

Kinetika vulkanisasi dan sifat mekanis komposit *acrylonitrile butadiene rubber* (NBR)

Vulcanization kinetics and mechanical properties of acrylonitrile butadiene rubber (NBR) composite

Arum Yuniari*, Ike Setyorini, Hesty Eka Mayasari

Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik. Jl Sokonandi No. 9 Yogyakarta 55166, Indonesia

*Penulis korespondensi. Telp.: +6274 512929, 563939, Fax.: +6274 563655

E-mail: arumyuniari@yahoo.com

Diterima: 5 September 2016 Direvisi: 13 Oktober 2016 Disetujui: 17 Oktober 2016

ABSTRACT

The aim of this research was to study the effect of vulcanization temperature on mechanical properties and curing kinetics of NBR composites. The composites were formulated by using two types of carbon black i.e. N-330 and N-774. The curing kinetics was determined using Moving Die Rheometer. The network formation processes were related to torque and time. The vulcanizates were obtained by compression molding in a hydraulic press at 150°C and 160°C. The mechanical properties observed include tensile strength, elongation at break, hardness, and tear strength. Kinetics studies were approached by Arrhenius equation and the reaction mechanism was assumed following first order reaction. The results showed that curing kinetics can be approached by the equation from the rheometer data. The surface area of carbon black strongly influenced the mechanical properties and rate constant (k) of NBR composite. Carbon black N-330 can be used as a desirable reinforcing filler which gave a higher mechanical properties than the other type of carbon black.

Keywords: curing kinetics, NBR, temperature, mechanics.

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh suhu vulkanisasi terhadap sifat mekanis dan kinetika vulkanisasi komposit NBR. Formulasi komposit menggunakan dua macam *carbon black* yaitu N-330 dan N-774. Kinetika vulkanisasi ditentukan dengan alat *Moving Die Rheometer*; dimana proses vulkanisasi berlangsung dikaitkan dengan torsi dan waktu. Proses pembuatan vulkanisat menggunakan *hydraulic press* pada suhu 150°C dan 160°C. Sifat mekanis komposit NBR yang diamati adalah tegangan putus, perpanjangan putus, kekerasan dan kuat sobek. Kinetika vulkanisasi didekati dengan persamaan Arrhenius dikaitkan dengan mekanisme reaksi dan diasumsikan orde satu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinetika vulkanisasi dapat didekati dengan persamaan dari data reometer. *Surface area carbon black* sangat kuat mempengaruhi sifat mekanis dan *rate constant* (k) dari komposit NBR. *Carbon black* N 330 merupakan bahan pengisi yang bersifat sebagai penguat dan memberikan sifat mekanis tertinggi dibandingkan *carbon black* jenis lainnya.

Kata kunci: kinetika vulkanisasi, NBR, suhu, mekanis.

PENDAHULUAN

Elastomer merupakan polimer bercabang dengan modulus elastisitas rendah dan kemampuan deformasi tinggi sehingga dimungkinkan memiliki penggunaan lebih luas. *Acrylonitrile butadiene rubber* (NBR) merupakan kopolimer dari akrilonitril dan butadiena diproses dengan cara kopolimerisasi emulsi. Beberapa sifat yang dimi-

liki NBR antara lain makin tinggi kadar akrilonitril maka ketahanan minyak, tegangan putus dan ketahanan kikis tinggi tetapi sifat pampat tetap (*compression set*) dan elastisitas menurun. NBR merupakan polimer sintesis mempunyai ketahanan minyak sangat baik tetapi sifat mekanisnya rendah. Hal ini disebabkan NBR bersifat non kristalin. Pada proses pembuatan produk karet dengan

bahan baku NBR perlu diberi bahan pengisi agar diperoleh sifat mekanis tinggi. Beberapa bahan aditif yang digunakan untuk pembuatan produk karet: bahan pemvulkanisasi, akselerator, aktivator, anti oksidan, *antidegradant*, bahan pengisi dan *plasticizer*.

Bahan pengisi memegang peran penting dalam pembuatan produk karet. Penggunaan bahan pengisi untuk memperkuat sifat vulkanisat NBR telah dilakukan oleh beberapa peneliti. *Carbon black* merupakan bahan pengisi yang banyak digunakan dalam industri karet, karena bersifat sebagai penguat. Selama proses pembuatannya, *carbon black* berbentuk agregat. Bentuk dan derajat percabangan agregat disebut struktur. Struktur dari *carbon black* ditentukan oleh bentuk dan derajat percabangan. Penggunaan *carbon black* sebagai bahan pengisi pada elastomer NBR akan menghasilkan vulkanisat dengan sifat mekanis baik (Jovanovic *et al.*, 2009; Mostafa *et al.*, 2009). Indrajati *et al.* (2012) mempelajari pengaruh HAF/SRF terhadap sifat karakteristik vulkanisasi, morfologi dan *swelling* vulkanisat NBR. Peningkatan struktur dari *carbon black* berpengaruh terhadap sifat kekerasan, modulus dan viskositas campuran (Allegra *et al.*, 2008). Jovanovic *et al.* (2013) melaporkan penambahan *carbon black* pada komposit NBR/EPDM akan menaikkan torsi maksimum dan minimum, tetapi waktu *scorch* (t_s) dan *cure rate index* (CRI) turun. Beberapa penelitian terkait komposit NBR telah dilakukan oleh beberapa peneliti antara lain: degradasi NBR dalam *rapeseed biodiesel* oleh Akhlaghi *et al.* (2015), pencampuran NBR dan NR menggunakan *compatibilizer epoxidized natural rubber* dilaporkan oleh Rajasekar *et al.* (2009). Mobilitas molekular dari kopolimer nano komposit NBR dengan bahan pengisi *organoclay* telah diteliti oleh Chung *et al.* (2008). Reaksi ikatan silang antara NBR dan *copper sulfate* dilaporkan oleh Yua *et al.* (2007).

Karakteristik vulkanisasi digunakan untuk mengetahui reaksi vulkanisasi yang ditunjukkan dari kurva torsi versus waktu yang diperoleh dari alat uji reometer (Fathurrohman *et al.*, 2015). Model kinetik untuk mempelajari reaksi vulkanisasi sudah dipelajari oleh beberapa peneliti. Kinetika vulkanisasi dari komposit karet dapat dihitung dengan beberapa cara antara lain: *swelling*, tegangan putus, kekerasan, DSC, sulfur bebas dan ikatan sambung silang (Zaimova *et al.*, 2011). Kinetika vulkanisasi dan sifat mekanis dari *ethylene propylene diene monomer* (EPDM) dipelajari oleh

Fathurrohman *et al.* (2015). Karakteristik vulkanisasi, sifat mekanis dan *swelling* dari campuran EPDM dan *chloroprene rubber* dengan bahan pengisi *marble sludge* oleh Ahmed *et al.* (2012). Jovanovic *et al.* (2013) telah mempelajari pengaruh *carbon black* terhadap kinetika vulkanisasi (energi aktivasi dan energi *reversion*), morfologi dan sifat termal dari campuran NBR/EPDM. Pada makalah ini akan dipelajari kinetika vulkanisasi dan sifat mekanis komposit NBR yang dibuat pada suhu vulkanisasi 150°C dan 160°C dengan bahan pengisi *carbon black* N330 dan N774.

BAHAN DAN METODE

Bahan Penelitian

Bahan baku yang digunakan adalah: NBR merek Krynac 4975 F dengan viskositas mooney ML (1+4) 100°C (75 ± 5), kadar ACN 48,5 ± 1,5%, kadar volatil ≤ 5, *specific gravity* 1,01, dan kadar abu ≤ 0,7. Bahan aditif yang digunakan adalah: *carbon black* jenis N330 (*specific gravity* 1,81 g/cm³, absorpsi DBP 102 ml/100g, ukuran partikel 26-30 nm, luas permukaan 70-90 m²/g) dan N774 (*specific gravity* 3,36 g/cm³, absorpsi DBP 77 ml/100 g, ukuran partikel 60-70 nm) ex. OCI sebagai *filler*, *paraffin wax* Antilux 654 A sebagai antioksidan, *paraffinic oil* dari Indrasari, seng oksida (ZnO) ex. Indoxide dan asam stearat Aflux 42 M ex. Rhein Chemie, sebagai pengaktif, TMQ ex. Kemai sebagai antioksidan, 6PPD ex. Starchem sebagai antiozonan, tiuram disulfida (TMTD) *dibenzothiazyl disulfide* (MBTS) ex. Shandong sebagai akselerator, serta sulfur ex. Miwon sebagai bahan pemvulkanisasi.

Peralatan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alat proses dan alat uji terdiri atas: *two roll mills*, *moving die rheometer* MDR merek Gotech 3000 A, *hydraulic press* MN *Vulcanizing Press*, Spec XLB, D 400 x 400 x1, *Hardness Shore A* durometer, timbangan digital merek Denver, *tensile strength tester* merek Kao Tieh model KT 7010A seri 70287 kapasitas 500 kg.

Metode Penelitian

NBR dan bahan tambahan ditimbang sesuai formulasi, selanjutnya digiling dengan *two roll mills* dengan suhu 40-50°C. Waktu yang diperlukan untuk pencampuran selama 37 menit. Kompon yang diperoleh dikondisikan pada ruang kondisi pada suhu 23±2°C selama 24 jam. Setelah itu

Tabel 1. Formulasi kompon NBR.

Bahan	Jumlah, phr			
	NBR1	NBR2	NBR3	NBR4
NBR	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5
Asam stearat	1	1	1	1
Paraffinic oil	10	10	10	10
C. Black N330	0	40	0	20
C. Black. N774	0	0	40	20
6 PPD	2	2	2	2
TMQ	2	2	2	2
Paraffin wax	0,5	0,5	0,5	0,5
MBTS	1,5	1,5	1,5	1,5
TMTD	0,5	0,5	0,5	0,5
Sulfur	1,5	1,5	1,5	1,5

kompon diuji dengan alat reometer pada suhu 150°C dan 160°C untuk mendapatkan data t_{s_2} , t_{90} , M_H , dan M_L . Selanjutnya kompon di vulkanisasi menggunakan *hydraulic press* pada tekanan 150 kg/cm², suhu 150°C dan 160°C dengan waktu sesuai dengan reometer.

Pada penelitian ini komposit NBR dibuat menggunakan 2 (dua) jenis *carbon black* (N330 dan N774) sedang jumlah yang ditambahkan tetap. Adapun rancangan penelitian tertuang pada Tabel 1.

Pengujian waktu vulkanisasi dilakukan menggunakan reometer MDR merk Gotech 3000 A frekuensi 100 cpm dan sudut 3 derajat dengan suhu 150°C dan 160°C menggunakan ASTM D 2084-11. Energi pencampuran kompon dicatat. Beberapa parameter kinetika *curing* mencakup M_L (torsi minimum), M_H (torsi maksimum), t_{90} waktu optimum vulkanisasi dan t_{s_2} (waktu *scorch*) diamati. Kinetika vulkanisasi didekati dengan persamaan Arrhenius dan diasumsikan reaksi orde

satu.

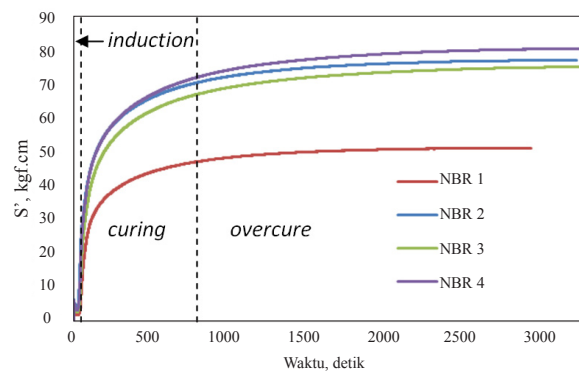
Kompon NBR yang akan diuji sifat mekanisnya di vulkanisasi dengan *hydraulic press* pada tekanan 150 kg/cm², suhu 150°C dan 160°C, waktu sesuai waktu optimum vulkanisasi (t_{90}). Pengujian sifat mekanis vulkanisat meliputi: tegangan putus dan perpanjangan putus, kuat sobek (ASTM D 412- 87), dan kekerasan (BS 903).

HASIL DAN PEMBAHASAN

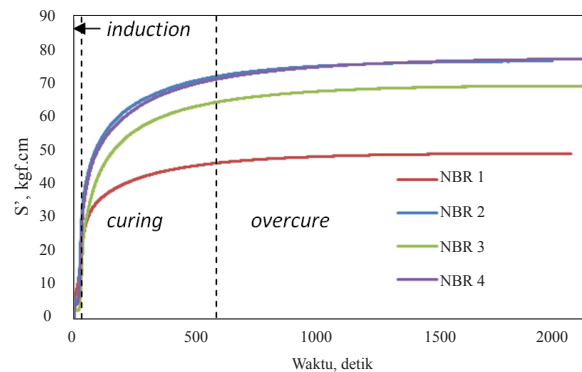
Studi Kinetika Vulkanisasi

Karakteristik vulkanisasi komposit NBR dengan bahan pengisi *carbon black* ditentukan dengan peralatan reometer Gotech MDR 3000 A, dari peralatan tersebut diperoleh kurva torsi versus waktu. Data tersebut digunakan untuk mengevaluasi parameter kinetika.

Gambar 1 dan 2 merupakan kurva vulkanisasi komposit NBR dengan bahan pengisi *carbon black* N330, N774, dan N330/N774 pada suhu 150°C dan 160°C. Proses vulkanisasi komposit



Gambar 1. Kurva vulkanisasi komposit NBR pada suhu 150°C.



Gambar 2. Kurva vulkanisasi komposit NBR pada suhu 160°C.

NBR dengan bahan pengisi *carbon black* menggunakan sulfur sebagai bahan pemvulkanisasi. Hasil uji reometer menghasilkan kurva vulkanisasi yang terdiri dari 3 (tiga) tahap. Tahap pertama adalah waktu *scorch* (ts_2)/*induction time* merupakan waktu terjadinya reaksi kimia secara lambat antara karet dan aditif. Tahap tersebut merupakan waktu aman untuk proses vulkanisasi, pada tahap induksi terjadi proses awal *carbon black* berinteraksi dengan matriks polimer menghasilkan ikatan silang fisis yang digambarkan dengan kenaikan M_L (torsi minimum). Apabila suhu vulkanisasi naik dari (150°C ke 160°C) maka waktu *scorch* (ts_2) turun, reaksi vulkanisasi berlangsung sangat cepat. Hasil uji ini sesuai dengan penelitian dari (Hasan *et al.*, 2012). Tahap kedua *curing* (tc_{90}), pada kondisi tersebut proses pembentukan ikatan silang berlangsung, terjadi reaksi antara molekul karet dan sulfur membentuk ikatan sulfida (mono-, di- atau poli-). Apabila suhu vulkanisasi naik maka waktu optimum vulkanisasi turun, hal ini sesuai pendapat Fathurrohman *et al.* (2015). Tahap ketiga adalah *overcure*. Reaksi *overcuring* sangat tergantung dari jenis karet, bahan pemvulkanisasi dan suhu. Pada kondisi ideal kurva keseimbangan vulkanisasi diperoleh dari kurva torsi versus waktu. Beberapa kompon karet menunjukkan sifat tidak ideal, yaitu terjadi reversi (karet menjadi lembek) dan *marching* (karet menjadi kaku). Menurut (Karaagac *et al.*, 2009) tahap ketiga dapat terjadi tergantung formula dari kompon karet.

Tabel 2 merupakan data karakteristik vulkanisasi komposit NBR pada suhu 150°C dan 160°C. Kenaikan suhu vulkanisasi berpengaruh terhadap waktu *scorch*, waktu optimum vulkanisasi, torsi minimum, torsi maksimum, delta torsi, dan *cure rate index* (CRI) dari komposit NBR. Suhu vulkanisasi naik maka ts_2 dan tc_{90} turun. De-

mikian pula ukuran partikel *carbon black* berbeda akan memberikan waktu *scorch*, waktu optimum vulkanisasi, torsi minimum, torsi maksimum, delta torsi, dan CRI yang berbeda. *Surface area* partikel *carbon black* makin kecil waktu *scorch*, waktu optimum vulkanisasi, torsi minimum, torsi maksimum, delta torsi, dan CRI naik.

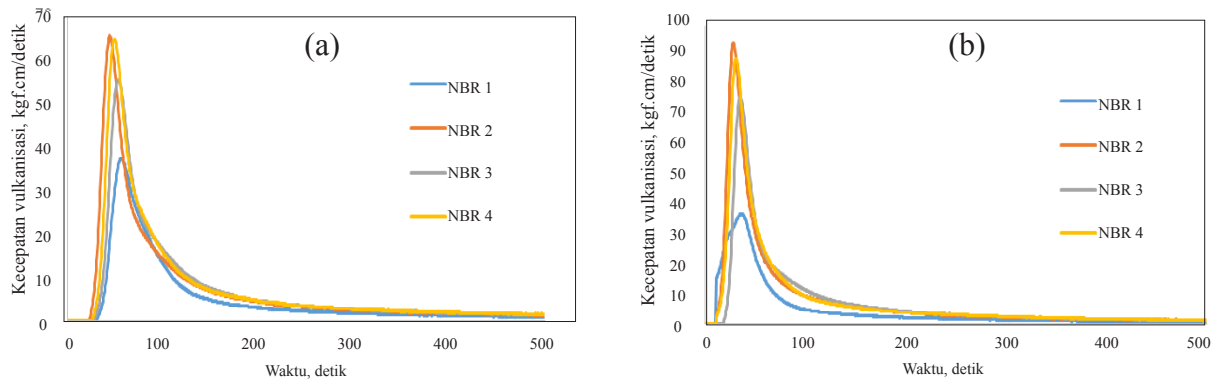
Dari hasil reometer juga dapat diketahui kecepatan vulkanisasi masing-masing komposit yang ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan kecepatan vulkanisasi komposit NBR pada suhu 150°C dan 160°C. Komposit NBR tanpa *carbon black* (NBR 1) memiliki kecepatan vulkanisasi paling rendah bila dibandingkan komposit NBR dengan *carbon black*. Komposit NBR dengan *carbon black* N330 (NBR 2) memiliki kecepatan vulkanisasi paling tinggi baik pada suhu vulkanisasi 150°C maupun 160°C (65,72 dan 94,32 kgf.cm/detik). Komposit NBR 4 (N330/N774) memiliki kecepatan vulkanisasi lebih tinggi dibanding komposit NBR 3 (N774). Mobilitas rantai molekul dipengaruhi oleh besar kecilnya ukuran partikel, makin kecil ukuran partikel maka mobilitas rantai molekul besar makin besar sehingga mempercepat reaksi vulkanisasi. Hal ini sesuai pendapat Li *et al.* (2008) yang menyimpulkan bahwa kecepatan vulkanisasi dipengaruhi oleh *surface area carbon black* dan kandungan sulfur pada bahan pengisi, yang menyebabkan terbentuknya ikatan fisika dan kimia.

Karet dengan formulasi berbeda akan memiliki kinetika vulkanisasi berbeda, termasuk bila digunakan jumlah dan ukuran *carbon black* yang berbeda. Hal ini akan berpengaruh pada interaksi matriks *carbon black*. Komposisi NBR dengan bahan pengisi *carbon black* N330 nilai torsi lebih besar dibandingkan komposit NBR dengan *carbon black* N774 tetapi delta torsi paling tinggi adalah komposit NBR dengan *carbon black* N330/N

Tabel 2. Karakteristik vulkanisasi komposit NBR.

Vulkanisat	Suhu vulkanisasi									
	150°C					160°C				
	ts_2 , s	tc_{90} , s	M_L , kgf.cm	M_H , kgf.cm	delta torsi, kgf.cm	ts_2 , s	tc_{90} , s	M_L , kgf.cm	M_H , kgf. cm	delta torsi, kgf.cm
NBR 1	38	684	2,12	52,51	50,39	19	424	4,74	49,75	45,01
NBR 2	24	780	8,35	80,31	71,96	17	425	4,55	75,88	71,34
NBR 3	33	873	3,29	77,51	74,22	23	498	2,62	70,54	67,92
NBR 4	32	850	3,45	81,84	78,39	20	502	3,76	77,13	73,38

ts_2 : waktu *scorch*, tc_{90} : waktu optimum vulkanisasi, M_L : torsi minimum, M_H : torsi maksimum.



Gambar 3. Kecepatan vulkanisasi komposit NBR (a) suhu 150°C (b) suhu 160°C.

774. Torsi maupun delta torsi naik mengindikasikan ikatan sambung silang yang terbentuk cukup besar. *Carbon black* dengan ukuran partikel kecil mempunyai *surface area* maupun *surface reactivity* cukup tinggi. Hal ini berdampak pada kemampuan interaksi dengan matriks karet cukup tinggi. Apabila suhu vulkanisasi dinaikkan maka delta torsi elastomer naik, hal ini berpengaruh pada interaksi matriks *carbon black*, stabilitas termal dan terbentuknya ikatan sambung silang. Nilai torsi yang diperoleh selama proses vulkanisasi dari kompon karet terkait dengan formulasi kompon dan suhu vulkanisasi (Toth & Zanichelli, 1991). *Cure rate index* (CRI) dihitung dengan rumus (Marković *et al.*, 2007):

$$CRI = \frac{100}{t_{c_{90}} - t_{s_2}} \quad (1)$$

Komposit NBR tanpa ataupun dengan *carbon black* mempunyai CRI berbeda, seperti ditunjukkan pada Tabel 3. CRI komposit NBR tanpa *carbon black* lebih tinggi bila dibandingkan komposit dengan *carbon black*. Bila ditinjau dari ukuran partikel yang digunakan maka komposit NBR dengan *carbon black* N330, nilai CRI lebih tinggi dari pada komposit NBR dengan *carbon black* N774 maupun komposit NBR dengan *carbon black* campuran keduanya. CRI lebih tinggi menunjukkan kecepatan vulkanisasi lebih cepat atau terjadi penurunan optimum waktu vulkanisasi (Hasan *et al.*, 2012). Suhu vulkanisasi berpengaruh terhadap CRI, suhu vulkanisasi naik maka CRI akan naik hal ini sesuai penelitian Fathurrohman *et al.* (2015) dan Hasan *et al.* (2013).

Kinetika pematangan dapat digunakan untuk memprediksi waktu pematangan optimum menggunakan model kinetika berdasarkan hasil eksperimen. Reaksi kimia secara umum dapat dimo-

delkan dalam persamaan diferensial seperti pada persamaan (2):

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T).f(\alpha) \quad (2)$$

α adalah konversi yang didapat dari data reometer, dihitung dengan persamaan berikut:

$$\alpha = \frac{M_t - M_L}{M_H - M_L} \quad (3)$$

Dalam studi ini, diambil M_t pada selisih torsi 25% hingga 45% (Semsarzadeh *et al.*, 2005). Reaksi vulkanisasi diasumsikan mengikuti orde pertama dan sebanding dengan fraksi material yang tidak berikatan silang $(1-\alpha)$, maka:

$$f(\alpha) = (1-\alpha) \quad (4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4) ke persamaan (2), didapatkan persamaan:

$$\frac{d\alpha}{(1-\alpha)} = k(T).dt \quad (5)$$

Pengintegralan persamaan (5) menghasilkan:

$$\ln \frac{1}{(1-\alpha)} = kt \quad (6)$$

Dengan substitusi persamaan (3) ke persamaan (6) didapat:

$$\ln \frac{M_H - M_L}{M_H - M_t} = kt \quad (7)$$

Dari persamaan (7) dihasilkan grafik dan didapatkan k yang merupakan konstanta kecepatan reaksi.

Dari Tabel 3 diketahui bahwa konstanta kecepatan reaksi komposit NBR dengan *carbon black* B N330 lebih besar dari N774. Konstanta kecepat-

Tabel 3. Cure rate index (CRI) dan rate constant vulkanisat NBR.

Vulkanisat	CRI		Rate constant, k (s^{-1})	
	150	160	150	160
NBR 1	9,29	14,81	0,0120	0,0227
NBR 2	7,94	14,71	0,0100	0,0204
NBR 3	7,14	12,63	0.0082	0.0124
NBR 4	7,33	12.45	0.0092	0.0171

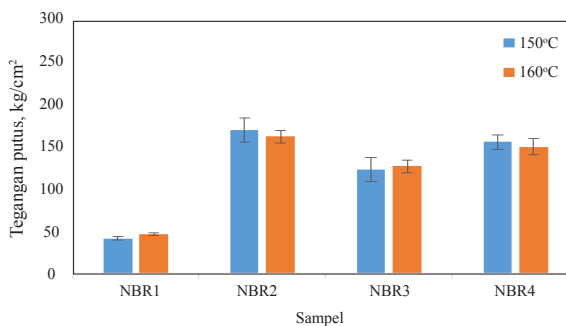
an reaksi setiap vulkanisat lebih besar pada suhu 160°C. Konstanta kecepatan reaksi menunjukkan besarnya kecepatan reaksi. Maka dapat diketahui bahwa *carbon black* N330 memberikan kecepatan reaksi yang lebih cepat jika dibandingkan *carbon black* N774 karena diameter partikelnya yang lebih kecil. Campuran CB N330 dan N774 memberikan kecepatan reaksi yang lebih cepat jika dibandingkan CB N774. Diameter partikel kecil (*surface area*) besar, makin banyak matriks karet yang berikatan dengan *carbon black* sehingga reaksi sambung silang berjalan lebih cepat.

Sifat Mekanis Komposit NBR

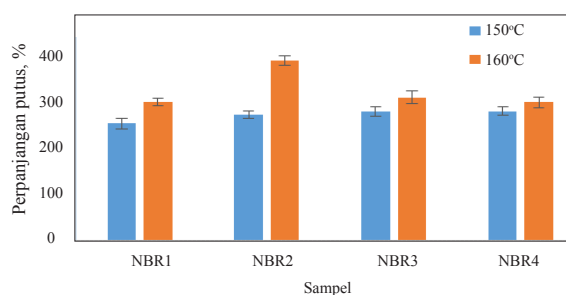
Dalam penelitian ini juga dipelajari sifat mekanis komposit NBR pada suhu vulkanisasi 150°C dan 160°C. Parameter yang diuji adalah tegangan putus, perpanjangan putus, kekerasan, dan kuat sobek yang ditunjukkan pada Gambar 4-8.

Penambahan *carbon black* kedalam polimer NBR bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanis dari komposit NBR. Sifat *carbon black* sebagai *reinforced filler* sangat erat kaitannya dengan bentuk dan ukuran partikel serta interaksi polimer dengan *carbon black*. Sifat mekanis komposit NBR dipengaruhi oleh jumlah *carbon black* yang digunakan, dispersi partikel, ukuran partikel, *surface area*, struktur agregat, dan aktivitas permukaan (Gerspacher, 2009). Sifat mekanis komposit NBR yang mencakup tegangan putus, perpanjangan putus, kekerasan dan kuat sobek pada suhu vulkanisasi 150°C dan 160°C terdapat pada Gambar 4, 5, 6, dan 7.

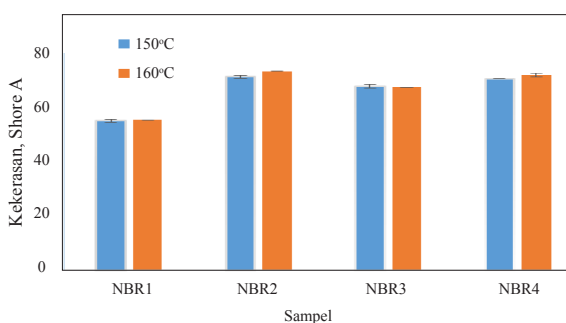
Komposit NBR tanpa *carbon black* mempunyai sifat mekanis lebih rendah bila dibandingkan dengan komposit NBR dengan tambahan bahan pengisi *carbon black*. Bila ditinjau dari ukuran partikel *carbon black* yang digunakan maka komposit NBR dengan *carbon black* N 330 (30 nm), mempunyai nilai sifat mekanis lebih tinggi bila dibandingkan dengan komposit NBR N774 (70



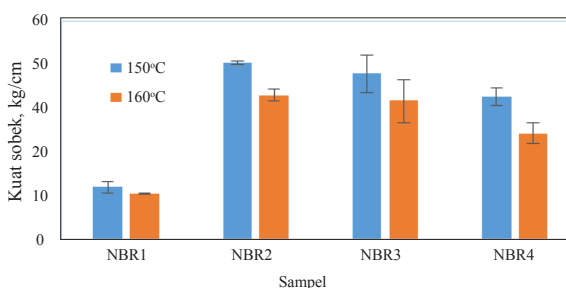
Gambar 4. Tegangan putus komposit NBR pada berbagai jumlah dan jenis *carbon black* di vulkanisasi pada suhu 150°C dan 160°C.



Gambar 5. Perpanjangan putus komposit NBR pada berbagai jumlah dan jenis *carbon black* yang di vulkanisasi pada suhu 150°C dan 160°C.



Gambar 6. Kekerasan komposit NBR pada berbagai jumlah dan jenis *carbon black* yang divulkanisasi pada suhu 150°C dan 160°C.



Gambar 7. Kuat sobek komposit NBR pada berbagai jumlah dan jenis *carbon black* pada suhu vulkanisasi 150°C dan 160°C.

nm) maupun komposit NBR dengan bahan pengisi *carbon black* N330/N774 hal ini sesuai pendapat (Rattanasom & Prasertsri, 2009). Suhu vulkanisasi berpengaruh terhadap sifat komposit NBR. Sifat mekanis komposit NBR (150°C) lebih besar dari pada komposit NBR (160°C). Hal ini disebabkan waktu aman untuk proses vulkanisasi (t_{s_2}) komposit NBR (150°C) juga lebih lama dari komposit NBR (160°C) terdapat pada Tabel 2.

KESIMPULAN

Parameter kinetika vulkanisasi dapat diperoleh dari data hasil uji reometer. Suhu vulkanisasi berpengaruh terhadap parameter kinetika vulkanisasi. Konstanta kecepatan reaksi meningkat dengan kenaikan suhu. Konstanta kecepatan reaksi komposit NBR dengan *carbon black* N330 lebih besar dibandingkan dengan *carbon black* N774. Penambahan *carbon black* N330 dengan ukuran partikel (30 nm) menurunkan waktu *scorch* (t_{s_2}) dan waktu optimum vulkanisasi (t_{90}) tetapi memberikan kecepatan vulkanisasi lebih cepat. Suhu vulkanisasi berpengaruh terhadap sifat mekanis komposit NBR. Sifat mekanis komposit NBR (150°C) lebih baik dari komposit NBR (160°C). Komposit NBR dengan *carbon black* N330 mempunyai sifat mekanis tertinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Balai Besar Kulit, Karet dan plastik yang sudah memberikan dana untuk kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, K., Nizami, S. S., Raza, N. Z., & Shirin, K. (2012). Cure characteristics, mechanical and swelling properties of marble sludge filled EPDM modified chloroprene rubber blends. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 2, 90-97. <http://dx.doi.org/10.4236/amc.2012.22016>

Akhlaghi, S., Hedenqvist, M. S., Conde Brana, M. T., Bellander, M., & Gedde, U. W. (2015). Deterioration of acrylonitrile butadiene rubber in rapeseed biodiesel. *Polymer Degradation and Stability*, 111, 211-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.11.012>

Allegra, G., Raos, G., & Vacatello, M. (2008). Theories and simulations of polymer-based nanocomposites: From chain statistics to reinforcement. *Progress in Polymer Science*, 33(7), 683-731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.02.003>

Chung, J. W., Han, S. J., & Kwak, S. (2008). Dynamic viscoelastic behavior and molecular mobility of

acrylonitrile-butadiene copolymer nanocomposites with various organoclay loadings. *Composites Science and Technology*, 68(6), 1555-1561. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.025>

Fathurrohman, M. I., Maspanger, D. R., & Sutrisno, S. (2015). Vulcanization kinetics and mechanical properties of ethylene propylene diene monomer thermal insulation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 10(2), 104-110. <http://dx.doi.org/10.9767/bcrec.10.2.6682.104-110>

Gerspacher, M. (2009). Advanced CB characterizations to better understand polymer-filler interaction: A critical survey. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 62(5), 233-239.

Hasan, A., Rochmadi, Sulisty, H., & Honggokusumo, S. (2012). The effect of rubber mixing process on the curing characteristics of natural rubber. *Makara Journal of Technology*, 16(2), 109-115. <http://dx.doi.org/10.7454/mst.v16i2.1508>

Hasan, A., Rochmadi, Sulisty, H., & Honggokusumo, S. (2013). Vulcanization kinetics of natural rubber based on free sulfur determination. *Indonesian Journal of Chemistry*, 13(1), 21-27.

Indrajati, I. N., Dewi, I. R., & Irwanto, D. (2012). Pengaruh variasi rasio HAF/SRF terhadap sifat vulkanisat NBR. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*. 28(2), 59-68. <http://dx.doi.org/10.20543/mkjp.v28i2.106>

Jovanović, V., Budinski-Simendić, J., Samarzija-Jovanović, S., Marković, G., & Marinović-Cincović, M. (2009). The influence of carbon black on curing kinetics and thermal aging of acrylonitrile-butadiene rubber. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 15(4), 283-289. <http://dx.doi.org/10.2298/CICEQ0904283J>

Jovanović, V., Samarzija-Jovanović, S., Budinski-Simendić, J., Marković, G., & Marinović-Cincović, M. (2013). Composites based on carbon black reinforced NBR/EPDM rubber blends. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 333-340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.020>

Karaagac, B., Inal, M., & Deniz, V. (2009). Artificial neural network approach for predicting optimum cure time of rubber compounds. *Materials & Design*, 30(5), 1685-1690. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.010>

Li, Z. H., Zhang, J., & Chen, S. J. (2008). Effects of carbon blacks with various structures on vulcanization and reinforcement of filled ethylene-propylene-diene rubber. *Express Polymer Letters*, 2(10), 695-704. <http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2008.83>

Marković, G., Marinović-Cincović, M., Radovanović, B., & Budinski-Simendić, J. (2007). Rheological and mechanical properties of wood flour filled polyisoprene/chlorosulphonated polyethylene rubber blends. *Chemical Industry & Chemical*

- Engineering Quarterly*, 13(4), 186-191. <http://dx.doi.org/10.2298/CICEQ0704186M>
- Mostafa, A., Abouel-Kasem, A., Bayoumi, M. R., & El-Sebaie, M. G. (2009). The influence of CB loading on thermal aging resistance of SBR and NBR rubber compounds under different aging temperature. *Materials & Design*, 30(3), 791-795. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.065>
- Rajasekar, R., Pal, K., Heinrich, G., Das, A. & Das, C. K. (2009). Development of nitrile butadiene rubber–nanoclay composites with epoxidized natural rubber as compatibilizer. *Materials & Design*, 30 (9), 3839-3845. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.014>
- Rattanasom, N., & Prasertsri, S. (2009). Relationship among mechanical properties, heat ageing resistance, cut growth behaviour and morphology in natural rubber: Partial replacement of clay with various types of carbon black at similar hardness level. *Polymer Testing*, 28(3), 270-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.12.010>
- Semsarzadeh, M. A., Bakhshandeh, G. R., & Ghasemzadeh-Barvarz, M. (2005). Effect of carbon black on rate constant and activation energy of vulcanization in EPDM/BR and EPDM/NR blends. *Iranian Polymer Journal*, 14(6), 573-578.
- Toth, W. J., Chang J. P., & Zanichelli, C. (1991). Finite element evaluation of the state of cure in a tire. *Tire Science and Technology*, 19(4), 178-212. <http://dx.doi.org/10.2346/1.2141715>
- Yuan, X., Shen, F., Wu, G., & Wu, C. (2007). Effects of acrylonitrile content on the coordination crosslinking reaction between acrylonitrile–butadiene rubber and copper sulfate. *Materials Science and Engineering: A*, 459 (1-2), 82-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.036>
- Zaimova, D., Bayraktar, E., & Dishovsky, N. (2011). State of cure evaluation by different experimental methods in thick rubber parts. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 44(2), 161-167.