Karakteristik dan Kinetika Dekomposisi Termal Komposit CR/NR dengan Substitusi Bahan Pengisi

The Characteristics and Thermal Decomposition Kinetics of CR/NR Composite with the Filler Substitution

Hesty Eka Mayasari

Balai Riset dan Standardisasi Industri Surabaya
Kementerian Perindustrian
Surabaya, Indonesia
hesty.ekamayasari@yahoo.com

Agung Yanuar Wirapraja

Balai Riset dan Standardisasi Industri Surabaya
Kementerian Perindustrian
Surabaya, Indonesia
agungyanuar1945@gmail.com

Abstrak— Suhu dapat mempengaruhi karakteristik dan sifat suatu material. Penelitian ini mempelajari karakteristik dan kinetika dekomposisi termal dari komposit CR/NR dengan berbagai jenis bahan pengisi menggunakan metode termogravimetri. Carbon black (CB), kombinasi CB dan zeolite, kombinasi CB dan kaolin, serta kombinasi CB dan bentonit digunakan sebagai bahan pengisi. Komposit dibuat menggunakan *two-roll mill* dan dilakukan studi karakteristik dan kinetika dekomposisi termal dengan menggunakan alat termogravimetri analyser dengan kecepatan pemanasan 10°C/min . Dekomposisi termal pada komposit CR/NR terjadi secara tiga tahap, yaitu tahap penguapan zat mudah larut, tahap oksidasi, dan tahap dekomposisi CR/NR. Bentonit memberikan massa akhir dekomposisi tertinggi pada 600°C . Dari perhitungan dengan metode Coats-Redfern, diketahui bahwa CB membutuhkan energi aktivasi yang lebih tinggi dibandingkan kombinasi bahan pengisi kaolin dan bentonit. Bentonit dapat menjadi bahan pengisi yang sesuai untuk komposit CR/NR.

Kata Kunci— dekomposisi, termal, termogravimetri, CR/NR

Abstract— *Temperature can affect the characteristics and properties of a material. This research aims to study the characteristics and kinetics of thermal decomposition of CR/NR composites with various types of fillers using the thermogravimetric method. Carbon black (CB), a combination of CB and zeolite, a combination of CB and kaolin, a combination of CB and bentonite are used as fillers. Composites were made using a two-roll mill and will be studied the characteristics and kinetics of thermal decomposition using a thermogravimetric analyzer with a heating rate of 10°C/min . Thermal decomposition of CR/NR composites occurs in three stages, i.e. the evaporation stage of soluble substances, the oxidation stage, and the CR/NR decomposition stage. Bentonite provides the highest final decomposition mass at 600°C . From the calculations using the Coats-Redfern method, it is known that CB requires higher activation energy than a combination of kaolin and bentonite fillers. Bentonite can be a suitable filler for CR/NR composites with good thermal resistance.*

Keywords— *decomposition, thermal, thermogravimetry, CR/NR*

I. PENDAHULUAN

Penggunaan material dalam jangka waktu dan kondisi tertentu dapat mempengaruhi sifat material tersebut. Untuk memaksimalkan kegunaan suatu material, maka perlu diketahui kondisi penggunaan dan penyimpanannya. Suhu merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi umur pakai suatu material. Kenaikan suhu dapat menimbulkan oksidasi maupun pemutusan ikatan dari suatu material, sehingga menurunkan sifat fisis maupun mekanisnya^[1]. Oleh karena itu perlu dipelajari pengaruh suhu terhadap ketahanan material. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mempelajari karakteristik material terhadap suhu adalah metode termogravimetri^[2-3]. Metode termogravimetri menggunakan alat termogravimetri analyser yang akan menganalisa pengaruh suhu terhadap massa suatu material. Selain pengaruh dari luar (suhu), komposisi bahan menentukan kekuatan material tersebut.

Komposit merupakan material yang banyak dikembangkan saat ini karena memiliki sifat yang unggul dari beberapa campuran bahan. Dalam penelitian ini digunakan komposit karet kloroprena (*chloroprene*, CR) dan karet alam (*natural rubber*, NR) yang akan menghasilkan material dengan sifat unggul. Komposit karet CR/NR dapat digunakan diantaranya sebagai sil, gasket, selang. Pembuatan komposit membutuhkan bahan aditif untuk meningkatkan sifat fisis dan mekanisnya, diantaranya bahan pengisi, aktivator, bahan pemvulkanisasi, antioksidan. Salah satu bahan pengisi yang banyak dipelajari adalah *clay*, yang dapat mengimprovisasi sifat suatu material^[4]. Dalam penelitian ini akan digunakan berbagai jenis *clay* (zeolit, kaolin, bentonit) sebagai substitusi bahan pengisi dengan CB. Komposisi suatu material dapat mempengaruhi sifat produk akhir yang dihasilkan, oleh karena itu perlu dipelajari sifat bahan pengisi tersebut agar diketahui desain produk dan penggunaan yang tepat.

Saat ini telah banyak penelitian yang mempelajari karakteristik termogravimetri dari komposit, diantaranya pengaruh sistem pematangan terhadap sifat termal NR^[5], karakteristik termogravimetri campuran NR/IIR^[6], karakteristik termogravimetri campuran NR/EPDM^[7],

pengaruh CB terhadap termogravimetri fluoroelastomer [8], karakteristik termogravimetri SBR dengan bahan pengisi kaolin [9]. Namun penelitian karakteristik termogravimetri untuk campuran CR/NR dengan berbagai bahan pengisi masih sangat terbatas. Dalam penelitian ini akan dipelajari pengaruh bahan pengisi terhadap karakteristik dan kinetika degradasi termal CR/NR. Informasi karakteristik dan kinetika degradasi termal dapat digunakan untuk mengetahui kondisi penggunaan dan penyimpanan yang tepat sehingga dapat memperpanjang umur pakai dan umur simpan dan menentukan desain produk yang tepat.

II. BAHAN DAN METODE

Komposit CR/NR dibuat dengan menggunakan two-roll mill. Bahan yang digunakan antara lain karet kloroprena (Baypren 2020), karet alam (RSS 1, PTPN), asam stearat (Aflux), carbon black (CB N330) (Multicitra), zinc oksida (Indoxide), magnesium oksida (Multicitra), zeolite (local), kaolin (local), bentonit (local), paraffinic oil (Indrasari), paraffinic wax (Antilux 654A), mercapto benzothiazole (MBT) (Bayer), N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenyldiamine (6PPD) (Starchem), dan sulfur (Miwon). Bahan-bahan tersebut dicampur hingga homogen dengan formulasi yang ditunjukkan pada Tabel I seperti pada penelitian sebelumnya [10].

TABEL I. FORMULASI KOMPON CR/NR

Bahan	Komposit			
	GCC1	GCC2	GCC3	GCC4
CR	25	25	25	25
NR	75	75	75	75
Zinc Oksida	5	5	5	5
MgO	3	3	3	3
Asam stearat	3	3	3	3
CB N330	50	25	25	25
Zeolit	0	25	0	0
Kaolin	0	0	25	0
Bentonit	0	0	0	25
Paraffinic Oil	5	5	5	5
Paraffinic Wax	0.5	0.5	0.5	0.5
6 PPD Vulkanox	5	5	5	5
MBT	2	2	2	2
Sulfur	2	2	2	2

^a. bahan dalam satuan phr (part per hundred resin)

^b.

Komposit yang telah dicampur selanjutnya divulkanisasi dengan *hydraulic press* pada suhu 150 ° C dan dipelajari karakteristik dekomposisinya menggunakan alat termogravimetri analyser Shimadzu DTG 60. Analisa dekomposisi dilakukan menggunakan dengan metode termogravimetri dalam keadaan non-isothermal. Analisa termogravimetri dilakukan menggunakan nitrogen dengan kecepatan 15 ml/min pada suhu 30-600°C dengan sampel 9-13

mg dengan kecepatan pemanasan 15°C/menit. Data yang diperoleh dapat digunakan untuk mengetahui massa yang terdekomposisi dan kinetika dekomposisi komposit.

Kinetika reaksi dekomposisi komposit dapat dipelajari dengan menggunakan persamaan dasar Arrhenius (1) sebagai berikut:

$$\ln K = \ln A - E/RT \quad (1)$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan salah satu metode perhitungan analisa termogravimetri umum, yaitu metode Coats-Redfern [7,11-14] yang ditunjukkan pada persamaan (2).

$$\ln \left[-\frac{\ln(1-x)}{T^2} \right] = \ln \left(\frac{AR}{\beta E} \right) - \frac{E}{RT} \quad (2)$$

dimana K adalah konstanta laju reaksi, A adalah faktor frekuensi, E adalah energy aktivasi (kJ/mol), R adalah tetapan gas (J/(mol.K)), T adalah suhu (K).

Energi aktivasi dan faktor eksponensial dapat dihitung melalui plot garis pada persamaan (2). Slope garis dinyatakan sebagai $-\frac{E}{R}$ yang dinyatakan sebagai energi aktivasi, sedangkan intersep dinyatakan sebagai faktor pre-eksponensial. Dalam penelitian ini, reaksi diasumsikan sebagai reaksi orde pertama

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa termogravimetri dapat menunjukkan dekomposisi material yang digambarkan dengan penurunan massa berdasarkan waktu pemanasan. Analisa termogravimetri ini juga dapat menggambarkan titik leleh (*melting point*) suatu material. Dari data termogravimetri, dapat digambarkan grafik derivatif termogravimetri (DTG) yang merupakan hasil penurunan dari grafik termogravimetri untuk melihat penurunan massa yang terjadi ($\frac{dm}{dt}$). Grafik termogravimetri dan derivatif termogravimetri dapat ditunjukkan pada Gambar 1.

Dari Gambar 1 diketahui bahwa seluruh komposit CR/NR terdekomposisi dalam 3 tahap. Pada suhu rendah, terjadi penguapan zat-zat mudah menguap, seperti air (titik didih 100 ° C). Tahap awal ini dimulai pada suhu sekitar 59-154 ° C. Dengan kenaikan suhu, material akan mulai terdegradasi dan berubah menjadi gas yang ditandai dengan berkurangnya massa. Tahap kedua adalah tahap oksidasi CR/NR dan terlepasnya zat aditif seperti minyak proses, asam stearat, TMQ, MBT (titik didih masing-masing 302°C, 361°C, 320°C, 305°C). Tahap kedua terjadi pada suhu sekitar 249-379 ° C. Tahap ketiga adalah dekomposisi CR/NR yang terjadi pada suhu sekitar 372-487 ° C. Tahap dekomposisi merupakan tahap pemecahan ikatan oleh pengaruh suhu, sehingga massa material semakin berkurang. Perbedaan jenis bahan pengisi tidak berpengaruh signifikan terhadap suhu dekomposisi.

Pada akhir pengujian termogravimetri, yaitu pada suhu 600 ° C, komposit telah mengalami dekomposisi sempurna, yang tersisa adalah arang karbon dan oksida logam [14]. Massa akhir komposit CR/NR pada suhu 600 ° C berkisar antara 27-43%. Residu komposit hasil pemanasan yang tinggi menunjukkan

ketahanan termal yang baik. Perbedaan jumlah residu bergantung pada bahan pengisi yang digunakan [13]. Kombinasi CB dan zeolite memberikan massa terdekomposisi tertinggi, sedangkan kombinasi CB dan bentonit memberikan dekomposisi massa terendah. Kombinasi CB dan kaolinite memberikan dekomposisi massa lebih rendah dari CB sebagai bahan pengisi tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa bentonit dan kaolin memberikan ketahanan termal yang baik bagi komposit CR/NR.

Gambar 1. Grafik (a) termogravimetri dan (b) derivative termogravimetri komposit CR/NR

Grafik DTG menunjukkan besarnya penurunan massa yang digambarkan dengan luasan bidang. Penurunan massa terbesar terjadi pada tahap III dan paling sedikit pada tahap I. Suhu puncak (*peak*) menunjukkan suhu saat terjadi dekomposisi massa tertinggi. Dari Gambar 1 diketahui bahwa komposit CR/NR mulai terdekomposisi pada suhu 249 °C dan mulai terdekomposisi pada tahap selanjutnya pada 372 °C hingga 487 °C. Tahapan dekomposisi komposit CR/NR secara detail ditunjukkan pada Tabel II.

Untuk mempelajari kinetika reaksi dekomposisi komposit, dapat dilakukan dengan mengolah data termogravimetri (TG). Data TG diolah menggunakan persamaan (2) sehingga menghasilkan grafik plot dari persamaan Coats-Redfern yang ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan plot persamaan Coats-redfern pada dekomposisi tahap 2 dan tahap 3 (tahap dekomposisi dengan penurunan massa yang signifikan). Dekomposisi tahap 1 tidak menunjukkan

penurunan massa yang signifikan. Kinetika reaksi menggambarkan reaksi yang terjadi saat proses dekomposisi. Hal ini perlu dipelajari untuk mengetahui proses reaksi dekomposisi sehingga dapat menentukan desain optimal produk yang diinginkan, umur pakai, dan penggunaan yang tepat.

TABEL II. TAHAPAN DEKOMPOSISI CR/NR

Komposit		GCC 1	GCC 2	GCC 3	GCC 4
Tahap I	Suhu, °C	60 - 152	59 - 153	64 - 145	64 - 144
	Suhu puncak, °C	105	110	101	104
	Massa terdekomposisi, %	3.77	3.80	3.68	3.42
Tahap II	Suhu, °C	249 - 378	250 - 379	250 - 375	257 - 371
	Suhu puncak, °C	351	356	353	349
	Massa terdekomposisi, %	29.43	32.89	27.36	26.02
Tahap III	Suhu, °C	379 - 481	380 - 487	376 - 479	372 - 473
	Suhu puncak, °C	425	422	425	418
	Massa terdekomposisi, %	61.20	71.26	62.42	56.16
Massa terdekomposisi saat 600 °C, %		63.32	73.25	64.98	57.90

Dari Tabel II diketahui suhu dekomposisi tiap masing-masing tahap. Suhu dekomposisi tersebut dijadikan perhitungan untuk kemudian diplotkan ke dalam persamaan (2). Sumbu-x pada persamaan 2 adalah $1/T$ dimana T dalam satuan K. Sedangkan sumbu-y adalah $\ln\left[-\frac{\ln(1-x)}{T^2}\right]$ dimana x didefinisikan sebagaimana pada persamaan (3) berikut:

$$x = \frac{w_0 - w_t}{w_0 - w_f} \quad (3)$$

Dimana w_t adalah berat sampel pada saat t (mg), w_0 adalah berat sampel awal (mg), w_f adalah berat sampel akhir (mg). Setiap titik suhu diplotkan ke sumbu-x dan sumbu-y nya sehingga didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2 (a) dan (b) berasal dari grafik yang sama, namun untuk mempelajari kinetika dekomposisi tiap tahap, maka grafik ditampilkan terpisah untuk setiap tahap dekomposisi, (a) adalah tahap 2 dan (b) adalah tahap 3.

Nilai persamaan garis pada Gambar 2 ditunjukkan pada Tabel III. Slope dari persamaan yang didapat dari hasil plot digunakan untuk menghitung energi aktivasi, yaitu dengan mengalikannya dengan tetapan gas (slope dinyatakan sebagai $-\frac{E}{R}$). Sedangkan faktor pre-eksponensial dapat dihitung dari eksponensial intersep (intersep, $\ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right)$, dinyatakan sebagai faktor pre-eksponensial).

TABEL III. PERSAMAAN GARIS GRAFIK DEKOMPOSISI KOMPOSIT CR/NR

Dekomposisi	Komposit	Persamaan garis	Koef. korelasi (R^2)	Slope	Intersep
II	GCC 1	$y = -3314.9x - 9.2438$	0.8151	-3314.9	-9.2438
	GCC 2	$y = -3905x - 8.2453$	0.8195	-3905	-8.2453
	GCC 3	$y = -3068x - 9.6753$	0.7846	-3068	-9.6753
	GCC 4	$y = -2824x - 10.073$	0.7529	-2824	-10.073
III	GCC 1	$y = -3885.1x - 8.002$	0.9835	-3885.1	-8.002
	GCC 2	$y = -4471.9x - 6.9933$	0.9509	-4471.9	-6.9933
	GCC 3	$y = -4358.1x - 7.3259$	0.9698	-4358.1	-7.3259
	GCC 4	$y = -3876.8x - 8.0922$	0.9599	-3876.8	-8.0922

Dari hasil plot persamaan Coats Redfern pada Gambar 2, dapat dipelajari kinetika dekomposisi komposit, yaitu energi aktivasi dan faktor pre-eksponensial yang disajikan pada Tabel IV.

Nilai koefisien korelasi (R^2) yang mendekati 1 menunjukkan bahwa persamaan Coats-Redfern sesuai digunakan pada komposit CR/NR dalam penelitian ini. Energi aktivasi adalah energi yang dibutuhkan untuk mendekomposisi komposit, sehingga semakin tinggi energi aktivasi yang dibutuhkan, maka semakin besar ketahanan komposit terhadap suhu. Dari Tabel IV diketahui bahwa Tahap II membutuhkan energi aktivasi lebih rendah dari tahap III. Hal ini sesuai dengan banyaknya massa terdekomposisi. Semakin banyak massa komposit yang terdekomposisi maka membutuhkan energi aktivasi yang lebih tinggi. Kuatnya ikatan antar komposisi material juga mempengaruhi jumlah energi aktivasi yang dibutuhkan^[14]. Substitusi bahan pengisi dengan kaolin dan bentonit memberikan energi aktivasi yang lebih rendah dibandingkan penggunaan bahan pengisi tunggal (CB). CB memiliki sifat *reinforcing*, memperkuat sifat komposit, termasuk meningkatkan ketahanan termal^[12,16]. Namun, energi aktivasi ini bergantung pada bahan pengisi, kondisi operasi, metode perhitungan dan pemilihan persamaan.

(a)

(b)

Gambar 2. Grafik plot persamaan Coats-Redfern (a) dekomposisi tahap 2 (suhu sekitar 249 ° C hingga 379 ° C) dan (b) dekomposisi tahap 3 (suhu sekitar 372 ° C hingga 487 ° C)

TABEL IV. KINETIKA DEKOMPOSISI KOMPOSIT CR/NR

Komposit		GCC 1	GCC 2	GCC 3	GCC 4
Tahap II	Energi aktivasi(kJ/mol)	27.56	32.47	25.51	23.48
	Pre-eksponensial faktor (A), (min ⁻¹)	9.67×10^5	2.62×10^4	6.28×10^5	4.22×10^5
	R^2	0.82	0.82	0.78	0.75
Tahap III	Energi aktivasi (kJ/mol)	32.30	37.18	36.23	32.23

Pre-eksponensi al faktor (A), (min ⁻¹)	3.35 x10 ⁴	9.18 x10 ⁴	6.58x10 ⁴	3.06x10 ⁴
R ²	0.94	0.95	0.97	0.96

IV. KESIMPULAN

Proses dekomposisi termal komposit CR/NR dipelajari menggunakan metode termogravimetri. Proses dekomposisi termal oleh suhu terjadi dalam 3 tahap. Tahap awal adalah penguapan zat mudah larut (59-154° C), kemudian tahap oksidasi CR/NR dan terlepasnya zat aditif (249-379° C), dan tahap ketiga adalah dekomposisi CR/NR (372-487° C). Bentonit memberikan ketahanan termal yang baik ditinjau dari massa akhir dekomposisi tertinggi pada 600° C (massa terdekomposisi 57,90%). CB sebagai bahan pengisi, zeolit dan kaolin sebagai substitusi bahan pengisi terdekomposisi masing-masing sebanyak 63,32%; 73,25%; 64,98%. Dari perhitungan dengan metode Coats-Redfern, diketahui bahwa CB membutuhkan energi aktivasi yang lebih tinggi dibandingkan kombinasi bahan pengisi kaolin dan bentonit. Energi aktivasi ini bergantung pada kondisi proses dan persamaan yang dipilih. Bentonit dapat menjadi bahan pengisi yang sesuai untuk komposit CR/NR. Informasi ketahanan termal dapat digunakan untuk membuat desain produk dan penggunaan yang sesuai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penelitian ini dan kepada BBKKP yang telah memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Alneamah and M. Almaamori, "Study of Thermal Stability of Nitrile Rubber / Polyimide Compounds," *Int. J. Mater. Chem.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–3, 2015.
- [2] S. H. El-sabbagh, D. S. Mahmoud, N. M. Ahmed, and M. W. Sabaa, "Study on the cations- exchanged zeolite and its influence on mechanical , thermal , and morphological properties of rubber composites," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, pp. 1–27, 2018.
- [3] H. Peng, J. Vaughan, and J. Vogrin, "Applied Clay Science The effect of thermal activation of kaolinite on its dissolution and re- precipitation as zeolites in alkaline aluminate solution," *Appl. Clay Sci.*, vol. 157, pp. 189–197, 2018.
- [4] A. Vs, A. Augustine, J. Joseph, S. P. Thomas, and R. Stephen, "Effect of halloysite nanotubes and organically modified bentonite clay hybrid filler system on the properties of natural rubber," *J. Elastomers Plast.*, pp. 1–21, 2019.
- [5] Y. S. R. Yahya, A. R. Azura, and Z. Ahmad, "Effect of curing systems on thermal degradation behaviour of natural rubber (SMR CV 60)," *J. Phys. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 1–14, 2011.
- [6] M. Sholeh, I. N. Indrajati, and A. Yuniari, "Kinetic studies on thermal degradation of natural rubber / butyl rubber," *Maj. Kulit, Karet, dan Plast.*, vol. 34, no. 1, pp. 3–7, 2018.
- [7] H. E. Mayasari and A. Yuniari, "Kinetic analysis of thermal degradation of NR / EPDM blends with maleic anhydride as compatibilizer : The effect of the reactive accelerators," *Maj. Kulit, Karet, dan Plast.*, vol. 33, no. 2, pp. 79–84, 2017.
- [8] M. M. Salehi, T. Khalkhali, R. Soleyman, and M. Barari, "Effect of Carbon Black Type on the Thermal Properties of Fluoroelastomer," *Eur. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 27–30, 2016.
- [9] Y. Zhang, Q. Liu, S. Zhang, Y. Zhang, Y. Zhang, and P. Liang, "Applied Clay Science Characterization of kaolinite / styrene butadiene rubber composite : Mechanical properties and thermal stability," *Appl. Clay Sci.*, vol. 124–125, pp. 167–174, 2016.
- [10] H. E. Mayasari and Y. A. Wirapraja, "Pengaruh Jenis Bahan Pengisi Terhadap Karakteristik Pematangan Kompon Kloroprena/ Karet Alam," *J. Teknol. Proses dan Inov. Ind.*, vol. 4, no. 1, pp. 19–22, 2019.
- [11] G. Nalini, N. Jayachandramani, V. Thanikachalam, and J. Jayabharath, "Kinetics of Thermal Decomposition of a Spirooxindole Compound under Non-Isothermal Condition," *Can. Chem. Trans.*, vol. 4, no. 1, pp. 62–76, 2016.
- [12] B. Janković, M. Marinović-Cincović, V. Jovanović, S. Samaržija-Jovanović, and G. Marković, "The comparative kinetic analysis of non-isothermal degradation process of acrylonitrile-butadiene and ethylene-propylene-diene rubber compounds. Part I," *Thermochim. Acta*, vol. 543, no. August, pp. 295–303, 2012.
- [13] N. Hayeemasae and H. Ismail, "Enhancing the Thermal Stability of Natural Rubber / Recycled Ethylene Propylene Diene Rubber Blends Through the Use of Bio-Compatibilizers," *J. Vinyl Addit. Technol.*, vol. 11, pp. 1–11, 2018.
- [14] R. G. Chaudary, P. Ali, and N. V. Gandhare, "Thermal decomposition kinetics of some transition metal coordination polymers of fumaroyl bis (paramethoxyphenylcarbamide) using DTG / DTA techniques," *Arab. J. Chem.*, 2016.
- [15] N. Hayeemasae, H. Ismail, S. Matchawet, and A. Masa, "Kinetic of Thermal Degradation and Thermal Stability of Natural Rubber Filled With Titanium Dioxide Nanoparticles," *Polym. Compos.*, vol. 40, no. 8, pp. 3149–3155, 2018.
- [16] H. Yang *et al.*, "Effect of carbon black on improving thermal stability, flame retardancy and electrical conductivity of polypropylene/carbon fiber composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 113, pp. 31–37, 2015.