

FABRIKASI SERAT POLIESTER TERMODIFIKASI SENYAWA TURUNAN FOSFINAT MENGGUNAKAN METODE EKSTRUSI

FABRICATION OF POLYESTER FIBERS MODIFIED PHOSPHINATE DERIVATIVE COMPOUNDS USING EXTRUSION METHOD

Rina Dewi Mayasari, Muhammad Dikdik Gumelar, Saeful Rohman, Seto Roseno, Lukmana

Pusat Teknologi Material, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Gedung 224, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan 15314
E-mail: rina.dewi@bppt.go.id

Tanggal diterima: 3 Maret 2020, direvisi: 30 September 2020, disetujui terbit: 1 Oktober 2020

ABSTRAK

Serat tekstil dengan bahan baku poliester merupakan komoditas produksi serat terbesar di antara serat sintetik lainnya. Penelitian ini telah berhasil membuat serat poliester dengan pencampuran bahan baku *polyethylene terephthalate* (PET) dan produk komersial senyawa turunan fosfinat dengan variasi konsentrasi 0%; 0,25%; 0,50%; dan 1,00%. Serat poliester termodifikasi dikarakterisasi menggunakan alat *Fourier transform infrared* (FTIR), *thermogravimetric analysis* (TGA), dan *universal testing machine* (UTM) 2 kN. Spektrum IR mengonfirmasi bahwa gugus fungsi dari PET dan senyawa kimia (fosfinat, seng oksida, dan magnesium fosfat) terbentuk pada sampel serat. Analisis sifat termal mengindikasikan bahwa penambahan senyawa kimia dengan konsentrasi 1,00% telah meningkatkan sifat termal serat poliester dengan suhu degradasi pada rentang 260-300°C dan titik leleh pada suhu 390°C. Sementara itu, hasil uji tarik menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi zat aditif meningkatkan sifat rapuh serat PET.

Kata kunci: serat tekstil, poliester, PET, senyawa turunan fosfinat, sifat termal, ekstrusi

ABSTRACT

Textile fibers made from polyester as raw material are the largest commodity of fiber production among other synthetic fibers. This research has been successfully fabricated polyester fibers by mixing polyethylene terephthalate (PET) and commercial product of phosphinate derivative compounds in variant concentration (0%, 0.25%, 0.50%, and 1.00%). The modified polyester fibers were characterized by Fourier transform infrared (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), and universal testing machine (UTM) 2 kN. IR spectrum confirms the functional group of PET and chemical compounds (phosphinate, zinc oxide, and magnesium phosphate) in the fiber sample. Thermal analysis indicates that the addition of 1.00% chemical compound increased the thermal characteristics of polyester fiber, i.e. the degradation temperature in the range of 260-300°C and the melting point of 390°C. In addition, tensile test showed that higher additive compounds concentration increased the brittle properties of PET fibers.

Keywords: textile fibers, PET, polyester, phosphinate, thermal characteristics extrusion

PENDAHULUAN

Industri tekstil saat ini merupakan salah satu sektor andalan untuk mengimplementasikan tahap awal *Making Indonesia 4.0* karena dinilai berkontribusi terhadap PDB nasional, nilai ekspor, dan penyerapan tenaga kerja hingga 60%. Data Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat bahwa industri tekstil dan pakaian jadi merupakan sektor manufaktur yang tumbuh paling tinggi mencapai 20,71% pada kuartal II tahun 2019.¹ Selain itu, pada bulan Oktober 2019 industri tekstil dan pakaian jadi telah berhasil menjadi kontributor ekspor manufaktur sebesar USD10,84 miliar.² Perkembangan industri tekstil tersebut disambut

baik oleh pemerintah dengan menargetkan Indonesia sebagai produsen tekstil fungsional atau tekstil pintar (*smart textiles*) pada tahun 2030 mendatang.³

Pengembangan pakaian fungsional menjadi topik riset yang menarik dan diminati oleh peneliti dan pelaku industri. Tekstil fungsional merupakan tekstil yang digunakan lebih dari sekadar pakaian konvensional tetapi juga memiliki fungsi lain seperti anti-UV⁴, anti-mikroba⁵, anti-air (hidrofobik)⁶, dan tahan api (*flame retardant*)⁷. Dari berbagai jenis tekstil fungsional yang sangat tinggi permintaannya saat ini adalah tekstil tahan api. Karakteristik tahan api diperlukan dalam berbagai

kebutuhan dan aplikasi diantaranya militer, penanganan bencana alam, industri pertambangan, industri kimia dan pengecoran, serta tekstil non-sandang pada interior bangunan dan transportasi.⁸

Tekstil tahan api didesain untuk mengurangi kemudahan terbakar, durasi dan laju perambatan nyala api, serta pelepasan panas.^{9,10} Tekstil dapat dibuat tahan api dengan dengan berbagai metode, yaitu penggantian komponen serat yang mudah terbakar dengan serat yang memiliki retardansi api, teknik *coating* pada serat organik dan polimer konvensional, serta rekayasa serat sintesis dengan penambahan zat *flame-retardant* (FR) itu sendiri. Misalnya, kain katun dan wol konvensional dapat dibuat tahan api dengan menggunakan teknik pelapisan zat kimia tahan api konvensional dan teknik penyempurnaan zat kimia tahan api dengan plasma lucutan korona.¹¹

Teknik pelapisan kimia konvensional masih populer digunakan di kalangan penelitian dan produk skala industri karena metodenya sederhana dan murah, seperti penggunaan garam tahan api (contoh: *ammonium polyphosphates*), pelapis tahan api (contoh: antimon 111 oksida-sistem halogen-resin organik), dan pelapis fungsional atau *finishing* (misalnya monomer yang mengandung organofosfor dan nitrogen, atau polikonden).⁹ Akan tetapi, penggunaan jumlah aditif tahan api pada saat proses produksi serat konvensional polipropilena biasanya hanya dibatasi sampai 5%wt atau 6%wt karena jika melebihi 10%wt akan merusak sifat-sifat yang lain, seperti sifat mekanik dan durabilitasnya.¹⁰

Serat *polyethylene terephthalate* (PET) merupakan salah satu serat tekstil teknis yang telah sukses dikembangkan dengan penambahan zat aditif FR hingga skala semi-komersial sejak tahun 1960.¹² Pencampuran *co-monomer* tahan api dalam sistem reaksi pelelehan PET dapat menghasilkan *ethylene terephthalate co-polymers* yang dapat dibentuk menjadi serat.¹³ Serat FR PET menunjukkan sifat retardansi dan durabilitas yang cukup baik.¹⁴ Pada riset ini telah berhasil dikembangkan serat poliester *polyethylene terephthalate* (PET) dengan penambahan senyawa turunan fosfinat untuk meningkatkan sifat termal serat sintetik. Hasil fabrikasi serat dianalisa pengaruh zat aditif pada sifat termal dan mekaniknya terhadap serat PET konvensional.

METODE

Bahan

Bahan baku pembuatan serat tekstil adalah resin *polyethylene terephthalate* (PET) berbentuk pelet. Sementara itu, zat aditif berupa senyawa turunan fosfinat menggunakan produk komersial dari PT. Indonesia Nikka Chemical Soerti. Kedua bahan baku utama tersebut siap pakai dan tidak dilakukan purifikasi lebih lanjut.

Fabrikasi Serat Tekstil Termodifikasi

Pembuatan serat tekstil poliester termodifikasi dilakukan dengan alat ekstruder dengan 4 zona operasi. Pertama, bahan baku PET murni dimasukkan ke dalam zona 1 dan zona 2 yang merupakan daerah *feeder* dan suhunya diatur 180°C – 210°C. Setelah proses selesai, bahan baku diolah ke zona 3 yang merupakan area operasi pada suhu 240°C. Tahap terakhir adalah pembentukan serat di zona 4 yang merupakan zona *mould* pada suhu 260°C. Setelah serat tekstil PET murni (referensi) keluar dari *mould* kemudian dilakukan pemintalan (*spinning*) dan penarikan untuk memperoleh serat yang lebih kecil dari pada luaran *spineret* (cetakan serat). Proses fabrikasi serat tersebut diulang untuk bahan baku PET yang telah ditambahkan senyawa turunan fosfinat dengan berbagai variasi komposisi, yaitu 0,25%; 0,50%; dan 1,00%.

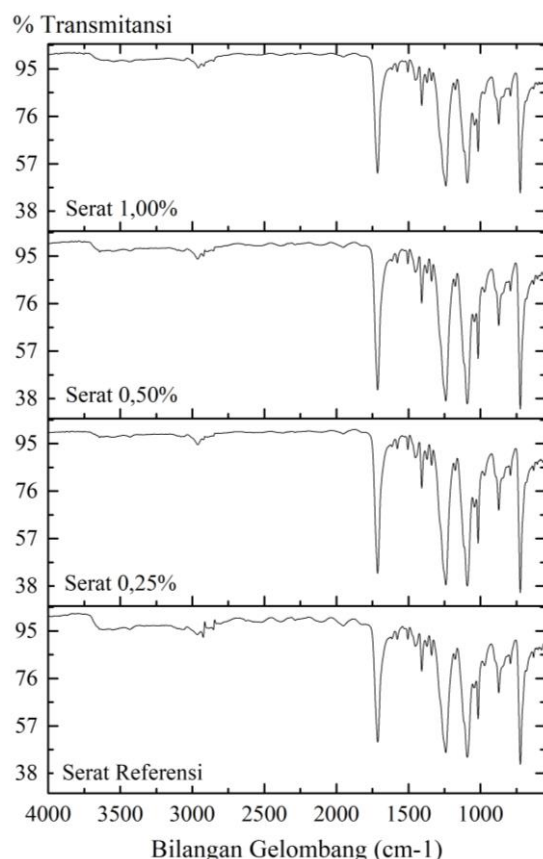
Karakterisasi Serat Tekstil Termodifikasi

Keempat serat tekstil (referensi, serat 0,25%; serat 0,50%; dan serat 1,00%) dikarakterisasi untuk menganalisis pengaruh bahan aditif pada serat PET. Analisis gugus fungsi bahan baku serat dan zat aditif dilakukan dengan alat *Fourier transform infrared* (FTIR) Thermo Scientific Nicolet iS50. Sedangkan sifat termal dan kekuatan tarik serat dianalisis dengan alat *thermogravimetric analysis* (TGA) Setaram LabSys Evo S60/58998 dan *universal testing machine* (UTM) 2 kN Gotech AI-7000 S, secara berturut-turut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gugus Fungsi Serat Tekstil Termodifikasi

Gambar 1 memperlihatkan spektrum FTIR pada keempat sampel serat tekstil, yaitu serat referensi) dan serat termodifikasi (serat 0,25%; serat 0,50%; dan serat 1,00%). Data FTIR menunjukkan bahwa puncak-puncak yang terdeteksi pada keempat sampel tidak memiliki perbedaan yang cukup signifikan antara serat referensi dan serat termodifikasi. Ketiga spektrum serat termodifikasi mengalami pergeseran puncak yang dapat diabaikan terhadap spektrum serat referensi. Hal ini menunjukkan bahwa bahan aditif Nikka telah terlarut secara baik dengan bahan utama serat *polyethylene terephthalate* (PET). Selain itu, spektrum IR serat termodifikasi tidak memiliki puncak-puncak lain terhadap serat referensi yang mengindikasikan bahwa tidak ada pengotor (impuritas).



Gambar 1. Spektrum IR pada sampel serat referensi dan serat termomodifikasi.

Tabel 1 merepresentasi data puncak-puncak spektrum infrared (IR) pada keempat sampel disertai dengan analisis ikatan kimia yang terbentuk pada serat tekstil. Gugus-gugus fungsi kimia yang terdeteksi dianalisis terhadap spektrum referensi kedua bahan baku, yaitu *polyethylene terephthalate* ($C_{10}H_8O_4$)_n, *phosphinate* ($R_2P(=O)O^-M^+$)- dan atau *diphosphinate* ($R_3P_2(=O)_2O^{2-}M_x^+$)-based *flame retardant*, dimana R merupakan C_1 - C_6 -alkil atau yang setara; M adalah ion kalsium, magnesium, aluminium, dan atau seng; n adalah bilangan 1 atau 3; dan x adalah bilangan 1 atau 2.¹⁶ Hasilnya menunjukkan bilangan gelombang dari puncak yang terdeteksi merupakan milik PET dan zat aditif.

Zat aditif 0,25% terdeteksi pada bilangan gelombang 1240,52 cm^{-1} dan 1407,98 cm^{-1} , serat 0,50% terdapat pada 1240,82 cm^{-1} dan 1408,08 cm^{-1} , dan serat 1,00% terlihat pada 1240,33 cm^{-1} dan 1408,09 cm^{-1} . Pada penelitian lain, Hoffman *et.al.* telah menemukan keberadaan ikatan absorpsi $P=O$ pada interval bilangan gelombang spektrum IR 1200 hingga 1500 cm^{-1} .¹⁵ Jika dibandingkan dengan referensi bilangan gelombang hanya bergeser sedikit tetapi nilai % transmittansi berubah dimana pada bilangan gelombang ~ 1240 cm^{-1} turun pada 38% untuk serat 0,25% dan 37% untuk serat 0,50% tetapi naik pada 48% untuk serat 1,00% terhadap serat referensi pada 46%. Hal yang sama juga terjadi pada puncak-puncak IR yang lain.

Tabel 1. Representasi serapan IR pada serat referensi dan serat termomodifikasi.

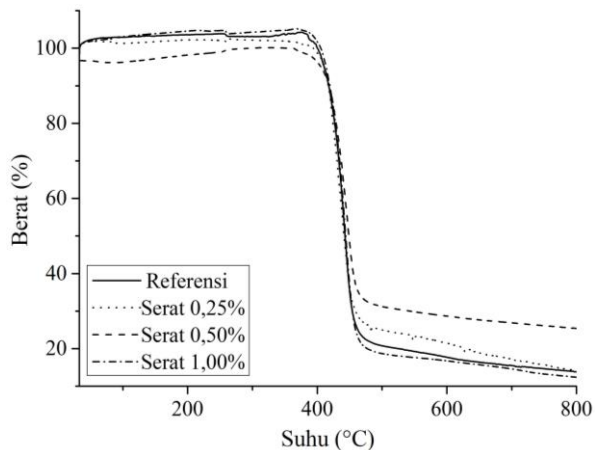
Sampel	Panjang Gelombang (cm^{-1})	Serapan	Representasi Gugus Fungsi
Referensi	723,31	C – H	PET ($C_{10}H_8O_4$) _n
	872,93	C – H	
	1016,59	C – H	
	1092,02	C – O	
	1241,09	C – O	
	1408,08	O – H	
	1713,80	C = O	
	2964,05	O – H	
Serat 0,25%	723,53	C – H	PET dan Aditif ($C_{10}H_8O_4$) _n / $R_2P(=O)O^-M^+$ / $R_3P_2(=O)_2O^{2-}M_x^+$
	873,07	C – H	
	1016,55	C – H	
	1092,18	C – O	
	1240,52	C – O	
		P = O	
	1407,98	O – H	
	1714,29	C = O	
Serat 0,50%	2961,94	O – H	PET dan Aditif ($C_{10}H_8O_4$) _n / $R_2P(=O)O^-M^+$ / $R_3P_2(=O)_2O^{2-}M_x^+$
	723,50	C – H	
	873,08	C – H	
	1016,61	C – H	
	1092,28	C – O	
	1240,82	C – O	
		P = O	
	1408,08	O – H	
Serat 1,00%	1714,14	C = O	PET dan Aditif ($C_{10}H_8O_4$) _n / $R_2P(=O)O^-M^+$ / $R_3P_2(=O)_2O^{2-}M_x^+$
	2962,93	O – H	
	723,81	C – H	
	873,10	C – H	
	1016,50	C – H	
	1091,61	C – O	
	1240,33	C – O	
		P = O	
	1408,09	O – H	
	1714,72	C = O	
	2957,53	O – H	

Suatu puncak IR antara polimer dengan aditif dapat memiliki profil yang sama secara semi kuantitatif, hal tersebut perlu didukung persyaratan sampel FTIR yang ketat seperti massa dan ketebalan sampel. Jika puncak itu milik polimer dan aditifnya, maka puncak yang terbentuk akan menjadi lebih tinggi atau lebar pada kondisi sampel dan alat yang sama.

Sifat Termal Serat Tekstil Termomodifikasi

Gambar 2 memperlihatkan kurva TGA dari serat referensi dan ketiga serat termomodifikasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa keempat sampel relatif tidak mengalami degradasi massa dan cenderung stabil pada rentang suhu 30-360°C. Dari kurva tersebut juga dapat dilihat bahwa degradasi sampel mulai terjadi di rentang suhu 370-408°C, secara rinci terlihat pada Tabel 2. Suhu degradasi (T_d)

referensi berada pada 403,03°C dan turun pada sampel serat 0,25% dan serat 0,50%. Hasil yang sama diperoleh Jeenchan *et.al.* dimana semakin tinggi konsentrasi maka suhu degradasinya semakin rendah tetapi menghasilkan sisa pembakaran yang semakin besar.¹⁷ Hal tersebut mengindikasikan ketidakcocokan antara bahan sintetik polimer serat dengan zat aditif yang digunakan sehingga menyebabkan serat lebih mudah terbakar.¹⁷



Gambar 2. Kurva TGA: serat referensi dan serat termodifikasi

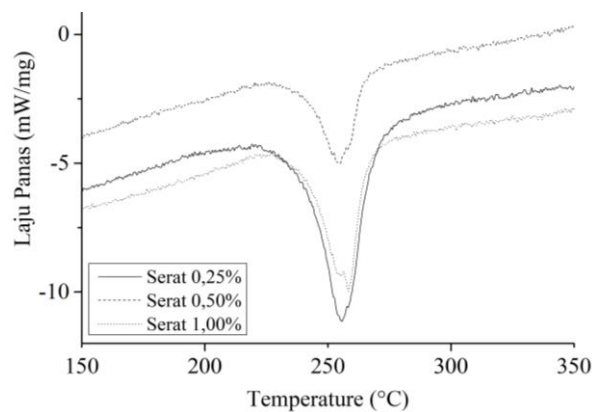
Tabel 2. Data TGA serat referensi dan serat termodifikasi

Sampel Serat	T _d (°C)	Sisa karbon di 500°C (wt%)	Sisa karbon di 800°C (wt%)
Referensi	403,03	20,77	13,86
Serat 0,25%	398,67	24,99	14,16
Serat 0,50%	374,33	31,22	25,39
Serat 1,00%	407,72	18,68	12,45

Akan tetapi, sampel serat 1,00% memiliki suhu degradasi awal yang lebih tinggi daripada serat referensi, yaitu 407,72°C. Hasil tersebut juga dikonfirmasi dengan titik leleh (*melting point*) sampel yang diambil dari data *differential scanning calorimetry* (DSC), seperti terlihat pada Gambar 3. Nilai laju panas terendah yang teramati pada kurva DSC diidentifikasi sebagai titik leleh (lihat Tabel 3).

Data tersebut menunjukkan bahwa titik leleh tertinggi sampel termodifikasi diperoleh serat 1,00% pada suhu 258,25°C. Sedangkan serat 0,50% memiliki karakteristik titik leleh terendah pada suhu 254,98°C. Penurunan nilai titik leleh terhadap kenaikan konsentrasi zat aditif juga diperoleh Mohsin *et.al.* (2017).¹⁸ Penurunan suhu leleh tersebut menandakan bahwa susunan molekul yang sistematis pada PET berkurang akibat berikatannya zat aditif ke dalam matriks polimer.¹⁸ Pada serat 1,00% titik lelehnya naik di atas referensi sebesar 258,25°C. Dari hasil analisis data TGA dan DSC

dapat disimpulkan bahwa serat 1,00% telah berhasil meningkatkan sifat termal dari serat referensi PET.



Gambar 3. Kurva DSC sampel serat termodifikasi

Tabel 3. Data DSC serat referensi dan serat termodifikasi

Sampel	Titik leleh (°C)
Serat 0,25%	255,76
Serat 0,50%	254,98
Serat 1,00%	258,25

Kekuatan Tarik Serat Tekstil Termodifikasi

Pengujian kekuatan tarik pada sampel serat referensi dan termodifikasi masing-masing menggunakan 10 spesimen dengan panjang serat 254 mm. Tabel 4 memperlihatkan data hasil pengukuran serat dan pengujian tarik serat referensi dan termodifikasi berdasarkan ASTM D3822-07. Pengukuran diameter serat referensi dan serat 0,25% menunjukkan keseragaman ukuran sementara serat 0,25% dan serat 1,00% memiliki diameter beragam. Perbedaan diameter yang cukup signifikan pada sampel 0,25% dan 1,00% berpengaruh pada nilai kekuatan tariknya, seperti terlihat pada Tabel 4.

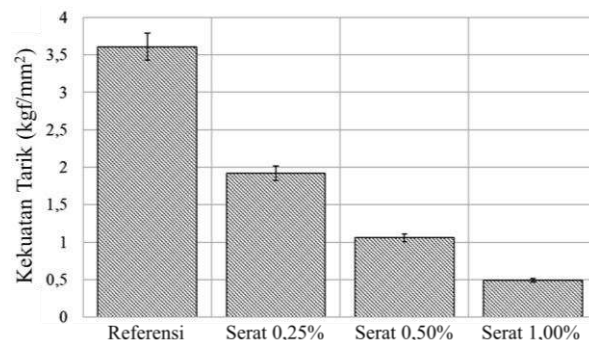
Penurunan nilai kekuatan tarik pada hasil uji tersebut dapat disebabkan oleh adanya peningkatan kerapuhan serat akibat semakin tingginya konsentrasi senyawa aditif, secara lebih jelas terlihat pada histogram Gambar 5. Serat referensi memiliki nilai kekuatan tarik rata-rata tertinggi sebesar 3,609 kgf/mm² sedangkan kekuatan tarik serat termodifikasi semakin turun sebesar 1,918 kgf/mm²; 1,058 kgf/mm²; 0,494 kgf/mm² untuk konsentrasi 0,25%; 0,50%; dan 1,00%, secara berturut-turut.

Sifat rapuh serat PET akibat penambahan zat aditif juga diperoleh beberapa penelitian sebelumnya.^{17,19-20} Hal tersebut dimungkinkan karena zat pengikat (*crosslinked agent*) pada bahan aditif mengandung komposisi kimia tertentu (seperti: resin melamin) yang membuat serat menjadi kaku.²⁰⁻²¹ Selain itu, senyawa aditif secara

prinsip juga berlaku sebagai impuritas sehingga mengubah struktur matrik polimer itu sendiri.²¹

Tabel 4. Data kekuatan tarik serat referensi dan serat termodifikasi.

Sampel	Diameter Serat (mm)	Beban Maksimal (kgf)	Kekuatan Tarik (kgf/mm ²)
Referensi	0,15	0,050	3,333
	0,21	0,070	3,333
	0,23	0,077	3,349
	0,23	0,081	3,522
	0,20	0,079	3,950
	0,21	0,080	3,809
	0,19	0,069	3,632
	0,23	0,077	3,348
	0,20	0,081	4,050
	0,21	0,079	3,762
	<i>Kekuatan tarik rata-rata (Referensi)</i>		<i>3,609</i>
Serat 0,25%	0,15	0,030	2,000
	0,21	0,025	1,190
	0,23	0,037	1,609
	0,23	0,045	1,956
	0,19	0,045	2,368
	0,21	0,035	1,667
	0,17	0,040	2,353
	0,22	0,041	1,864
	0,19	0,045	2,368
	0,21	0,038	1,809
	<i>Kekuatan tarik rata-rata (Serat 0,25%)</i>		<i>1,918</i>
Serat 0,5%	0,71	0,06	0,845
	0,33	0,033	1,000
	0,94	0,073	0,776
	0,23	0,021	0,913
	0,21	0,022	1,048
	0,15	0,020	1,333
	0,18	0,023	1,278
	0,21	0,023	1,095
	0,19	0,021	1,105
	0,16	0,019	1,187
	<i>Kekuatan tarik rata-rata (Serat 0,50%)</i>		<i>1,058</i>
Serat 1,0%	0,36	0,029	0,806
	0,89	0,028	0,315
	0,68	0,025	0,368
	0,58	0,031	0,534
	0,36	0,045	1,250
	0,40	0,024	0,600
	0,50	0,021	0,420
	0,90	0,014	0,156
	1,00	0,025	0,250
	1,30	0,031	0,238
	<i>Kekuatan tarik rata-rata (Serat 1,00%)</i>		<i>0,494</i>



Gambar 5. Histogram nilai kekuatan tarik serat referensi dan serat termodifikasi

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dilakukan ekstrusi bahan baku PET pada suhu 260°C dengan penambahan senyawa turunan fosfinat dengan berbagai konsentrasi untuk meningkatkan karakteristik termal serat poliester. Hasil FTIR menunjukkan bahwa kedua bahan baku tersebut dapat tercampur dengan baik dan tidak memiliki impuritas sehingga tidak terlihat adanya pergeseran kurva dan kemunculan puncak baru. Penambahan senyawa aditif mampu meningkatkan sifat termal serat poliester. Serat 1,00% memiliki suhu degradasi dan suhu titik leleh tertinggi sebesar 407,72°C dan 258,25°C, secara berturut-turut. Akan tetapi, penambahan konsentrasi senyawa aditif menyebabkan serat poliester menjadi semakin rapuh.

PUSTAKA

1. Badan Pusat Statistik, Indikator Ekonomi, *Buletin Statistik*, **9201001**, 2019.
2. Kementerian Perindustrian, Mengurai Tantangan 2020, *Media Industri*, Edisi **03** (2019).
3. Eskani, I.N., Haerudin, A., Setiawan, J., Lestari, D.W., Isnaini, dan Astuti, W., Batik Fungsional Sebagai Salah Satu Strategi Pengembangan Batik Dalam Memasuki Era Industri 4.0, *Prosiding Seminar Nasional Industri Kerajinan dan Batik 2019*, **B4**, 1-10 (2019).
4. Sugiyana, D., Septiani, W., Mulyawan, A.S., dan Wahyudi, T., Sintesis Nanopartikel ZnO dan Immobilisasinya Pada Kain Kapas Sebagai Absorber Ultraviolet, *Arena Tekstil* **32(2)**, 59-66 (2017).
5. Štular, D., Jerman, I., Naglič, I., Simončič, B., and Tomšič, B., Embedment of Silver Into Temperature- and pH-Responsive Microgel for the Development of Smart Textiles with Simultaneous Moisture Management and Controlled Antimicrobial Activities, *Carbohydrate Polymers* **159**, 161-170 (2017).

6. Ehrmann, A. and Blachowicz, T., *Examination of Textiles with Mathematical and Physical Methods: Chapter 9. Hydrophobic and Hydrophilic Textiles*, Springer International Publishing (2016).
7. Zhang, X. and Shi, M., Flame retardant vinylon/poly(m-phenylene isophthalamide) blended fibers with synergistic flame retardancy for advanced fireproof textiles, *Journal of Hazardous Materials* **365**, 9-15 (2018).
8. Kasipah, C., Yulina, R., Septiani, W. Gustiani, Rr.S., Sukardan, M.D., Aplikasi Kitosan-Fosfat Untuk Meningkatkan Sifat Tahan Api Kain Kapas, *Arena Tekstil* **34(2)**, 49-56 (2019).
9. Horrocks, A.R., Developments in Flame Retardants for Heat and Fire Resistant Textiles-the Role of Char Formation and Intumescence, *Polymer Degradation and Stability* **54**, 143-154 (1996).
10. Rault, F., Giraud, S., Salaün, F., and Almeras, X., Development of a Halogen Free Flame Retardant Masterbatch for Polypropylene Fibers, *Polymers* **7**, 220-234 (2015).
11. Widodo, M., Nuhayah, S., Umam, K., Muhlisin, Z., dan Nur, M., Penyempurnaan Tahan Api dan Antibakteri Pada Kain Kapas Dengan N-Metilol Dimetilfosfonopropionamida (Pyrovatex CP New) dan Kitosan Menggunakan Plasma Lucutan Korona, *Arena Tekstil* **34(2)**, 65-74 (2019).
12. Horrocks, A.R., *Handbook of Technical Textiles: Chapter 8. Technical Fibres for Heat and Flame Protection*, Woodhead Publishing Series in Textiles, No. **170** (2016).
13. Lawton, E.L. and Setzer, C.J., *Flame-Retardant Polymeric Materials: Flame-Retardant Polyethylene Terephthalate Fibers*, Springer (1975).
14. Pan, Y., Liu, L., Song, L., Hu, Y., Wang, W., and Zhao, H., Durable Flame Retardant Treatment of Polyethylene Terephthalate (PET) Fabric with Cross-linked Layer-by-Layer Assembled Coating, *Polymer Degradation and Stability* **165**, 145-152 (2019).
15. Hoffman, G., Veszprémi, T., and Nagy, A., Properties of IR spectra of phosphorus doped SiO₂ films, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* **23**, 175-184 (1979).
16. Narihisa, T., Keiichiro, S., Toru, M., and Koji, M., Flame retardant treating agents, flame retardant treating process and flame retardant treated articles, *European Patent*, No. **EP 1 369 464 B1**, 1-26 (2002).
17. Jeencham, R., Suppakarn, N., and Jarukumjorn, K., *Effect of Flame Retardants on Flame Retardant, Mechanical, and Thermal Properties of Sisal Fiber/Polypropylene Composites*, *Composites Part B* **56**, 249-253 (2014).
18. Mohsin, M.A., Abdulrehman, T., and Haik, Y., *Reactive Extrusion of Polyethylene Terephthalate Waste and Investigation of Its Thermal and Mechanical Properties After Treatment*, *International Journal of Chemical Engineering* **2017**, 1-10 (2017).
19. Tang, K.M., Kan, C.W., Fan, J.T., Sarkar, M.K., and Tso, S.L., *Flammibility, Comfort and Mechanical Properties of a Novel Fabric Structure: Plant-Structured Fabric*, *Cellulose* **24**, 3017-4031 (2017).
20. Kim, N.K., Lin, R.J.T., and Bhattacharyya, D., *Extruded Short Wool Fibre Composites: Mechanical and Fire Retardant Properties*, *Composites Part B* **67**, 472-480 (2014).
21. Khalili, P., Blinzler, B., Kádár, R., Bisschop, R., Försth, M., and Blomqvist, P., *Flammibility, Smoke, Mechanical Behaviours and Morphology of Flame Retarded Natural Fibre/Elum® Composite*, *Materials* **12(17)**, 2648 (2019).