

SIFAT ELEKTRIK DAN TERMAL NANOKOMPOSIT *POLY(VINYL CHLORIDE) (PVC)/LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE)*

ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF POLY(VINYL CHLORIDE) (PVC)/LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE) NANOCOMPOSITE

Arum Yuniari

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

Telp.: +62 274 512929, 563939; Fax.: +62 274 563655

E-mail: arumyuniari@yahoo.com

Diterima: 25 Agustus 2014 Direvisi: 6 November 2014 Disetujui: 7 November 2014

ABSTRACT

One of the problems encountered in the processing of poly(vinyl chloride) (PVC) was the thermal stability. The purpose of this study was to determine the effect of LDPE and flame retardant on electrical and thermal properties of nanocomposite. Nanocomposites were made by using laboplastomill at a temperature of 215°C and a rotor speed of 50 rpm added with LDPE (15, 20, 25, and 30 phr) and flame retardant (30 and 35 phr). The thermal properties of nanocomposite were evaluated by TGA/DTA and DSC, electrical properties were evaluated with the volume resistivity. The results of the thermal properties (TGA/DTA) showed that nanocomposite decomposition occurred at temperature of 280-400°C. DSC test results showed that the crystallization temperature (T_c), the melting temperature (T_m), and the glass temperature (T_g) occurred at 250°C, 260°C, and 60°C respectively. Nanocomposite IR spectrum at a wavelength of 1579 cm^{-1} showed the formation of polyene group ($\text{C}=\text{C}$). The results of the electrical property of the nanocomposite met the quality requirements of SNI 04-6504-2001: Self-ballasted lamps for general lightning service - safety requirements $\geq 4 \text{ M}\Omega$.

Keywords: nanocomposite, PVC, LDPE, thermal, electrical.

ABSTRAK

Salah satu permasalahan yang dihadapi pada proses pengolahan poli(vinil klorida) (PVC) adalah stabilitas termal. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh LDPE dan *flame retardant* terhadap sifat elektrik dan termal nanokomposit. Nanokomposit dibuat menggunakan laboplastomil pada suhu 215 °C dan kecepatan rotor 50 rpm ditambah dengan (15, 20, 25 dan 30 phr) LDPE dan (30 dan 35 phr) *flame retardant*. Sifat termal nanokomposit dievaluasi dengan TGA/DTA dan DSC, sifat elektrik dievaluasi dengan volume resistivitas. Hasil uji sifat termal (TGA/DTA) menunjukkan dekomposisi nanokomposit terjadi pada suhu 280 - 400 °C. Hasil uji DSC menunjukkan bahwa temperatur kristalisasi (T_c) pada 250 °C, suhu leleh (T_m) pada 260 °C dan suhu gelas (T_g) pada 60 °C. Spektrum IR nanokomposit pada panjang gelombang 1579 cm^{-1} menunjukkan terbentuknya gugus poliena ($\text{C}=\text{C}$). Hasil uji sifat elektrik nanokomposit memenuhi persyaratan mutu SNI 04-6504-2001: Lampu swa-ballast untuk pelayanan pencahayaan umum-persyaratan keselamatan $\geq 4 \text{ M}\Omega$.

Kata kunci: nanokomposit, PVC, LDPE, termal, elektrik.

PENDAHULUAN

Penggunaan PVC di industri sangat diminati terlepas dari permasalahan lingkungan, contoh untuk bahan pembuatan pipa, kemasan, elektronika, dan bahan konstruksi bangunan. PVC merupakan polimer dengan sifat dasar yang menguntungkan, contoh tidak mudah terbakar, murah, dan fleksibel. Salah satu permasalahan

yang penting dalam pengolahan PVC adalah stabilitas termal. PVC mempunyai stabilitas termal yang rendah (Kollár & Zsoldos, 2012).

Polietilen (PE) merupakan polimer dengan suhu transisi gelas yang rendah dan dapat berfungsi sebagai pemodifikasi yang baik tetapi tidak kompatibel dengan PVC, karena merupakan bahan yang mikroheterogen (Kollár & Zsoldos,

2012). PE secara luas digunakan untuk isolasi listrik tegangan menengah sampai tinggi karena sifat permitivitas yang relatif rendah, kehilangan dielektrik yang rendah, dan kekuatan tembus dielektrik yang tinggi (Zazoum *et al.*, 2013). Campuran polimer PVC dan PE sebesar 1% merupakan campuran yang kompatibel. PE sebagai *plasticizer* PVC secara signifikan menaikkan mobilitas molekul (Kollár & Zsoldos, 2012).

Nanokomposit merupakan polimer yang mulai dikembangkan, terutama terkait dengan perbaikan dalam sifat mekanik, termal, dan elektrik. Sifat mekanis dari PE bergantung pada tipe percabangan, struktur kristal, dan berat molekulnya. Nanokomposit yang menggunakan bahan pengisi *organoclay* memiliki stabilitas termal yang baik (Saeedi *et al.*, 2011).

Penambahan *nanoclay* pada campuran HDPE, LDPE, PP, PVC, dan serbuk kayu dapat meningkatkan sifat termal (Deka & Maji, 2010; Deka *et al.*, 2011). Menurut Wang *et al.* (2010), penambahan *carbon nanotube* dan montmorilonit pada nanokomposit dapat memperbaiki sifat termal. Nanokomposit dari HDPE dan NPCC yang diaktivasi permukaannya mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap degradasi termal (Saeedi & Sharahi, 2011). Zhu *et al.* (2014) mempelajari pengaruh filler *hollow glass microsphere* (HGM) terhadap sifat termal dan sifat listrik komposit HDPE.

Komposit PVC dan LDPE menggunakan bahan pengisi serbuk kayu menghasilkan campuran dengan sifat mekanik dan sifat termal yang baik. Unar *et al.* (2010) mempelajari pengaruh berbagai aditif terhadap sifat fisika dari polimer PVC. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa penambahan berbagai aditif ke dalam polimer memberikan pengaruh besar pada sifat fisika. Nurhajati dkk. (2011) melaporkan bahwa penambahan NPCC pada LDPE memberikan sifat ketahanan panas yang baik. Savrik *et al.* (2010) melakukan penelitian tentang stabilitas termal campuran PVC dengan zeolit dan seng stearat. Yarahmadi *et al.* (2010) melakukan penelitian tentang nanokomposit campuran PVC dan montmorilonit menggunakan *chelating agent*. Corcione dan Frigione (2012) dalam penelitiannya menyatakan bahwa untuk mengetahui sifat dan struktur nanokomposit digunakan analisis termal. Karakteristik sifat mekanik ketahanan api dan pembakaran dan nanokomposit campuran PVC dan LDPE telah diteliti oleh Yuniari (2014).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan LDPE terhadap sifat elektrik dan termal nanokomposit PVC/LDPE.

BAHAN DAN METODE

Bahan Penelitian

Plastik yang digunakan pada penelitian ini adalah PVC granula ex Reiken Asahi Plastics dari Jepang dan LDPE merek Petiln dari Malaysia. *Nano precipitated calcium carbonate* (NPCC) yang digunakan merek Shengke produksi Shandong Haize Nanomaterials Co., Ltd. dengan spesifikasi NPCCA-601, CaCO_3 (*coated*) $\geq 95\%$, bentuk partikel kubus, ukuran partikel rata-rata 40 nm, kadar air $\leq 0,5\%$, *brightness* $\geq 90\%$, absorpsi minyak 25-40 ml/100 g, *specific gravity* sebesar 2,5 g/cm³, *specific surface area* (BET) ≥ 20 m²/g, HCl *insoluble* 0,1-0,2%, derajat aktivitas $\geq 99\%$, dan pH 8,5-10,5. Bahan aditif yang digunakan adalah maleat anhidrat merek Sigma Aldrich sebagai *compatibilizer*, dikumil peroksida sebagai *inisiator*, antioksidan (Master X-AOX), antimonit trioksida sebagai *flame retardant* dari Jerman, kalsium stearat sebagai *heat stabilizer* buatan Singapura merek FACI, asam stearat, dan dioktil ftalat (DOP) sebagai *plasticizer*.

Peralatan Penelitian

Peralatan untuk pembuatan nanokomposit terdiri atas timbangan digital merek Mettler Toledo, *hot blender*, laboplastomil merek Toyoseiki *hydraulic press* MN *Vulcanizing Press Spec* XLB, D 400 x 400 x1, mesin *pelletizing* merek Suzhou. Alat uji meliputi alat uji elektrik dan alat uji termal (*Ball Presser* dan *Glow Wire Tester*) dan *fourier transform infrared* (FTIR) merek Shimadzu, *thermogravimetric/differential thermal analyzer* (TGA/DTA) merek Perkin Elmer dan *differential scanning calorimetry* (DSC) merek Perkin Elmer.

Metode Penelitian

Nanokomposit PVC dan LDPE dibuat dengan formulasi seperti disajikan pada Tabel 1. Pencampuran semua komponen penyusun nanokomposit PVC/LDPE, dilakukan dengan laboplastomil. Mesin laboplastomil dihidupkan sesudah mencapai suhu 215°C semua bahan dimasukkan kedalam *hopper* adapun torsi putaran adalah 50 rpm, sedangkan waktu komponding adalah 10 menit. Kompon yang terjadi dimasukkan unit *pelletizing* untuk dibentuk menjadi pelet. Kompon untuk keperluan pengujian ditekan

Tabel 1. Formulasi penelitian.

Kode Sampel	PVC (phr)	LDPE (phr)	Flame retardant (phr)	NPCC (phr)
P100/LD15/F30	100	15	30	10
P100/LD20/F30	100	20	30	10
P100/LD25/F30	100	25	30	10
P100/LD30/F30	100	30	30	10
P100/LD15/F35	100	15	35	10
P100/LD20/F35	100	20	35	10
P100/LD25/F35	100	25	35	10
P100/LD30/F35	100	30	35	10

menggunakan *hydraulic press* pada suhu 215 °C waktu 10 menit (Yuniari, 2014).

Pengujian termal menggunakan peralatan TGA dan DTA merek perkin Elmer. Sampel yang digunakan berat 10 mg untuk TGA dan 12,795 mg untuk DTA, dipanaskan pada suhu 300-400°C dengan kecepatan 5°C/menit.

Pengujian DSC menggunakan peralatan merek Perkin Elmer, sampel yang digunakan berat 3,6 g dipanaskan pada suhu 400°C dengan kecepatan 5°C/menit.

Pengujian sifat elektrik nanokomposit sesuai SNI. 04-6504-2001 Lampu swaballast untuk pelayanan umum-persyaratan keselamatan. Spek-trum inframerah diuji dengan FTIR merek Shimadzu dengan rentang panjang gelombang 700-4000 cm⁻¹.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Elektrik Nanokomposit

Pengujian sifat elektrik meliputi uji resistansi isolasi (*volume resistivity*). Hasil uji disajikan pada Tabel 2. Sifat elektrik nanokomposit ditentukan oleh sifat masing-masing polimer pendukungnya.

Polimer yang konduktif merupakan polimer yang dapat menghantarkan arus listrik.

Tabel 2 menunjukkan sifat termal nanokomposit yang di lakukan dengan uji resistansi isolasi. Penambahan LDPE (20, 25 dan 30 phr) pada nanokomposit resistansi isolasi cenderung menunjukkan pola naik, kecuali pada nanokomposit PVC/LDPE/*flame retardant* (100/30/30 dan 100/15/35) nilai resistansi isolasi cenderung sangat tinggi yaitu sebesar 1867 MΩ dan 1647 MΩ. Nilai resistansi yang tinggi terjadi karena ada elektron yang terdelokalisasi. Polimer dapat bersifat konduktif karena terjadi perubahan ikatan tunggal maupun ganda antara atom-atom karbon pada rantai utama polimer (polimer terkojugasi). Yuniari (2014) melaporkan bahwa campuran PVC/LDPE dan NPCC menghasilkan campuran yang homogen dan kompatibel. Nanokomposit yang kompatibel mempunyai porositas kecil. Nanokomposit dengan porositas kecil dapat menghambat gerakan elektron ketika mentransmisikan energi listrik. Sehingga nilai resistansi isolasi nanokomposit tinggi atau dengan kata lain mempunyai sifat elektrik baik (Tomo,

Tabel 2. Hasil uji resistansi isolasi.

PVC/LDPE/ <i>flame retardant</i>	Resistansi isolasi	Syarat mutu SNI 04-6504-2001
100/15/30	1867 MΩ	≥ 4 MΩ
100/20/30	539 MΩ	≥ 4 MΩ
100/25/30	837 MΩ	≥ 4 MΩ
100/30/30	1647 MΩ	≥ 4 MΩ
100/15/35	735 MΩ	≥ 4 MΩ
100/20/35	582 MΩ	≥ 4 MΩ
100/25/35	670 MΩ	≥ 4 MΩ
100/30/35	729 MΩ	≥ 4 MΩ

2010). Hasil uji menunjukkan bahwa semua variasi memenuhi persyaratan SNI 04-6504-2001. Hal ini menunjukkan komposit PVC/LDPE/*flame retardant* tidak terjadi kebocoran arus listrik. Sedangkan penambahan *flame retardant* cenderung menurunkan nilai resistansi isolasi. Pada rentang suhu TG ($\leq 230^{\circ}\text{C}$) seperti yang disajikan pada Gambar 1 suhu dibawah TG pergerakan molekul tidak berpengaruh terhadap nilai resistansi isolasi, segera setelah TG dilampaui naik, pada suhu yang lebih tinggi akan terjadi penurunan nilai resistansi isolasi nanokomposit. Hal ini disebabkan nanokomposit sudah terjadi dekomposisi.

Karakteristik TGA/DTA Nanokomposit

Analisis termal merupakan teknik untuk mengukur sifat fisis suatu bahan dan atau hasil hasil reaksi yang diukur sebagai fungsi temperatur.

Karakteristik termal memegang peranan penting terhadap sifat suatu bahan karena berkaitan erat dengan struktur dalam bahan itu sendiri. Bahan bila dipanaskan akan terjadi perubahan struktur yang mengakibatkan adanya perubahan dalam kapasitas panas atau energi termal bahan tersebut. Dalam analisis TGA (Gambar 1) dan DTA (Gambar 2) nanokomposit mulai mengalami perubahan atau reaksi ditunjukkan oleh penyimpangan terhadap garis horizontal. Reaksi telah sempurna apabila tercapai kurva horizontal dan tidak mengalami perubahan kembali. Nanokomposit PVC/LDPE/*Flame retardant* (100/30/30) dan (100/20/30) mulai terdekomposisi pada suhu 230°C . Hasil penelitian ini selaras dengan penelitian dari (Rajendran *et al.*, 2008; Saeedi *et al.*, 2011). Pada kondisi pemanasan dinamis dekomposisi berlangsung pada kisaran suhu $230\text{--}280^{\circ}\text{C}$. Pada suhu $280\text{--}400^{\circ}\text{C}$ tampak terjadi garis sejajar artinya

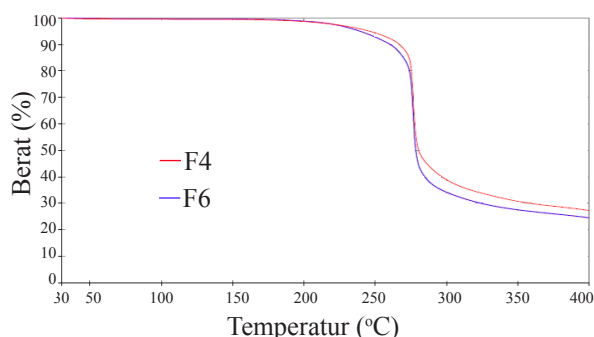
sudah terjadi dekomposisi maksimum dengan 50% berat nanokomposit sudah terdekomposisi.

DTA digunakan untuk pengukuran karakteristik termal. Sampel yang digunakan seberat 12,795 mg dengan laju $5^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Perubahan termogram DTA disebabkan oleh perubahan panas reaksi yang tidak hanya dipengaruhi oleh perubahan masa nanokomposit tetapi juga oleh terjadinya proses (reaksi) perubahan struktur dan perubahan fasa nanokomposit. Dari termogram DTA diperoleh perubahan kurva yang menunjukkan adanya perubahan masa panas reaksi. Analisa DTA seperti pada Gambar 2 menunjukkan puncak eksotermik nanokomposit PVC/LDPE/*flame retardant* (100/30/30 dan 100/20/35) di sekitar suhu 280°C . Pada suhu sekitar $270\text{--}320^{\circ}\text{C}$ terjadi proses degradasi dan dekomposisi.

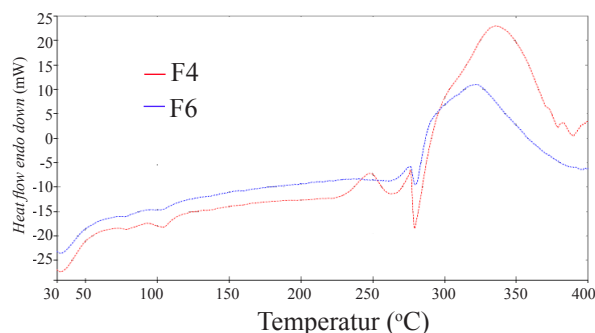
Analisis DSC

Pada analisis termal nanokomposit PVC/LDPE/*flame retardant* menggunakan DSC, sampel yang digunakan seberat 3,6 gram diletakkan dalam cawan porselin dipanaskan hingga 440°C dengan laju kecepatan 5°C .

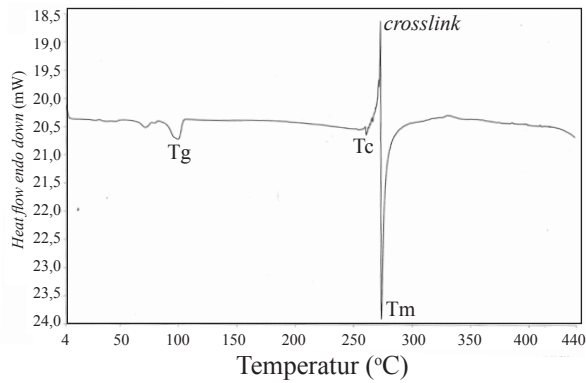
DSC digunakan untuk menentukan suhu dan *heat flow* nanokomposit PVC/LDPE/*Flame retardant*. Data yang dihasilkan secara kuantitatif maupun kualitatif dari proses endotermis (*heat absorption*) dan eksotermis (*heat solution*) dari campuran bahan selama transisi proses fisika yang disebabkan perubahan fase, leleh, transisi gelas, kristalisasi, oksidasi dan perubahan lain akibat panas. Analisis DSC nanokomposit PVC/LDPE/*flame retardant* (100/30/30) yang disajikan pada Gambar 3 pada kondisi endoterm menunjukkan suhu transisi gelas terjadi pada 60°C , *cold cristallization* (T_c) pada suhu 250°C .



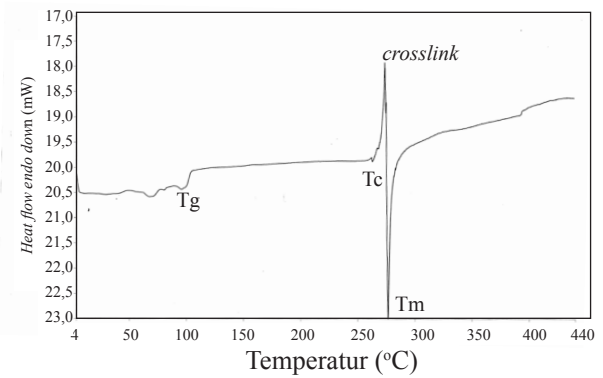
Gambar 1. Grafik TGA nanokomposit PVC/LDPE/*Flame retardant*: (F4) (100/30/30) dan (F6) (100/20/35).



Gambar 2. Grafik DTA nanokomposit PVC/LDPE/*Flame retardant*: (F4) (100/30/30) dan (F6) (100/20/35).



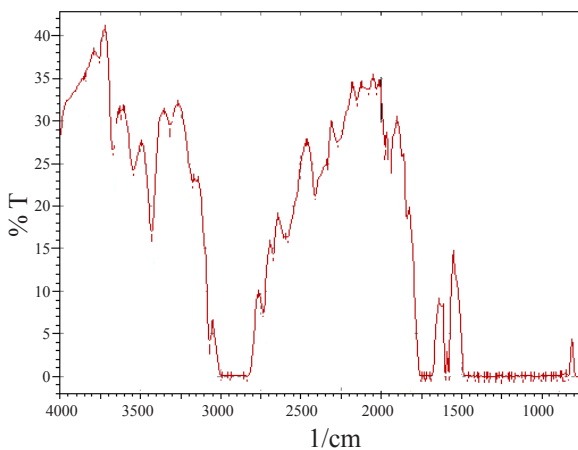
Gambar 3. Grafik DSC nanokomposit PVC/LDPE/*flame retardant* (100/30/30).



Gambar 4. Grafik DSC nanokomposit PVC/LDPE/*flame retardant* (100/20/35).

Pada suhu kristalisasi polimer akan kehilangan susunan jaringan secara acak dan membentuk ikatan intermolekular sehingga molekul polimer lebih mudah bergabung membentuk ikatan selama proses kristalisasi pada kondisi eksotermis, kondisi ini akan menaikkan *heat flow*. T_m (*crystalline*

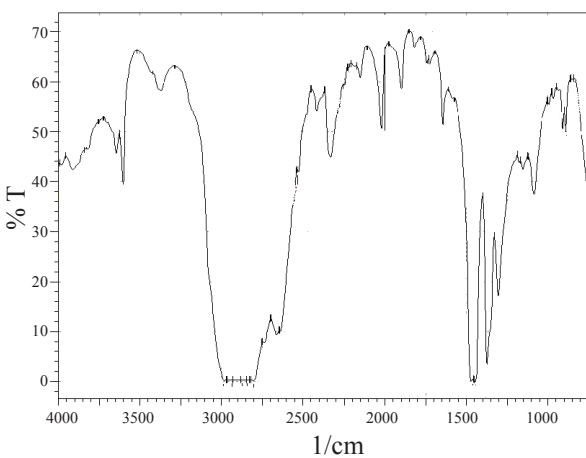
melting) terjadi pada suhu 260°C, perubahan material dari padat ke cair disebut pelelehan. Pada saat material mulai meleleh, molekul molekul menyerap energi menyebabkan ikatan antar molekul mulai melemah. Sedangkan analisis DSC untuk nanokomposit PVC/LPE/*Flame retardant* (100/20/35) disajikan pada Gambar 4 pada kondisi endoterm suhu transition glass menunjukkan 60°C, *cold cristallization* (T_c) pada suhu 250°C dan *crystalline melting* pada suhu 260°C. Hal ini menunjukkan penambahan jumlah LDPE dan *flame retardant* tidak merubah suhu transisi gelas, titik leleh dan suhu kristalisasi.



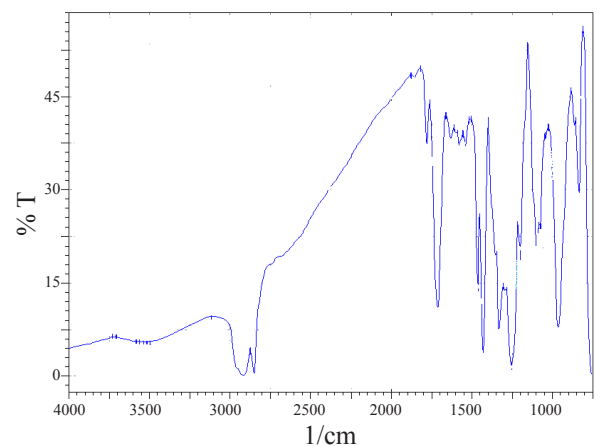
Gambar 5. Spektrum PVC dengan FTIR.

Analisis Gugus Fungsi Nanokomposit PVC/LDPE/*Flame Retardant*

Spektrum FTIR dari masing-masing polimer dan nanokomposit disajikan pada Gambar 5, 6, dan 7. Panjang gelombang dari polimer PVC disajikan pada Gambar 5. Menurut Bodirlau *et al.* (2009), spektrum PVC menggambarkan pita



Gambar 6. Spektrum LDPE dengan FTIR.



Gambar 7. Spektrum nanokomposit PVC/LDPE/*Flame retardant* dengan FTIR.

serapan di daerah 2959 cm^{-1} (C-H *stretching* dari CH-Cl), 2929 cm^{-1} (C-H *stretching* dari CH_2), 1461 dan 1430 cm^{-1} (kibasan CH_2), 1332 cm^{-1} (CH_2) deformasi, 1272 cm^{-1} (C-H *stretching* dari CH-Cl), 1072 cm^{-1} (*rocking* CH_2), 703 , 639 dan 616 cm^{-1} (C-Cl *stretching*). Spektrum PVC bahan penelitian adalah: bilangan gelombang 2973 cm^{-1} menunjukkan C-H *stretching* dari CH-Cl; 2816 dan 2824 cm^{-1} C-H *stretching* dari CH_2 ; 1432 cm^{-1} CH_2 kibasan CH_2 dan 1335 cm^{-1} CH_2 CH_2 deformasi.

Spektrum FTIR LDPE yang disajikan pada Gambar 6 menggambarkan pita serapan di daerah bilangan gelombang berturut-turut: $3913,96$ - $3604,48$; $2905,02\text{ cm}^{-1}$ (C- CH_3), $2635,94\text{ cm}^{-1}$, $1470,39$ - $1539,10\text{ cm}^{-1}$ (C=C), $1304,12$ - $1367,50\text{ cm}^{-1}$ (C-H), $11751,16\text{ cm}^{-1}$, $1081,02\text{ cm}^{-1}$ (CH_2), $718,09\text{ cm}^{-1}$ (acetate).

Spektrum nanokomposit PVC/LDPE/FR disajikan pada Gambar 7. Absorbansi nanokomposit terjadi pada panjang gelombang 1579 cm^{-1} terbentuk gugus fungsi C=C merupakan *polyene*. Keberadaan *polyene* dipengaruhi oleh adanya penggabungan LDPE dan NPCC. Pada panjang gelombang 1724 cm^{-1} terdapat gugus karbonil. Puncak tersebut mengindikasikan reaksi antara PVC dan oksigen (Saeedi *et al.*, 2011).

KESIMPULAN

Penambahan LDPE maupun *flame retardant* memberikan sifat elektrik nanokomposit lebih baik. Nilai resistansi isolasi tertinggi adalah $1867\text{ M}\Omega$ dan memenuhi syarat mutu SNI 04-6504-2011 ($\geq 4\text{ M}\Omega$). Sifat termal nanokomposit tidak terpengaruh oleh adanya penambahan LDPE maupun *flame retardant*. Nanokomposit terdekomposisi maksimum pada rentang suhu 280 - 400°C dengan fraksi 50% berat. Analisa DSC pada kondisi endoterm menunjukkan penambahan LDPE dan *flame retardant* tidak merubah suhu transisi gelas (T_g), suhu leleh (T_m) dan suhu kristalisasi (T_c). Spektrum FTIR nanokomposit menunjukkan muncul puncak baru pada panjang gelombang 1579 cm^{-1} adalah gugus fungsi *polyene* (C=C).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Ir. Niken Karsiati selaku Kepala Bidang Pengujian, Sertifikasi, dan Kalibrasi BBKKP yang telah membantu koordinasi pelaksanaan penelitian dan pengujian. Di samping itu ucapan

terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Dra. Sri Brataningsih P. L. dan teman-teman yang tergabung dalam kelompok kerja atas bantuannya dalam hal pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Bodirlau, R., Teaca, C. A., & Spiridon, I. (2009). Preparation and characterization of composites comprising modified hardwood and wood polymers/poly (vinyl chloride). *BioResources*, 4(4), 1285-1304.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional). (2001). *SNI 04-6504-2001 Lampu swaballast untuk pelayanan umum-persyaratan keselamatan*. Jakarta, Indonesia: BSN.
- Corcione, C. E., & Frigione, M. (2012). Characterization of nanocomposites by thermal analysis. *Materials*, 5(12), 2960-2980.
- Deka, B. K., & Maji, T. K. (2010). Effect of coupling agent and nanoclay on properties of HDPE, LDPE, PP, PVC blend and *Phargamites karka* nanocomposite. *Composites Science and Technology*, 70(12), 1755-1761.
- Deka, B. K., Maji, T. K., & Mandal, M. (2011). Study on properties of nanocomposites based on HDPE, LDPE, PP, PVC, wood and clay. *Polymer Bulletin*, 67(9), 1875-1892.
- Kollár, M., & Zsoldos, G. (2012). Investigating poly-(vinyl-chloride)-polyethylene blends by thermal methods. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 107(2), 645-650.
- Nurhajati, D. W., Yuniari, A., & Kasmudjiastuti, E. (2011). Sifat elektrik dan thermal nanokomposit HDPE/NPCC. *Majalah Kulit, Karet dan Plastik*, 27(1), 01-06.
- Rajendran, S., Prabhu, M. R., & Rani, M. U. (2008). Characterization of PVC/PEMA based polymer blend electrolytes. *International Journal of Electrochemical Science*, 3, 282-290.
- Saeedi, M., Ghasemi, I., & Karrabi, M. (2011). Thermal degradation of poly (vinyl chloride): effect of nanoclay and low density polyethylene content. *Iranian Polymer Journal*, 20, 423-432.
- Saeedi, M., & Sharahi, S. J. (2011). Morphological and thermal properties of HDPE/ CaCO_3 nanocomposites: effect of content of nano and MFI. *International Conference on Nanotechnology and Biosensors IPCBEE*, 25, 34-38.
- Savrik, S. A., Erdoğan, B. C., Balköse, D., & Ülkü, S. (2010). Statistical thermal stability of PVC. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(3), 1811-1822.
- Tomo, H. S. (2010). *Karakteristik sifat mekanik dan elektrik pelat bipolar sel bahan bakar berkarbon grafit dalam matriks polimer ABS* (Tesis). Universitas Indonesia, Indonesia.
- Unar, I. N., Soomro, S. A., & Aziz, S. (2010). Effect

- of various additives on physical properties of polyvinylchloride resin, *Pakistan Journal of Analytical Environmental Chemistry*, 11(2), 44-50.
- Wang, L., He, X., & Wilkie, C. A. (2010). The utility of nanocomposites in fire retardancy. *Materials*, 3(9), 4580-4606.
- Yarahmadi, N., Jakubowicz, I., & Hjertberg, T. (2010). Development of poly (vinyl chloride)/montmorillonite nanocomposites using chelating agents. *Polymer Degradation and Stability*, 95(2), 132-137.
- Yuniari, A. (2014). Karakteristik sifat mekanik, ketahanan api dan pembakaran dan morfologi nanokomposit campuran PVC dan LDPE. *Majalah Kulit, Karet dan Plastik*, 30(1), 07-14.
- Zazoum, B., David, E., & Ngô, A. D. (2013). LDPE/HDPE/clay nanocomposites: effects of compatibilizer on the structure and dielectric response. *Journal of Nanotechnology*, 2013, 1-10.
- Zhu, B. L., Zheng, H., Wang, J., Ma, J., Wu, J., & Wu, R. (2014). Tailoring of thermal and dielectric properties of LDPE-matrix composites by the volume fraction, density, and surface modification of hollow glass microsphere filler. *Composites Part B: Engineering*, 58, 91-102.

