

SIFAT MEKANIK DAN BIODEGRADASI BIOKOMPOSIT POLI(ASID LAKTIK)
(MECHANICAL PROPERTY AND BIODEGRADATION OF POLY(LACTIC ACID) BIOCOSITES)

NOR SHAFIQAH MOHD, NOOR AFIZAH ROSLI, WAN HAFIZI WAN ISHAK, ISHAK AHMAD*

*Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia
43600, UKM Bangi, Selangor, MALAYSIA
Pengarang utama: gading@ukm.edu.my

ABSTRAK

Kajian ini dijalankan untuk membandingkan sifat poli(asid laktik) (PLA) dengan penambahan selulosa mikrohablur (MCC) dan selulosa amorfus (AC). AC telah disediakan melalui proses pengisaran selulosa menggunakan bebola pengisar. Perbezaan antara MCC dan AC yang dihasilkan dibuktikan melalui mikroskopi imbasan elektron pancaran medan (FESEM), spektroskopi jelmaan Fourier infra-merah (FTIR) dan pembelauan sinar-X (XRD). Filem biokomposit disediakan dengan mencampurkan PLA dan selulosa dalam pelbagai komposisi pengisi (0-10 %berat) melalui kaedah penuangan larutan. Sifat mekanik biokomposit dikaji melalui ujian regangan. Keputusan yang diperoleh menunjukkan bahawa penambahan pengisi meningkatkan kekuatan regangan yang ketara dengan komposisi optimum pada penambahan 6% dan 8% untuk komposisi diperkuat MCC dan AC masing-masing. Sifat biodegradasi dan permukaan biokomposit PLA dikaji masing-masing melalui ujian penguraian dalam tanah dan mikroskop optik. Pada hari ke-56 sampel ditanam, mikrograf permukaan biokomposit PLA-AC menunjukkan perubahan yang paling ketara berbanding biokomposit PLA-MCC dan PLA. Peningkatan sifat biokomposit dengan penambahan AC adalah disebabkan oleh pembentukan ikatan hidrogen antara selulosa dan PLA yang dibuktikan melalui analisis FTIR. Keseluruhan kajian mendapati sifat mekanik dan biodegradasi bagi biokomposit PLA telah ditingkatkan dengan penambahan pengisi selulosa terutamanya selulosa amorfus ke dalam fasa PLA.

Kata kunci: amorfus; selulosa mikrohablur; poli(asid laktik); penuangan larutan

ABSTRACT

In this study the properties of biocomposites of poly(lactic acid) (PLA) filled with microcrystalline cellulose (MCC) and amorphous cellulose (AC) were compared. AC was prepared through ball milling. The difference between the MCC and AC produced was analyzed using field emission scanning electron microscopy (FESEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD) analysis. Biocomposite film was prepared by mixing PLA and cellulose with various filler composition using solution casting method. The mechanical properties of biocomposites were investigated using tensile tests and the results showed that the addition of fibers significantly increased the tensile strength of biocomposites with the optimum composition fillers of 6 wt% and 8 wt% for MCC and AC, respectively. The biodegradation properties were studied through soil burial degradation test and optical microscopy. At day-56 of samples burial, the micrograph of PLA-AC surface revealed the most significant changes compared to PLA-MCC biocomposite and PLA alone. The improvement of AC biocomposite properties could be due the formation of hydrogen bond as revealed through FTIR analysis. The overall study found that the mechanical and biodegradation properties of PLA biocomposites were improved with the addition of AC fibers into the PLA phase.

Keywords: amorphous; microcrystalline cellulose; poly(lactic acid); solution casting

PENGENALAN

Penggunaan polimer dalam pelbagai industri semakin meningkat dari tahun ke tahun. Kebanyakan polimer adalah sangat stabil dan tidak boleh mengurai dengan mudah di mana terdapat kaedah tertentu serta bahan lain diperlukan bagi menguraikan polimer tersebut. Oleh itu, ramai penyelidik mula mengkaji dan menghasilkan polimer yang lebih selamat terhadap alam sekitar. Antara pembaharuan yang dilakukan dengan memperkenalkan plastik terbiodegradasi yang menggunakan bahan berasaskan sumber semula jadi. Plastik polimer terbiodegradasi dianggap sebagai mesra alam kerana mudah terurai secara semulajadi dan dilihat sebagai salah satu penyelesaian untuk masalah pengurusan sisa plastik semasa [1].

Salah satu polimer yang dikategorikan sebagai polimer boleh urai adalah poli(asid laktik) (PLA). PLA adalah salah satu daripada biopolimer yang diperoleh daripada sumber yang boleh diperbaharui seperti kanji dan jagung. PLA mengandungi kumpulan berfungsi ester yang memudahkan tindak balas dengan molekul lain seperti air dan menyumbang kepada sifat degradasi PLA. Produk sampingan selepas penguraian PLA tidak memberi kesan buruk kepada alam sekitar. Kerana sifat biodegradasinya, PLA adalah alternatif yang baik untuk pengeluaran pembungkus makanan, mangkuk dan cawan pakai buang, serta dalam aplikasi perubatan. Walau bagaimanapun, kadar penguraian PLA adalah perlahan walaupun dikategorikan sebagai polimer boleh urai. Sebahagian besar PLA adalah tahan terhadap serangan mikroorganisma di dalam tanah di bawah keadaan ambang. PLA perlu menjalani hidrolisis pada suhu yang tinggi (>58 °C) bagi mengurangkan berat molekulnya sebelum penguraian boleh berlaku. Oleh itu, PLA tidak akan terurai dalam tanah kompos biasa di bawah keadaan ambang [2-3]. Selain itu, kelemahan sifat mekanik seperti sifat rapuh yang tinggi mengehadkan aplikasinya [4].

Dalam kajian ini, selulosa mikrohablur (MCC) dan selulosa amorfus (AC) telah dipilih sebagai pengisi untuk mengatasi sifat kerapuhan dan biodegradasi PLA. Selulosa mikrohablur merupakan agen pengukuh komposit yang baik disebabkan oleh nilai modulus dan kekuatan regangan yang tinggi, boleh terbiodegradasi dan darjah kehabluran yang tinggi [5]. Penggunaan AC sebagai pengisi adalah masih terhad di mana struktur dan morfologi fasa amorfus masih menjadi subjek dalam banyak penyelidikan khususnya tingkah laku mekaniknya. Melalui Zhang et al. (2015) [6], selulosa amorfus boleh disediakan melalui kisaran bebola, hidrolisis selulosa triasetat, regenerasi daripada kadmium etilenadamina, dan lain-lain. Di antara kaedah ini, kisaran bebola telah terbukti menjadi kaedah yang berjaya untuk mendorong perubahan struktur hablur polimer [7]. Tidak seperti selulosa hablur, struktur AC adalah tidak tersusun menjadikannya berbeza daripada selulosa hablur dalam beberapa aspek, seperti kadar serapan air yang tinggi dan kadar hidrolisis enzim yang tinggi [6]. Cocca et al. (2015) [8] melaporkan kesan ke atas sifat mekanik dan biodegradasi biokomposit PCL yang diisi dengan selulosa hablur dan amorfus dari selulosa komersial (Arbocel). Fleksibiliti biokomposit berkurangan dengan penambahan kedua-dua pengisi. Walau bagaimanapun, biokomposit yang berpengisi selulosa amorfus masih menunjukkan fleksibiliti yang ketara berbanding selulosa hablur. Tambahan pula, kinetik biodegradasi meningkat dengan penambahan selulosa amorfus berbanding dengan selulosa hablur disebabkan degradasi dalam tanah tidak mudah berlaku kerana kehabluran selulosa yang tinggi. Berbanding MCC, sifat amorfus yang tinggi pada AC dijangka dapat meningkatkan sifat ketahanan PLA selain meningkatkan penguraian PLA. Hal ini kerana, padatan fasa amorfus yang lebih longgar memudahkan interaksi antara matriks dan pengisi untuk berlaku serta kemasukan air adalah lebih mudah sekali gus meningkatkan penguraian PLA secara hidrolisis.

Dalam kajian ini, pengisi AC telah disediakan melalui kaedah kisaran bebola. Filem PLA dengan komposisi MCC dan AC yang berbeza disediakan melalui kaedah penuangan larutan. Perbandingan antara MCC dan AC yang disediakan dibuktikan melalui analisis spektroskopi jelmaan Fourier infra-merah (FTIR) dan pembelauan sinar-X (XRD). Kemudian, kesan penambahan pengisi MCC dan AC terhadap sifat mekanik dan biodegradasi komposit PLA telah dikaji. Objektif utama penambahan MCC dan AC ini adalah untuk meningkatkan sifat mekanik dan biodegradasi komposit yang diperoleh.

EKSPERIMEN

Bahan

Poli(asid laktik) gred 2002D PLLA dengan ketumpatan 1.24 g/cm^3 diperoleh daripada NatureWorks LLC, USA. MCC dibekalkan oleh Sigma-Aldrich Sdn. Bhd. Bahan mentah lain seperti kloroform dibekalkan oleh R&M Chemical Malaysia, manakala tanah kompos diperoleh daripada Jaya Pot Enterprise, Malaysia.

Penyediaan Selulosa Amorfus

MCC dikisar melalui proses kisanan bebola menggunakan pengisar bebola model Fritsch/Pulverisette 5. Sebanyak 15 bebola keluli dengan diameter 5 mm telah digunakan dan proses dijalankan selama 60 minit dengan kelajuan 450 rpm.

Penyediaan Filem Nipis PLA

1 g pelet PLA dilarutkan bersama 20 mL kloroform dengan pengacauan berterusan pada suhu 60°C selama 1 jam sehingga pelet larut sepenuhnya. Dengan segera, larutan PLA dituang ke dalam piring petri kaca berdiameter 150 mm pelarut dibiarkan meruap pada suhu bilik selama 24 jam.

Penyediaan Filem Nipis Komposit PLA-MCC dan PLA-AC

Pelbagai komposisi campuran PLA-MCC yang berbeza (2, 4, 6, 8, dan 10 bt%) disediakan. Pelet PLA dikacau dalam 20 mL kloroform dengan pengacauan berterusan selama 1 jam pada suhu 60°C sehingga larut sepenuhnya. Pengisi ditambah ke dalam larutan dan dikacau selama 30 min lagi. Kemudian, campuran disonikasi selama 15 minit dan larutan dituang ke dalam piring petri kaca untuk menghasilkan filem komposit. Eksperimen diulang dengan menggantikan MCC dengan AC untuk penghasilan filem nipis PLA-AC pada komposisi yang berbeza.

Pencirian

Ujian pembelauan sinar-X (XRD) dilakukan menggunakan difraktometer Bruker AXS D8 Advance pada 40 kV, 40 mA dengan radiasi $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda=0.1541$). Sebelum analisis, sampel dikisar halus dan diletakkan di atas pemegang sampel dan diratakan. Julat radiasi adalah pada sudut $2\theta = 10^\circ\text{--}50^\circ$. Indeks penghabluran dikira menggunakan persamaan di bawah (Persamaan 1).

$$\text{Indeks penghabluran} = \frac{I_{\text{hablur}} - I_{\text{amorfus}}}{I_{\text{hablur}}} \times 100 \quad (1)$$

Analisis spektroskopi FTIR dijalankan bagi mengkaji struktur kimia serbuk MCC, serbuk AC dan komposit PLA. Analisis dibuat menggunakan Spektrometer Perkin-Elmer (SpektrumGX). Semua sampel dicirikan pada julat nombor gelombang $4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$.

Ujian regangan dilakukan menggunakan mesin ujian universal model INSTRON 5566 mengikut piawai ASTM D412-06a. Kepingan komposit dipotong berbentuk dumbel menggunakan alat *hollow die punch*. Kadar tarikan dan beban sel adalah pada 10 mm/min dan 5 N.

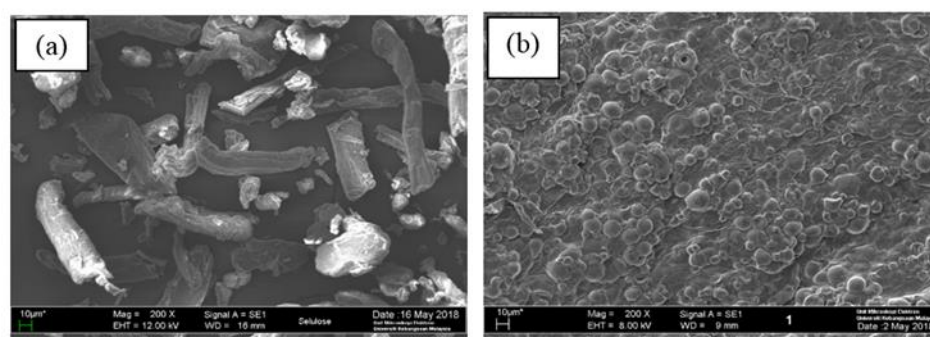
Ujian penguraian sampel dalam tanah dilakukan dengan menanam komposit yang telah dipotong berbentuk segi empat dengan dimensi $4 \times 3 \text{ cm}^2$ [9] selama 56 hari [5]. Setiap 14 hari, sampel dikeluarkan dari tanah kemudian dibilas dengan air suling dan dikeringkan dalam ketuhar pada 40°C dan ditimbang. Mikrograf permukaan juga diambil untuk perbandingan.

HASIL DAN PERBINCANGAN

Mikroskopi Imbasan Elektron Pancaran Medan (FESEM)

Secara kualitatif, analisis SEM dilakukan terhadap sampel serbuk selulosa mikrohablur dan serbuk selulosa amorfus. Proses kisanan bebola menunjukkan kesan luar biasa pada bentuk fiber. Pengurangan progresif panjang fiber telah diperhatikan selepas 60 minit kisanan bebola. Selulosa didapati benar-benar kehilangan struktur berserabut dan panjang kepada zarah-zarah kecil dengan dimensi pada julat mikrometer. Dalam Rajah 1, mikrograf SEM jelas menunjukkan pengurangan saiz yang dialami oleh fiber selulosa selepas kisanan bebola.

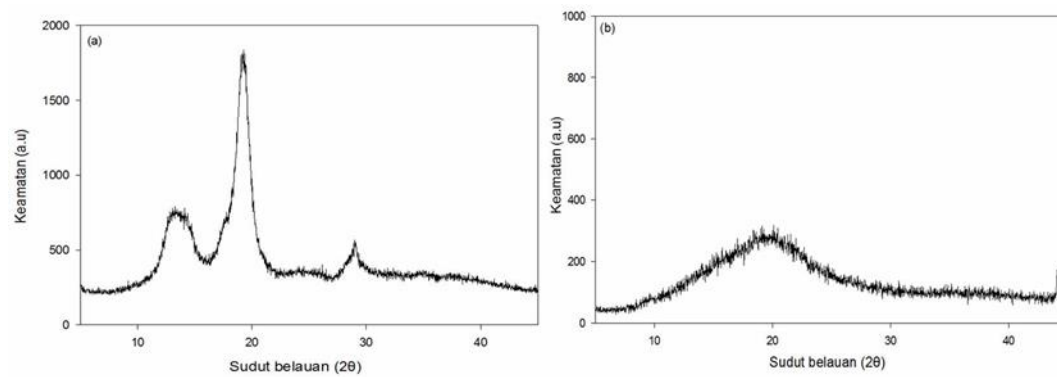
Seperti yang telah dinyatakan dari pemerhatian kualitatif, julat panjang fiber berkurangan dengan peningkatan masa kisanan. Mikrograf jelas menunjukkan bahawa selepas proses kisanan bebola selulosa mengubah morfologi asal berserabut kepada serbuk halus yang seakan berbentuk sfera.



Rajah 1 Mikrograf FESEM bagi serbuk (a) MCC (b) AC

Ujian Pembelauan Sinar-X (XRD)

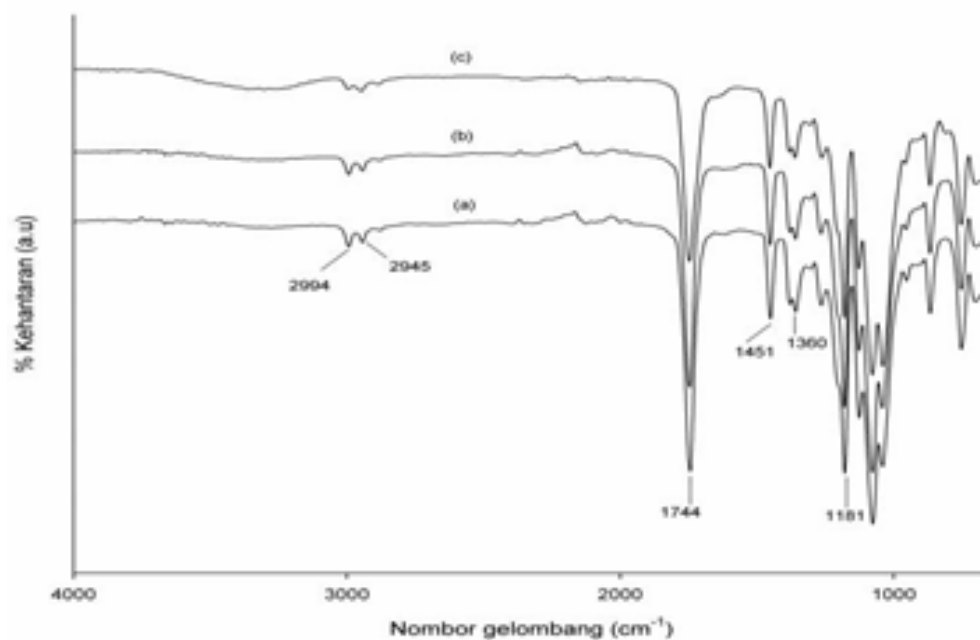
Corak pembelauan sinar-X bagi MCC sebelum dan selepas proses kisanan bebola (selulosa (a) dan (b)) ditunjukkan dalam Rajah 2. Didapati keamatan berubah secara drastik pada puncak 22° . MCC (a) menunjukkan puncak tajam yang memperlihatkan kehabluran yang tinggi dengan indeks penghabluran 99%. Namun selepas proses kisanan bebola, didapati keamatan puncak menjadi lebar dan rendah. Hasil proses kisanan bebola dengan jelas berjaya mengubahsuai struktur hablur MCC kepada struktur amorfus [10]. Pengurangan dalam indeks kehabluran dikaitkan dengan kehilangan struktur teratur kawasan hablur kepada struktur yang tidak teratur. Pengubahsuaian ini dijangka dapat meningkatkan fleksibiliti selulosa yang digunakan sebagai pengisi.



Rajah 2 Corak pembelauan sinar-X bagi (a) MCC dan (b) AC

Analisis Spektroskopi Jelmaan Fourier Infra-merah (FTIR)

Rajah 3 menunjukkan perbandingan spektrum PLA, biokomposit PLA-MCC dan biokomposit PLA-AC. Analisis dijalankan bagi mengkaji sebarang pembentukan ikatan dalam biokomposit. Puncak utama bagi PLA adalah pada julat sekitar 2994-2945, 1744, 1360, 1181 cm^{-1} di mana masing-masing merujuk kepada getaran regangan C-H₂, getaran regangan C=O (ester), getaran bengkokan -CH₃ dan C-H, dan getaran regangan asimetri dan simetri C-C(O)O [11]. Berbanding dengan spektrum PLA, spektrum biokomposit menunjukkan perubahan pada puncak 1744 cm^{-1} . Biokomposit PLA-AC memperlihatkan sedikit penurunan keamatan pada puncak ini dengan peralihan nombor gelombang kepada 1746 cm^{-1} manakala penurunan keamatan puncak ini adalah lebih ketara dalam spektrum biokomposit PLA-AC dan nombor gelombang beralih kepada 1748 cm^{-1} . Oleh kerana puncak ini dikaitkan dengan getaran dan regangan kumpulan C=O (ester), ini membuktikan bahawa terbentuknya interaksi antara kumpulan C=O dalam PLA dengan OH pada selulosa melalui ikatan hidrogen. Interaksi antara selulosa dan PLA boleh dikaitkan dengan pembentukan ikatan hidrogen antara kumpulan hidroksil pada selulosa dengan hidroksil terminal [12-13] atau kumpulan karboksilik [14] serta kumpulan karbonil pada kumpulan ester daripada PLA [15]. PLA boleh menjalani hidrolisis terma atau nyahpempolimeran semasa pemprosesan [16]. Struktur AC yang longgar memudahkan pembentukan ikatan terjadi antara AC dan PLA. Data analisis spektrum FTIR ini diringkaskan dalam Jadual 1.



Rajah 3 Spektrum FTIR bagi (a) filem PLA, (b) biokomposit PLA-MCC dan (c) biokomposit PLA-AC

Jadual 1 Puncak spektrum FTIR bagi filem PLA tulen dan biokomposit yang dihasilkan

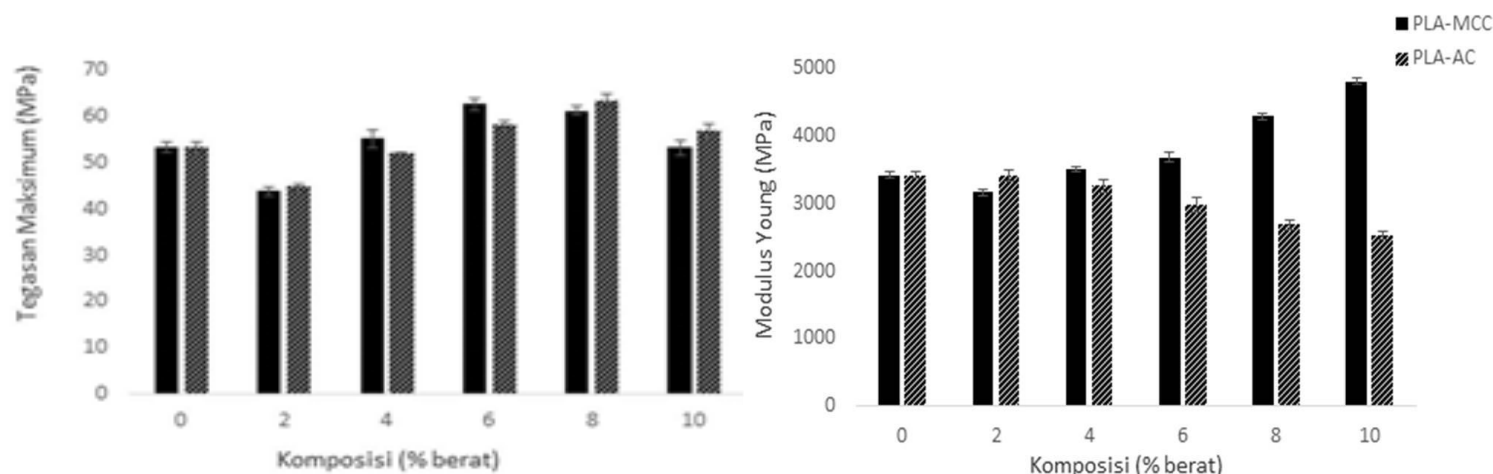
Puncak (cm^{-1})	Perwakilan Puncak
2994-2945	Getaran dan regangan C-H ₂
1744	Getaran regangan C=O (ester)
1360	getaran bengkokan -CH ₃ dan C-H
1181	getaran regangan asimetri dan simetri C-C(=O)-O

Ujian Regangan

Keputusan ujian regangan bagi biokomposit diperihalkan sebagai tegasan maksimum dan modulus Young. Kesan penambahan pengisi yang berbeza ditunjukkan dalam Rajah 4. Seperti yang ditunjukkan dalam rajah, nilai tegasan maksimum meningkat apabila pengisi ditambah. Peningkatan ini dapat dilihat dengan kenaikan hampir 17% iaitu daripada 53.24 MPa (0% pengisi) kepada (62.56 MPa pada penambahan 6% MCC dan 63.26 MPa pada penambahan 8% AC). Nilai optimum direkodkan pada kedua-dua pemuatan tersebut. Penambahan pengisi AC menunjukkan peningkatan yang lebih baik berbanding MCC mungkin disebabkan oleh interaksi antara matriks dan pengisi AC melalui ikatan hidrogen, yang seterusnya menjadikan AC sebagai agen pengukuh yang berkesan. Selain itu, pengurangan saiz pengisi juga sangat mempengaruhi sifat mekanik komposit seperti yang dilaporkan oleh Avolio et al. (2011) [6], kisanan bebola mengurangkan diameter selulosa dan sekaligus meningkatkan nisbah aspek yang turut meningkatkan sifat-sifat mekanik komposit. Penggunaan pengisi amorfus yang mempunyai nisbah aspek (l/d) tinggi membolehkan penyebaran yang lebih baik dan meningkatkan interaksi berkesan antara polimer matriks dan pengisi. Nisbah aspek pengisi yang dimiliki oleh selulosa amorfus dapat meningkatkan luas permukaan bagi pengisi untuk berinteraksi dengan matriks.

Walau bagaimanapun, nilai tegasan berkurangan sedikit pada penambahan pengisi yang rendah iaitu 2% pengisi disebabkan oleh kesan gangguan pengisi yang rendah mengganggu rantaian polimer matriks polimer. Walau bagaimanapun, faktor kehadiran pengisi pada kandungan yang lebih tinggi telah meningkatkan kekuatan regangan dan modulus Young komposit. Pada kandungan serabut yang rendah, matriks tidak diperkukuh secukupnya oleh serat dan penumpuan terikan yang tinggi berlaku dalam matrik pada tahap terikan yang rendah. Keadaan ini menyebabkan ikatan antara serabut dan matriks putus sekaligus menyebabkan pencairan matriks oleh serabut nyah-ikatan dan serabut bukan penguat [17]. Namun begitu, nilai tegasan maksimum mula mengalami penurunan dengan penambahan pengisi pada peratus komposisi pengisi yang tinggi kerana berlakunya aglomerasi dan sebaran pengisi di dalam matriks berkurang kerana semakin luas permukaan pengisi untuk bertindak balas menjadikan partikel pengisi lebih tertarik secara semulajadi antara satu sama lain.

Modulus Young bagi komposit PLA-MCC telah mengalami peningkatan yang seragam dari 3408.55 MPa kepada 4795.11 MPa apabila komposisi pengisi bertambah. Peningkatan ini disebabkan oleh peningkatan fasa kaku biokomposit di mana PLA dan pengisi MCC mempunyai sifat kaku yang tinggi. Sebaliknya, penambahan pengisi AC ke dalam fasa matriks menyebabkan penurunan modulus Young. Hal ini disebabkan oleh peningkatan sifat elastik biokomposit yang mungkin disebabkan oleh struktur amorfus dalam AC yang lebih fleksibel. Selain itu, pengisi AC menunjukkan darjah kehabluran yang lebih rendah berbanding berbanding MCC seperti yang ditunjukkan dalam ujian pembelauan sinar-X.

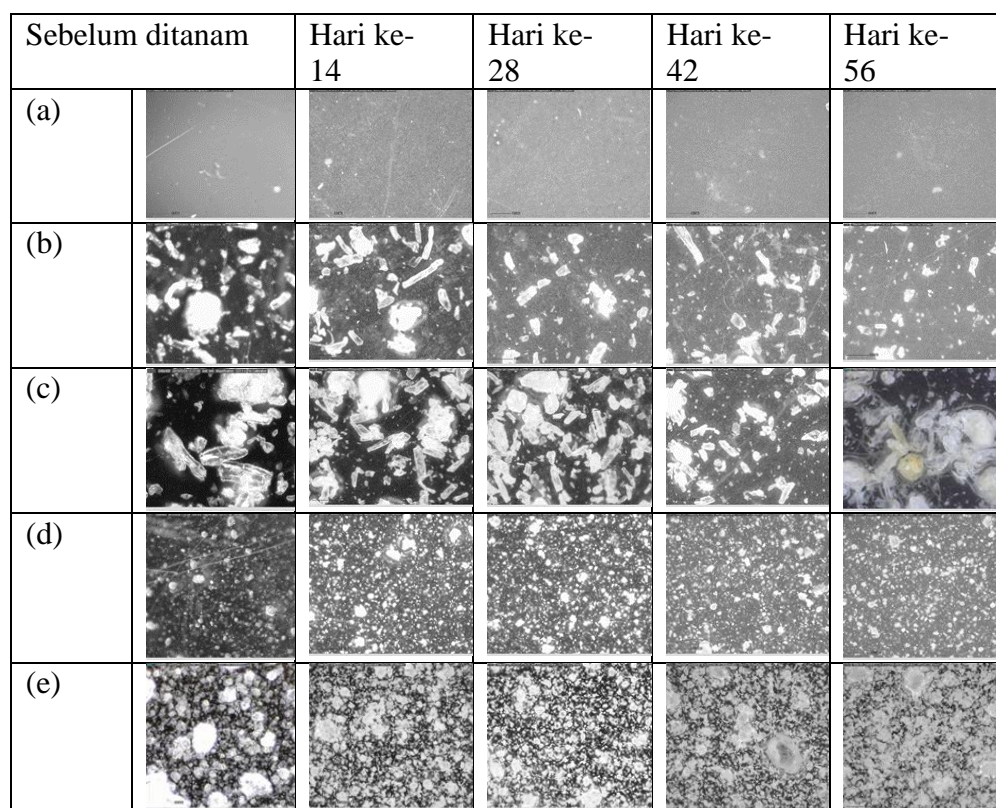


Rajah 4 Sifat regangan filem PLA dan biokomposit

Ujian Penguraian dalam Tanah

Rajah 5 menunjukkan mikrograf permukaan sampel sebelum dan selepas dikeluarkan dari tanah kompos pada hari yang berlainan. Seperti yang dapat dilihat pada Rajah 5, tiada retakan atau penguraian pada permukaan filem PLA sehingga hari ke-56. Perubahan permukaan komposit PLA-MCC dan PLA-AC pula dapat diperhatikan seawal hari ke-28. Selepas hari ke-56, semua sampel komposit menunjukkan perubahan pada permukaan yang berkemungkinan menunjukkan proses penguraian baru berlaku walaupun tiada sebarang perubahan jisim dicatatkan. Pemerhatian yang sama dilaporkan oleh Mathew et al. (2015) [18], di mana penambahan MCC ke dalam matrik PLA didapati meningkatkan biodegradasi PLA di tanah kerana kadar degradasi MCC adalah lebih cepat berbanding dengan PLA tulen.

Perubahan paling ketara diperhatikan pada biokomposit PLA-AC pada komposisi 10 bt%. Oleh itu dapat disimpulkan bahawa biokomposit PLA-AC yang lebih mudah menyerap air disebabkan oleh strukturnya yang longgar melalui ikatan hidrogen yang sekali gus meningkatkan kadar penguraian. Dapat disimpulkan bahawa penambahan kedua-dua pengisi dalam komposit dapat meningkatkan sifat biodegradasi PLA.



Rajah 5 Imej mikroskop optik bagi (a) filem PLA, (b) PLA/MCC2, (c) PLA/MCC10, (d) PLA/AC2, dan (e) PLA/AC10 sebelum dan selepas penguraian dalam tanah

Degradasi PLA adalah bergantung kepada kadar serapan air di mana penguraiannya melibatkan empat langkah utama iaitu penyerapan air, belahan ester yang membentuk oligomer, solubilisasi oligomer dan penyebaran oligomer larut oleh bakteria. Kadar degradasi yang lebih perlahan dalam PLA adalah disebabkan oleh rintangan dalam penyerapan air disebabkan oleh kehadiran kumpulan sisi metil (-CH₃) pada struktur PLA. Oleh itu, perubahan yang ketara pada permukaan boleh juga merujuk kepada penguraian yang berlaku disebabkan oleh kemudahserapan air.

Selain itu, faktor utama yang mempercepatkan penguraian biokomposit berpengisi AC adalah disebabkan sifat hidrofilik AC yang tinggi berbanding MCC yang membawa kepada serapan air yang tinggi. Serapan air yang tinggi memudahkan kemasukan mikroorganisma dalam biokomposit. Oleh itu, penguraian selulosa dapat berlaku dengan cepat disebabkan pemisahan secara rawak ikatan makromolekul selulosa hasil daripada belahan mikroorganisma [19]. Selulosa dalam biokomposit akan digunakan terlebih dahulu oleh mikroorganisma disebabkan penguraian selulosa yang lebih cepat daripada matriks PLA. Ini sekaligus meningkatkan keporosan, pembentukan liang dan mengurangkan keutuhan matriks PLA [20]. Ini meningkatkan pecahan matriks polimer kepada zarah kecil yang seterusnya boleh diurai oleh proses penguraian yang lain, seterusnya meningkatkan kadar penguraian biokomposit.

KESIMPULAN

Kajian penambahan pengisi selulosa mikrohablur dan selulosa amorfus dan kesannya terhadap sifat komposit PLA telah berjaya dijalankan. Melalui kajian ini, dapat disimpulkan bahawa struktur hablur MCC berjaya diubah suai kepada struktur amorfus melalui kaedah kisanan bebola. Keputusan ini dapat dibuktikan dengan pemerhatian morfologi melalui mikrograf FESEM yang menyokong dan memperlihatkan struktur berserat selulosa sepenuhnya dimusnahkan dan serbuk halus dihasilkan selepas 60 minit proses kisanan bebola. Pengurangan keamatan puncak ester dalam PLA membuktikan interaksi yang berlaku di antara selulosa amorfus dan PLA. Daripada ujian regangan, tegasan maksimum telah mengalami peningkatan dengan penambahan kedua-dua jenis pengisi MCC dan AC. Didapati nilai optimum bagi tegasan maksimum direkodkan pada penambahan 6 bt% MCC dan 8 bt% AC dengan nilai maksimum direkodkan oleh biokomposit AC. Akhir sekali, ujian pengebumian tanah mendedahkan bahawa komposit yang mengandungi selulosa amorfus menjalani penguraian lebih cepat disebabkan oleh kadar serapan air yang tinggi berbanding MCC. Oleh itu, kajian ini membuktikan kesesuaian penambahan selulosa amorfus sebagai pengisi yang memperbaiki sifat komposit PLA.

PENGHARGAAN

Setinggi-tinggi penghargaan kepada Pusat Pengajian Sains Kimia dan Teknologi Makanan, Universiti Kebangsaan Malaysia untuk kemudahan, peralatan dan sokongan pembiayaan (FRGS-MRSA/1/2016/STG07/UKM/01/1) untuk menjayakan kajian ini.

RUJUKAN

1. Wu, C.S. Renewable resource-based composites of recycled natural fibers and maleated polylactide bioplastic: characterization and biodegradability. *Polym Degrad & Stab* (2009) 94: 1076-1084.
2. Karamanlioglu, M., & Robson, G.D. The influence of biotic and abiotic factors on the rate of degradation of poly (lactic) acid (PLA) coupons buried in compost and soil. *Polym Degrad & Stab* (2013) 98: 2063–2071.
3. Teramoto, N., Urata K., Ozawa, K., & Shibata, M. Biodegradation of aliphatic polyester composites reinforced by abaca fiber. *Polym Degrad & Stab* (2004) 86: 401–409.
4. Rosli, N.A., Ahmad, I., Anuar, F.H., & Abdullah, I. Mechanical and thermal properties of natural rubber-modified poly (lactic acid) compatibilized with telechelic liquid natural rubber. *Polym Test* (2016) 54: 196-202.
5. Arjmandi, R., Hassan, A., Haafiz, M.K.M. & Zakaria, Z. Biodegradability and thermal properties of hybrid montmorillonite/microcrystalline cellulose filled polylactic acid composites: Effect of filler ratio. *Polym & Polym Compos Shropshire* (2016) 24: 741-746.
6. Zhang, B.X., Azuma, J.I., & Uyama, H. *RSC Advances* (2015) 5: 2900-2907.
7. Avolio, R., Bonadies, I., Capitani, D., Errico, M.E., Gentile, G., & Avella, M. *Carbo Polym* (2012) 87: 265-273.
8. Cocca, M., Avolio, R., Gentile, G., Di Pace, E., Errico, M.E., & Avella, M. *Carbo Polym* (2015) 118: 170-182.
9. Rosli, N.A., Ahmad, I., Anuar, F.H., & Abdullah, I. The contribution of eco-friendly bio-based blends on enhancing the thermal stability and biodegradability of Poly (lactic acid). *J Clean Prod* (2018) 198: 987-995.
10. Hideno, A. Comparison of the thermal degradation properties of crystalline and amorphous cellulose, as well as treated lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol* (2016) 11: 6309-6319.
11. Erbetta, C.D.C., Alves, R.J., Resende, J.M., Freitas, R.F.S., & de Sousa, R.G. Synthesis and characterization of Poly(D,L-lactide-co-glycolide) copolymer. *J Biomat Nanobiotechnol* (2012) 3: 208–225.
12. Bax, B., & Müssig, J. Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. *Compos Sci Technol* (2008) 68: 1601–1607.
13. Yew, G.H., Mohd Yusof, A.M., Mohd Ishak, Z.A., & Ishiaku, U.S. Water absorption and enzymatic degradation of poly(lactic acid)/rice starch composites. *Polym Degrad Stab* (2005) 90: 488–500.
14. Shah, B.L., Selke, S.E., Walters, M.B., & Heiden, P.A. Effects of wood flour and chitosan on mechanical, chemical, and thermal properties of polylactide. *Polym Compos* (2008) 29: 655–663.
15. Garlotta, D. A literature review of poly(lactic acid). *J Polym Environ* (2001) 9: 63–84.
16. Wang, H., Sun, X., & Seib, P. Mechanical properties of poly(lactic acid) and wheat starch blends with methylenediphenyl diisocyanate. *J App Polym Sci* (2002) 84: 1257–1262.
17. De, S.K., & White, J.R. *Short Fibre-Polymer Composites*. England: Woodhead Publishing Limited. (1996).
18. Mathew, A.P., Oksman K. & Sain, M. Mechanical properties of biodegradable composites from poly(lactic acid) (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *J App Polym Sci* (2015) 97: 2014-2025.
19. Zhang, L., & Liu, H. Biodegradability of regenerated cellulose films in soil. *Ind Engin Chem Res* (1996) 35: 4682–4685.
20. Bras, J., Hassan, M.L., Bruzesse, C., Hassan, E.A., El-Wakil, N.A., & Dufresne, A. Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites. *Ind Crop Prod* (2010) 32: 627–633.