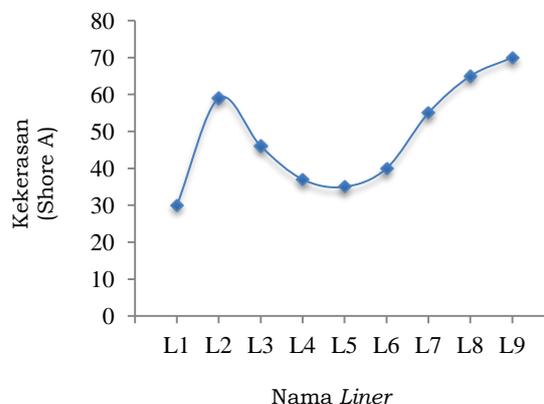
Empat sifat mekanik yang akan diselidiki dalam penelitian ini adalah kekerasan, kuat tarik (*tensile strength*) yang diwakili dengan nilai tegangan tarik maksimum ( $\sigma_m$ ), elastisitas yang diwakili dengan nilai regangan maksimum ( $\gamma_m$ ), dan kekuatan rekat antara *liner* dan logam aluminium.

Nilai besaran mekanik *liner virgin* (tanpa *filler*) tidak cukup kuat untuk menahan beban struktural dan kondisi operasi yang ekstrem selama roket beroperasi. Nilai tegangan tarik maksimum *liner* harus lebih tinggi dari propelan. Nilai tegangan tarik maksimum *liner virgin* (L1) adalah 5,7 kg/cm<sup>2</sup>, jauh lebih rendah dari propelan yang memiliki nilai tegangan tarik maksimum bervariasi antara 11 - 12 kg/cm<sup>2</sup>. Penambahan *filler* sangat penting dilakukan untuk meningkatkan kekuatan mekanik *liner*. Pada Tabel 3-1 tersaji hasil pengujian kekuatan mekanik *liner*.

Tabel 3-1: KEKERASAN, TEGANGAN TARIK MAKSIMUM, REGANGAN MAKSIMUM DAN KEKUATAN REKAT

Nama Liner	Kekerasan (Shore A)	Tegangan Tarik	Regangan	Kekuatan Rekat (kg/cm)
		Maksimum	Maksimum	
		( $\sigma_m$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	( $\gamma_m$ ) (%)	
L1	30	5,76	28,92	0,058
L2	59	23,00	28,07	0,075
L3	46	14,06	45,44	0,196
L4	37	7,37	28,52	0,048
L5	35	6,85	28,98	0,077
L6	40	16,25	52,13	0,102
L7	55	20,34	44,67	0,075
L8	65	23,82	28,48	0,072
L9	70	25,17	20,78	0,070

Kekerasan merupakan representasi dari kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi (penetrasi) atau dapat juga diartikan sebagai ketahanan material terhadap deformasi plastis yang terlokalisasi. Profil kekerasan *liner* dapat dilihat pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1: Kekerasan Liner

Pada Gambar 3-1 terlihat bahwa diantara L2, L3 dan L4 yang masing-masing ditambahkan SiO<sub>2</sub>, *carbon black* dan TiO<sub>2</sub> sebanyak 15 phr, nilai kekerasan tertinggi terjadi pada L2 (yang ditambahkan SiO<sub>2</sub>) sementara yang terendah terjadi pada L4 (yang ditambahkan TiO<sub>2</sub>). Walaupun ditambahkan jumlah *filler* yang sama, ukuran partikel *micro silica powder* yang sangat kecil mampu mengisi ruang kosong antar molekul partikel dengan lebih baik

sehingga nilai kekerasan L2 lebih tinggi dibanding L3 dan L4.

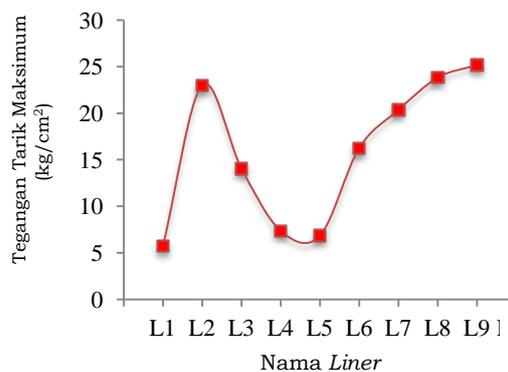
Nilai kekerasan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *filler*. Hal ini terlihat pada nilai L5 hingga L9 yang naik secara konstan seiring dengan bertambahnya jumlah *filler*. Kekerasan L8 dan L9 sudah berada diatas 60 shore A, di atas nilai kekerasan yang dipersyaratkan untuk *liner*.

Penambahan *filler* akan mengisi ruang kosong diantara struktur molekul matriks *liner* sehingga material menjadi semakin padat dan oleh karena itulah nilai kekerasannya naik. Semakin besar nilai kekerasan suatu material maka semakin baik ia menahan beban indentasi yang terjadi. Pada saat terjadi indentasi, *filler* pada *liner* akan meningkatkan kemampuan pendistribusian tekanan (*stress transfer*). Tekanan tidak hanya ditanggung sendiri oleh matriks *liner* tetapi juga didistribusikan pada *filler* sehingga *liner* menjadi lebih kuat [Industrial Mineral and Their Uses : A Handbook & Formulary, 1996].

Nilai tegangan tarik maksimum ( $\sigma_m$ ) mewakili nilai kuat tarik (*tensile strength*). Jika tegangan ini diaplikasikan pada suatu material dan dipertahankan untuk beberapa saat maka fraktur akan terjadi (material putus) [Callister, W.D., 2001]. Pada kondisi ini, material telah mengalami deformasi plastis. Pada struktur mikro, deformasi plastis mengakibatkan putusnya ikatan atom dengan atom tetangganya dan membentuk ikatan baru dengan atom lainnya. Ketika beban dilepaskan, atom-atom tidak akan kembali ke bentuk awalnya. Profil tegangan tarik maksimum pada penelitian ini terlihat pada Gambar 3-2.

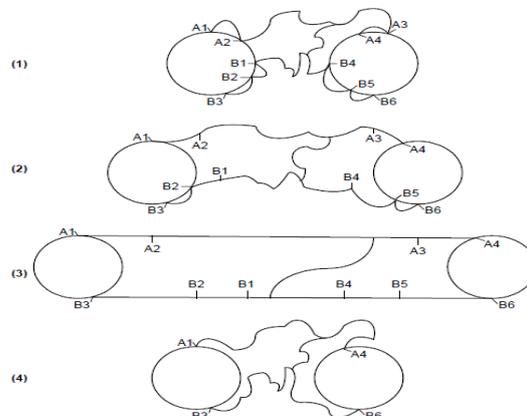
Terlihat jelas pada Gambar 3-2 bahwa diantara L2, L3 dan L4, nilai tegangan maksimum L2 adalah yang tertinggi. SiO<sub>2</sub> (*micro silica powder*) memiliki ukuran partikel sangat kecil sehingga dapat mengisi ruang kosong antar rantai polimer dengan lebih baik dibandingkan *carbon black* dan TiO<sub>2</sub>. Pada L5 hingga L9, nilai tegangan tarik

maksimum *liner* naik. Semakin banyak *filler* yang ditambahkan maka makin tinggi juga nilai kedua besaran tersebut. Partikel *filler* mengisi kekosongan diantara struktur molekul organik matriks polimer sehingga komposit menjadi lebih padat dan oleh karena itu ketahanannya terhadap tegangan tarik bertambah.



Gambar 1-2: Tegangan Tarik Maksimum Liner

Mekanisme ikatan silang yang terjadi pada material *liner* dan *filler* didalamnya pada saat terjadi gaya tarik dapat terlihat pada Gambar 3-3 seperti berikut ini.

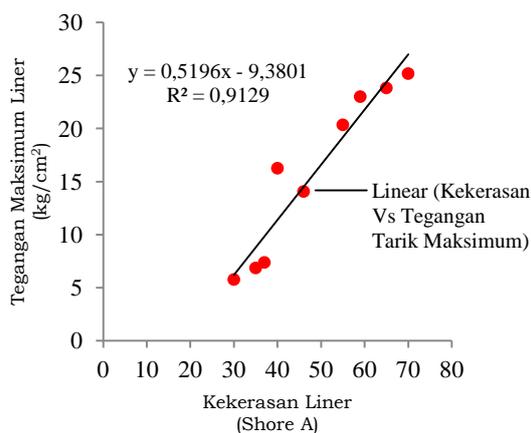


Gambar 3-3: Mekanisme Ikatan Silang Filler Dalam Mengatasi Tegangan Tarik [Industrial Mineral and Their Uses : A Handbook & Formulary, 1996]

Rantai A dan B merupakan titik kait antara struktur molekul matriks organik yang acak dengan partikel *filler* (titik-titik tersebut merupakan situs aktif *filler*). Langkah 1 hingga 4 menggambarkan apa yang terjadi pada saat material ditarik hingga mencapai titik luluhnya (titik batas antara keadaan elastis dan plastis) [Callister, W.D., 2001]. Walau secara mikroskopis telah terjadi

pelepasan beberapa situs aktif antara *filler* dan matriks polimer namun material masih berada pada kondisi elastis karena material masih bisa kembali ke kondisi semula. Bila langkah 4 diteruskan (material ditarik terus) maka rantai A dan B akan terlepas. Material akan mengalami deformasi plastis dan putus. Semakin banyak *filler* yang ditambahkan maka makin besar juga ikatan silang yang terjadi antara matriks polimer dan *filler* sehingga tentu saja akan meningkatkan ketahanannya dalam mengatasi tegangan tarik yang terjadi.

Perubahan nilai tegangan maksimum sebanding dengan perubahan nilai kekerasan. Jika kekerasan diletakkan pada sumbu x sementara tegangan tarik maksimum pada sumbu y maka akan didapatkan hubungan *linier* yang terlihat seperti Gambar 3-4.

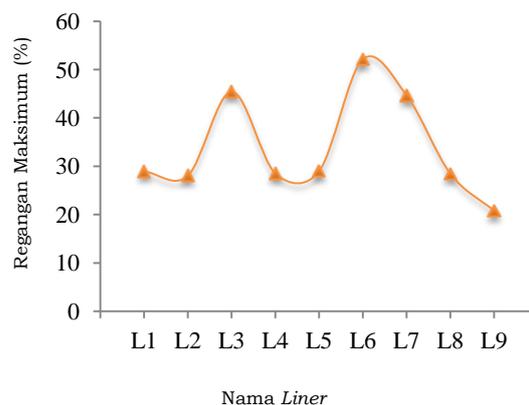


Gambar 3-4: Hubungan kekerasan dan tegangan tarik maksimum *liner*

Nilai  $R^2$  yang mendekati 1 pada Gambar 3-4 di atas menjadi bukti bahwa kekerasan dan tegangan tarik memiliki hubungan *linier* yang kuat. Makin tinggi nilai kekerasan *liner* maka akan makin tinggi pula nilai tegangan tarik maksimumnya. Semakin tinggi ketahanannya dalam mengatasi beban indentasi maka akan semakin tinggi pula ketahanannya dalam mengatasi tegangan tarik.

Selain harus memiliki nilai tegangan tarik maksimum yang tinggi, *liner* juga harus memiliki elastisitas yang baik. Elastisitas diwakili oleh nilai

regangan maksimum ( $\gamma_m$ ). Nilai regangan maksimum adalah regangan yang tercapai pada saat material putus [Callister, W.D., 2001]. Semakin besar regangan maksimum suatu bahan maka bahan tersebut dianggap makin elastis. Nilai regangan maksimum yang tinggi lebih diinginkan pada aplikasi yang melibatkan gerakan hebat [Pizzi, A and Mittal, K.L., 2003]. Perubahan nilai regangan maksimum *liner* dapat dilihat pada Gambar 3-5.



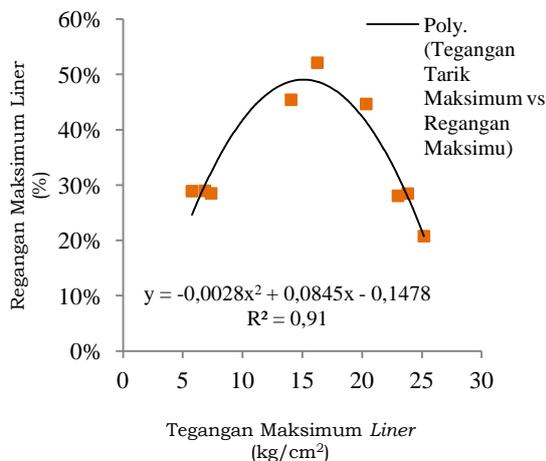
Gambar 3-5: Regangan maksimum *liner*

Pada Gambar 3-5, diantara L2 hingga L4, regangan maksimum tertinggi terjadi pada L3 (45,44%). L3 merupakan matriks *liner* yang ditambahkan *carbon black* sebesar 15 phr. *Carbon black* adalah *filler* organik yang mudah bersatu dengan matriks polimer sehingga jika ditarik akan bersifat lebih elastis. Sedangkan pada L5 hingga L9, nilai regangan tertinggi terjadi pada L6 (52,13%). *Liner* 6 merupakan *liner* dengan *filler* kombinasi 10 phr ( $TiO_2$  2 phr,  $SiO_2$  4 phr dan *carbon black* 4 phr).

Pada L5 hingga L9, awalnya semakin banyak jumlah *filler* yang ditambahkan akan meningkatkan nilai regangan maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *filler* meningkatkan elastisitas material *liner*. Namun kondisi ini tidak berlangsung terus-menerus, pada komposisi L6, nilai regangan maksimum mencapai titik tertinggi. Setelah melewati nilai tersebut, pada komposisi L7 hingga L9, justru sebaliknya, nilai regangan *liner* kembali menurun seiring dengan bertambahnya

jumlah *filler* yang dicampurkan ke dalam *liner*. Penambahan *filler* setelah komposisi L6 tidak lagi dapat berfungsi meningkatkan elastisitas *liner*. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah *filler* yang dapat menaikkan elastisitas memiliki batas tertentu. Pada L8 dan L9 elastisitas *liner* justru lebih kecil dari elastisitas *liner virgin* (L1). Semakin banyak *filler* yang ditambahkan akan membuat *liner* semakin kaku sehingga makin tidak elastis.

Hubungan antara tegangan tarik maksimum dan regangan maksimum bersifat polinomial. Hal ini terlihat pada Gambar 3-6. Kenaikan nilai tegangan maksimum awalnya akan menaikkan nilai regangan maksimum namun setelah mencapai titik maksimum tertentu, walaupun nilai tegangan tariknya terus naik, namun nilai regangan maksimum justru terus menurun.



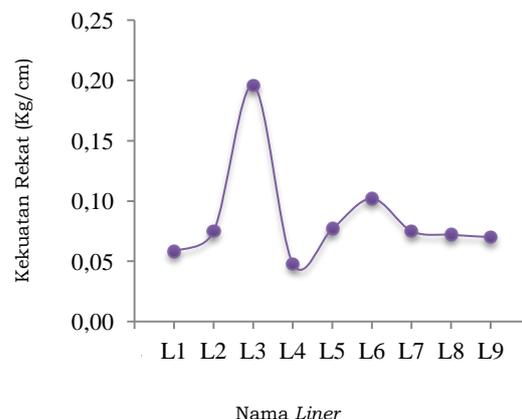
Gambar 3-6: Hubungan tegangan maksimum dan regangan maksimum *liner*

Gambar 3-6 di atas menguatkan pernyataan sebelumnya yang menyebutkan bahwa ada batas maksimum penambahan *filler* yang akan meningkatkan elastisitas *liner*. *Liner* akan semakin kuat seiring dengan makin tingginya nilai kekerasan dan tegangan tarik maksimum namun perlu diingat bahwa *liner* juga akan menjadi semakin kaku sehingga tidak elastis lagi. Pada penelitian ini, *liner* dengan nilai tegangan tarik maksimum 16,25 kg/cm<sup>2</sup>

memberikan nilai regangan maksimum tertinggi, 52%.

Suatu *liner* harus memiliki tegangan tarik maksimum yang tinggi namun juga harus memiliki elastisitas/regangan maksimum yang mencukupi. Hal ini dikarenakan *liner* harus mampu menahan *stress* struktural yang terjadi selama roket beroperasi. *Liner* yang rapuh (tidak elastis) akan membuat *liner* tidak mampu menahan gaya getar dan gelombang kejut yang terjadi pada saat roket meluncur. Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa *liner* harus memiliki nilai tegangan tarik maksimum yang lebih besar dari pada propelan (11 - 12 kg/cm<sup>2</sup>). *Liner* yang memenuhi syarat ini antara lain adalah *liner* 2, 3, 6, 7, 8 dan 9. Namun jika melihat dari sisi elastisitas, *liner* 8 dan 9 tidak dapat menjadi pilihan karena memiliki nilai regangan maksimum di bawah *liner virgin* (L1).

Selain kekerasan, tegangan tarik maksimum dan regangan maksimum, nilai kekuatan rekat *liner* juga sangat penting untuk diperhatikan. Vibrasi, gaya geser dan gelombang kejut yang sangat kuat pada saat roket beroperasi menuntut material *liner* memiliki kekuatan rekat yang baik dengan tabung motor roket. Gambar 3-7 memberikan gambaran tentang kekuatan rekat *liner* pada lembaran logam aluminium. Aluminium dipilih karena saat ini roket-roket LAPAN umumnya menggunakan tabung motor dari aluminium.



Gambar 3-7: Kekuatan rekat *liner*

Berdasarkan Gambar 3-7, kekuatan rekat *liner* tertinggi terjadi pada L3, yaitu pada *liner* yang ditambahkan *carbon black* 15 phr. Nilai kekuatan rekat dari L5 hingga L9 bervariasi pada kisaran 0,07 hingga 0,13. Nilai kuat rekat meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *filler* dan mencapai puncak pada komposisi L6. Setelah L6 nilai kuat rekat kembali menurun.

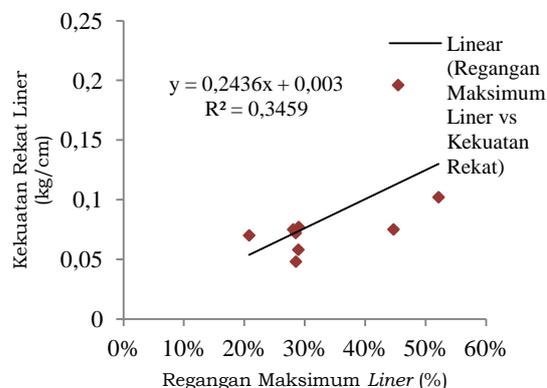
Nilai kekuatan rekat *liner* semula diperkirakan akan menurun ketika dilakukan penambahan *filler* seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Rodic [Rodic, Vesna, 2007] dan Navale [Navale, S.B, dkk., 2004]. Hipotesis tersebut tidak benar-benar terjadi pada penelitian ini. Interaksi antara logam dan komposit polimer sangat tergantung pada tipe logam dan tipe gugus fungsional yang ada pada polimer. Polimer dengan gugus polar lebih mudah merekat pada logam ketimbang polimer non polar. *Liner* epoksi polisulfida yang memiliki gugus polar (hidroksil) membuatnya mudah merekat pada logam.

Pada penambahan SiO<sub>2</sub> dan *carbon black*, komposit menjadi semakin kaya akan gugus polar. Permukaan dari silika biasanya mengandung gugus silanol (-Si-O-H), *siloxane* (-Si-C-Si-), *silane* (-Si-H), silikon organik (-Si-O-R atau -Si-C-R) atau dapat berupa anhidrat. Sementara *carbon black* memiliki variasi gugus fungsional seperti karboksil (O=C-OH), karbonil (C=O), hidroksil (-OH), kuinon (O=CC=O) dan laktol (O=C-O) yang berada pada ujung-ujung bidang dua dimensinya.

SiO<sub>2</sub> dan *carbon black* yang memiliki berbagai jenis gugus fungsional polar pada permukaannya justru menambah kekuatan rekat *liner* pada logam. Hal berbeda terjadi pada TiO<sub>2</sub> yang tidak memiliki gugus fungsional pada permukaannya, oleh karena itu kekuatan rekat L4 (*liner* dengan TiO<sub>2</sub> 15 phr) lebih kecil daripada kuat rekat *liner virgin* (L1).

Namun perlu digarisbawahi bahwa ternyata tidak selamanya penambahan *filler* meningkatkan kekuatan rekat. Hal ini terlihat pada tren grafik kekuatan rekat dari komposisi L5 hingga L9. Kekuatan rekat *liner* dengan *filler* kombinasi mencapai puncaknya pada L6 lalu turun terus hingga L9. Awalnya penambahan gugus fungsional pada matriks akan meningkatkan kerekatan, namun seiring dengan semakin menurunnya jumlah polimer matriks polar, kekuatan rekat menjadi semakin berkurang.

Selain hubungan kekerasan dengan tegangan tarik maksimum yang saling proporsional, hubungan dua sifat mekanik *liner* yang juga *linier* adalah hubungan kekuatan rekat dengan regangan maksimum (Gambar 3-8). Namun hubungan *linier* regangan maksimum dan kekuatan rekat tidak sekuat hubungan *liner* antara kekerasan dan tegangan tarik maksimum. Hal ini tercermin dari nilai R<sup>2</sup> yang kecil.



Gambar 3-8: Hubungan regangan maksimum dan kekuatan rekat *liner*

Berdasarkan hubungan *linier* yang terlihat pada Gambar 3-8, maka *liner* yang memiliki nilai regangan maksimum yang tinggi akan memiliki nilai kuat rekat yang tinggi pula. Penelitian yang dilaksanakan oleh Rodic [Rodic, Vesna, 2007] juga menyimpulkan hal yang demikian. Bahan yang memiliki nilai regangan maksimum lebih tinggi dianggap lebih elastis. Bahan yang lebih elastis memiliki keuletan yang lebih baik terhadap deformasi akibat gaya tarik.

Liner yang elastis lebih dapat menahan gaya deformasi yang terjadi karena terbentuknya situs-situs pengaitan yang kuat (*strong entanglement formation*) antara matriks polimer dan filler sehingga kerekatannya dengan logam menjadi lebih baik [Kisin, Srdjan, 2006].

#### 4 KESIMPULAN

Penambahan filler SiO<sub>2</sub>, carbon black dan TiO<sub>2</sub> sangat mempengaruhi sifat mekanik material liner. Penambahan filler terbukti memperkuat liner (sifat mekanik meningkat).

Hal yang di luar perkiraan terjadi pada nilai kekuatan rekat. Nilai kekuatan rekat yang semula diperkirakan akan turun justru naik setelah dilakukan penambahan filler. Hanya liner dengan penambahan TiO<sub>2</sub> sebesar 15 phr saja yang kekuatan rekatnya lebih rendah dari liner virgin.

Pada penelitian ini didapatkan dua profil hubungan yang linier yaitu pada kekerasan dengan tegangan tarik maksimum dan pada kekuatan rekat dengan regangan maksimum. Makin tinggi nilai kekerasan liner maka makin tinggi pula nilai tegangan tarik maksimumnya. Makin tinggi nilai regangan maksimum liner maka makin tinggi pula nilai kekuatan rekatnya.

Tegangan tarik maksimum dan regangan maksimum memiliki profil hubungan polinomial. Regangan maksimum tertinggi (52%) dicapai pada nilai tegangan tarik maksimum 16,25 kg/cm<sup>2</sup>.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Kementerian Riset dan Teknologi yang telah membiayai penelitian ini melalui program beasiswa pascasarjana RISTEK tahun 2011 (Surat Keputusan Menteri Negara Riset dan Teknologi RI no. 243/M/Kp/IX/2011).

#### DAFTAR RUJUKAN

Callister, W.D., 2001. *Fundamentals of Material Science and Engineering*,

5th Edition, New York : John Wiley & Sons.

Dewi, Wiwiek U., 2011. *Penentuan Komposisi Kombinasi Filler Carbon Black, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan ZnO Sebagai Material Liner Roket Case Bonded*. PUSPITEK, Serpong, Seminar Nasional IPTEK Dirgantara Nasional LAPAN ke-15. Hal. 288-294.

Erryani, Aprilia, 2011. *Penambahan Zirkonium Silikat (ZrSiO<sub>4</sub>) Sebagai Insulator Termal Pada Liner Roket Propelan Padat*, P. Tesis S2 : Ilmu Material. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Giants, T.W., 1991. *DTIC Home Page*. [Online] April 1, <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA242297>.

Harsch, Margit, Kocsis, J.K and Holst, Marco, 2007. *Influence of Filler and Additives on The Cure Kinetics of an Epoxy/Anhydride Resin* : European Polymer Journal, Vol. 43, Hal. 1168-1178.

*Industrial Mineral and Their Uses : A Handbook & Formulary*. New Jersey : Noyes Publication, 1996.

Kisin, Srdjan, 2006. *Adhesion Changes at Metal-Polymer Inter-faces: Study of the Copper-(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) System*, Master Thesis, Netherlands : Materials and Interface Chemistry (SMG), Department of Chemical Engineering and Chemistry, Eindhoven University of Technology.

Morton International, 1988. *LP-Epoxy Resins*, Technical Catalogue. Coventry, UK: Morton International Ltd.

Navale, S.B, dkk., 2004. *Effect of Additives on Liner Properties of Case Bonded Composite Propellant*, Defence Science Journal, Vols. 54, No. 3, Hal. 353-359.

Nelson, R. W., dkk., 2000. *Erosion Resistant-Low Signature Liner for*

- Solid Propellant Rocket Motor*.  
6,054,521 United States of America.
- Pizzi, A and Mittal, K.L., 2003. *Handbook of Adhesive Technology*, 2nd Edition, Revised & Expanded, New York : Marcel Dekker.
- Rodic, Vesna, 2007. *Case Bonded System for Composite Solid Propellant*, Scientific Technical Review, Vol. LVII, No. 3-4, Hal. 77-82.
- Rohman, Fathur, 2011. *Aplikasi Liner dengan Metode Lining pada Motor Roket Case Bonded*, PUSPITEK, Serpong, Seminar Nasional IPTEK Dirgantara Nasional Lapan ke-15, Hal. 100-106.
- Sayles, D.C., 1993. *Cloth-Line Interceptor Motor Insulation for Strong Insulation-to-Propellant Interlock*. 5,209,879 United States of America.
- Sutton, G. P. And Biblarz, Oscar, 2001. *Rocket Propulsion Elements*, 7th Edition, New York, John Wiley & Son.