

塑膠基質對木材塑膠複合材戶外耐候性質之影響

李家皇¹ 吳東霖¹ 洪克昌¹ 吳志鴻²

【摘要】本研究除利用高密度聚乙烯 (High density polyethylene, HDPE)、回收型高密度聚乙烯 (Recycled high density polyethylene, rHDPE)、低密度聚乙烯 (Low density polyethylene, LDPE)、聚丙烯 (Polypropylene, PP) 及聚苯乙烯 (Polystyrene, PS) 5 種不同塑膠基質與山黃麻木粒片製備木材塑膠複合材 (Wood-plastic composites, WPC) 之外, 並比較此 5 種複合材經 48 週戶外耐候試驗後之各項性質差異性。試驗結果顯示, 各複合材之抗彎強度及抗彎彈性模數均隨著耐候時間增加而下降, 其中 HDPE、rHDPE 及 PP 所製備之木材塑膠複合材具有較高之抗彎強度及抗彎彈性模數均保留率; 相對的, LDPE 及 PS 所製備者則較低。另一方面, 由傅立葉轉換紅外線光譜儀分析結果發現, 以 PP 所製備之 WPC, 其表面羰基指數增加之幅度最大, 而利用 HDPE、rHDPE 及 LDPE 所製備之 WPC, 羰基指數變化量則呈現先上升後下降之現象。此外, 比較 HDPE 與 rHDPE 所製備之 WPC, 兩者具有相似之抗彎及耐候性質, 顯示回收型高密度聚乙烯實具有應用於木材塑膠複合材之潛能。

【關鍵詞】木材塑膠複合材、塑膠基質、戶外耐候、強度保留率、羰基指數。

Effects of Plastic Matrix on Outdoor Weathering Properties of Wood-plastic Composites

Chia-Huang Lee¹ Tung-Lin Wu¹ Ke-Chang Hung¹ Jyh-Horng Wu²

【Abstract】The purpose of this work is to compare the mechanical behavior and weathering properties of different types of wood-plastic composites (WPC), including virgin high density polyethylene (HDPE), recycled high density polyethylene (rHDPE), virgin low density polyethylene (LDPE), virgin polypropylene (PP) and virgin polystyrene (PS) based WPCs, during 48 weeks of outdoor weathering. Results revealed that the modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of all WPCs decreased with increasing exposure time. Of these, the HDPE, rHDPE and PP based composites showed the higher MOR and MOE retention ratios after 48 weeks of outdoor weathering, while the LDPE and PS based WPCs had the lower values. On the other hand, Fourier transform infrared (FTIR) spectra demonstrated that the PP based WPC exhibited the highest carbonyl index difference (CID) value during outdoor weathering, while the value of HDPE, rHDPE and LDPE based WPCs was increased at first and then decreased gradually. Furthermore, as compared to the virgin HDPE composite, the rHDPE one exhibited the similar flexural and weathering properties. Accordingly, the recycled plastic has the potential to be used in the manufacture of WPCs.

【Keywords】Wood-plastic composite, Plastic matrix, Outdoor weathering, Strength retention ratio, Carbonyl index.

¹ 國立中興大學森林學系研究生, 40227 台中市南區國光路 250 號。

Graduate Students, Department of Forestry, National Chung Hsing University. 250, Kuo-Kuang Road, Taichung 40227, Taiwan.

² 國立中興大學森林學系副教授, 通訊作者, 40227 台中市南區國光路 250 號。

Associate Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. Corresponding author. 250, Kuo-Kuang Road, Taichung 40227, Taiwan. E-mail: eric@nchu.edu.tw.

I、前言

以木材粒片製備高分子生物複合材之歷史悠久，早在 1900 年時，利用酚甲醛樹脂與木材所製備之木材熱硬化型塑膠複合材 (Wood-thermosetting plastic composite) 即被應用於電木 (Bakelite) 上。此外，1916 年時，英國勞斯萊斯 (Rolls-Royce) 汽車公司進一步將此類複合材應用於汽車排檔桿，因而開啟了木材塑膠複合材 (Wood-plastic composite, WPC) 之商業市場 (Clemons, 2002)。然而，此類複合材料在使用過程中會有甲醛釋出等問題，對於人體與環境均有相當程度之危害。因此，為解決此一問題，美國於 80 年代時，即發展出以熱可塑性塑膠取代原甲醛系熱硬化型之 WPC (Clemons, 2002; Jiang and Kamdem, 2004)。

近年來，以木材粒片製備塑膠複合材之研究，越來越受到世界各國重視。此乃因為這類複合材除了結合塑膠和木材兩種材料之特性外，亦可相互改善兩種材料各自之缺點。許多研究指出，木質纖維材料具有可再生 (Renewable)、低密度、低成本、高韌性、高比強度及生物可分解性 (Biodegradability) 等優點，添加於塑膠材料中，可以明顯的提升塑膠材料之抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 及彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE)，並增加塑膠材料的挺性 (Stiffness) (吳東霖等, 2008; 張懋如等, 2009; 吳東霖等, 2011; Ochi, 2006)，同時具改善木材的尺寸安定性、耐腐性及降低生產成本等優點 (陳合進等, 2003; 陳載永等, 2000; Chen *et al.*, 2006; Hung and Wu, 2010)。因此，目前木材塑膠複合材已廣泛應用於地板、壁板、天花板、籬笆、戶外用鋪板、戶外用椅及路標等產品，且其用量有逐年上升之趨勢 (陳載永等, 2002; 陳合進等, 2003; Ashori, 2008)。

一般而言，製備 WPC 所用的熱可塑性之塑膠種類相當繁多，常見者有高密度聚乙烯 (High density polyethylene, HDPE)、低密度聚乙烯 (Low density polyethylene, LDPE)、聚丙烯 (Polypropylene, PP)、聚苯乙烯 (Polystyrene, PS) 及聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride, PVC) 等 5 大類；其中，又以聚乙烯所佔之比例最大 (García *et al.*, 2009)。然而，現今雖有許多學者針對 WPC 進行

研究，但通常僅針對單一或兩種塑膠基質進行探討，而對於各種塑膠基質所製備之複合材其性質之比較，目前仍缺乏相關之研究。另一方面，WPC 具有較木材為佳的尺寸安定性 (Dimensional stability) 及抗病蟲之能力，因此無須特別維護，其使用年限即可達 25-30 年之久 (García *et al.*, 2009)。此外，由於 WPC 之耐候性質普遍不佳，應用於戶外建築時，易受外在環境之溫度、污染物、陽光、溼氣、風及降雨的影響，產生降解與風化等現象，進而導致各項性質的降低，影響其在戶外之使用性。因此，研究 WPC 之耐候性質，已成為 WPC 在發展上極為重要的課題之一。目前，多數的研究仍僅著重於耐候試驗後，WPC 表面顏色的變化及機械性質的損失；相對的，對於各類 WPC 表面化學性質之比較，則缺乏系統性的研究。因此，本研究除利用戶外耐候試驗評估各種不同塑膠基質 WPC 之耐候與劣化性質之外，並進一步利用傅立葉轉換紅外線光譜儀 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 等分析儀器，探討各複合材經耐候試驗後其表面化學性質之變化。

II、材料與方法

(I) 試驗材料

1. 木粒片

本試驗所使用之木材，取自中興大學惠蓀實驗林場第二林班之速生樹種山黃麻 (*Trema orientalis* (L.))。所得試材 (密度：382 kg/m³；pH 值：5.2) 以搗切機及磨切機處理成理想尺寸之粒片後，以篩分機篩分尺寸為 -6+16 mesh 之粒片。所得粒片置入 75°C 烘箱中乾燥至含水率 3% 以下，並以塑膠袋密封供後續複合材製備之用。

2. 塑膠材料

本試驗所使用之塑膠分別為高密度聚乙烯 (HDPE)、回收型高密度聚乙烯 (rHDPE)、低密度聚乙烯 (LDPE)、聚丙烯 (PP) 及聚苯乙烯 (PS) 共 5 種。其中，HDPE 購自台灣聚合化學股份有限公司，型號為聯塑烯 LH901；rHDPE (LH901 之回收塑膠) 由台灣冠復股份有

限公司所提供；LDPE 購自台灣聚合化學股份有限公司，型號為百塑烯 NA248；PP 購自李長榮化學股份有限公司，型號為福聚烯 PT100；PS 購自奇美實業股份有限公司，型號為 POLYREX[®] PG-80。所得之原料先以圓盤式磨粉機 (Attrition mill) 進行磨粉處理，並利用篩分機篩選粒徑尺寸通過 20 mesh 之塑膠粉末，以供後續複合材製備之用。

(II) 木材粒片塑膠複合材之製備

WPC 板材預設密度為 $850 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ ，成板尺寸為 300 mm (長) × 200 mm (寬) × 12 mm (厚)。抄製時，秤取適量的木材粒片 (-6+16 mesh) 及塑膠粉末 (重量比為 60:40) 於 Lödige (FM 300D, Germany) 犁頭式混合機中攪拌，經 5 min 均勻攪拌後取出，並使其均勻灑入成型模具以抄製成板坯。另外，於板坯中心層置入 K type 熱電耦線後，將板坯置入熱壓機中，熱壓溫度依塑膠基質的不同，分別為 200°C (PP)、180°C (HDPE、rHDPE 及 PS) 或 170°C (LDPE)，並於壓力 2.5 MPa 下進行熱壓。當板坯中心溫度達 180°C (PP)、160°C (HDPE、rHDPE 及 PS) 或 150°C (LDPE) 時，隨即將板坯移置冷壓機中冷卻至常溫以完成板材之製備。之後，將 WPC 置於 20°C、65% RH 之恆溫恆濕室中調濕 7 天，以供後續性質分析。

(III) 戶外耐候試驗

本試驗參考 Hung 等人 (2012) 之試驗方法，將試材放置於中興大學森林系二館頂樓面向正南方且與水平面夾角為 45° 之耐候試驗架上直接曝曬，總試驗期為 48 週。試驗期間除定期 (4、8、16、24 及 48 週) 利用色差計 (Color difference meter) 評估試材表面之顏色變化外，並檢測試材之強度保留率。此外，以全反射式傅立葉轉換紅外線光譜 (Attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR) 評估試驗期間試材表面官能基之變化。

(IV) 性質分析

1. 試材表面顏色之測定

以 Minolta (CM-3600d, Japan) 之分光式色差計，進行試材表面顏色測量，光源為 D₆₅，測試窗直徑為 8 mm，視角為 10°。將試材直接置於測試窗量測，獲得 L*、a*、b* 數據，並參照國際照明協會所制定之 CIE LAB 色彩體系，依下列式子計算 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 及 ΔE^* 等數值。

$$\Delta L^* = L^*_t - L^*_o$$

$$\Delta a^* = a^*_t - a^*_o$$

$$\Delta b^* = b^*_t - b^*_o$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

式中， L^*_t 為不同耐候時間所測得之明度值， L^*_o 則為耐候試驗前試材之明度值，而 ΔL^* 為明度差值。 a^*_t 為不同耐候時間所測得之紅綠參數值， a^*_o 則為耐候試驗前試材之紅綠參數值，而 Δa^* 為紅綠參數之變化值。 b^*_t 為不同耐候時間所測得之黃藍參數值， b^*_o 則為耐候試驗前試材之黃藍參數值，而 Δb^* 為黃藍參數之變化值。 ΔE^* 則為色差值，數值愈大表示顏色變化愈大。

2. 電子顯微鏡分析

本試驗使用 Hitachi (TM-1000, Japan) 桌上型電子顯微鏡，以加速電壓 15 kV 之條件進行試驗，除藉此觀測木材與塑膠間之界面情形外，並觀察 WPC 於耐候試驗期間表面結構之變化。

3. 強度保留率

耐候試驗期間，定期檢測試材之 MOR 及 MOE，並依下列式子計算耐候試驗過程中其 MOR 及 MOE 保留率。

$$\text{MOR retention ratio (\%)} = (\text{MOR}_x / \text{MOR}_o) \times 100$$

$$\text{MOE retention ratio (\%)} = (\text{MOE}_x / \text{MOE}_o) \times 100$$

式中， MOR_x 及 MOE_x 為不同耐候時間所測得之 MOR 及 MOE； MOR_o 及 MOE_o 則為耐候試驗前試材之 MOR 及 MOE。

4. 複合材表面官能基及羰基指數之評估

耐候試驗期間，定期利用 PerkinElmer (Spectrum 100, UK) ATR-FTIR 對 WPC 試材表面進行檢測，藉此瞭解 WPC 經耐候試驗後，表面化學組成及其主要光降解產物

羰基含量之變化。分析時，所使用之掃描解析度為 4 cm^{-1} ，掃描次數為 32 次，波數 (Wavenumber) 範圍為 $4000\text{--}650\text{ cm}^{-1}$ 。取得 ATR-FTIR 光譜圖後，依下列式子分別計算試材羰基指數 (Carbonyl index, CI) (Stark *et al.*, 2004) 及羰基指數差值 (Carbonyl index difference, CID)。

$$\text{Carbonyl index (CI)} = (I_{1714}/I_p) \times 100$$

$$\text{Carbonyl index difference (CID)} = \text{CI}_w - \text{CI}_0$$

式中， I_p 及 I_{1714} 分別代表塑膠特定吸收峰 (HDPE、LDPE、PP: 2916 cm^{-1} ; PS: 696 cm^{-1}) 及羰基吸收峰 (1714 cm^{-1}) 之強度，而 CI_0 及 CI_w 則分別代表複合材耐候前及耐候後之羰基指數。

(V) 統計分析

本試驗利用 SAS 統計系統進行變異數分析 (Analysis of variance, ANOVA)，並透過 Scheffe 檢定 (Scheffe's test) 評估各組間之差異性 (信賴區間為 95%)。

III、結果與討論

(I) 塑膠基質對 WPC 經戶外耐候試驗後顏色參數之影響

圖 1 為 5 種塑膠所製備之複合材於 48 週 (336 天) 戶外耐候試驗期間，其明度差值 (ΔL^*)、紅綠參數差值 (Δa^*)、黃藍參數差值 (Δb^*) 及色差值 (ΔE^*) 之變化。其中，由圖 1 (a) 中可以得知，各類 WPC 之明度值於前 28 天耐候試驗期間有下降情形產生，而當試驗達 42 天時，明度值則會大幅增高，並於第 56 天時， ΔL^* 達到最大正值 (此時期 HDPE、rHDPE、LDPE、PP 及 PS 所製備者之 L^* 值分別為 66、68、66、64 及 70)，之後則隨耐候時間的增加而下降，且在第 224 天後趨於平緩。然而，經 336 天耐候試驗後，5 種 WPC 中以 PP 製備者其明度差值最小 (ΔL^* 約為 -4)，其餘 4 者之 ΔL^* 則約為 -7~-10 之間，顯示板材經戶外耐候試驗後其明度下降。而在紅綠參數方面，如圖 1 (b) 所示，各 WPC

之 Δa^* 在前 28 天耐候試驗中均無顯著變化。然而，當耐候試驗達 42 天時則有顯著的下降，此與 ΔL^* 之變化情形相異，但之後則與 ΔL^* 之變化情形相似，各 WPC 之 Δa^* 值均隨著耐候時間增加而下降。以 PP 及 PS 所製備之 WPC 為例，於耐候 336 天後， a^* 值均由 8 降至 1。此外，由圖 1 (c) 中可以得知，WPC 之 Δb^* 與 ΔL^* 之變化呈現相反的情形，在前 42 天的耐候試驗中，其 Δb^* 值呈先上升而後下降之情形。另外，由圖中亦可得知，以 PS 製備之 WPC 其 Δb^* 值下降幅度遠低於其他 4 種 WPC，經 48 週的耐候試驗後，其 Δb^* 僅為 -8，而其他塑膠基質之 WPC 其 Δb^* 則高達 -13。至於 ΔE^* 之變化，則可以由圖 1 (d) 中得知，各塑膠基質 WPC 之變化趨勢相似，其色差值變化主要可分為兩階段：耐候試驗前 56 天，色差值呈先上升而後下降之趨勢；而在 56 天耐候試驗後，色差值則隨著耐候試驗時間的增加而上升，並於 224 天後漸趨平緩。

至於本試驗於前 28 天耐候期間，造成各 WPC 之 Δb^* 上升與 ΔL^* 下降之原因，推測主要係因為木材中的木質素受到陽光照射後，產生光氧化作用而形成醌類 (Quinones) 等發色團 (Ndiaye *et al.*, 2008)，因此導致 WPC 表面顏色產生黃化現象，進而使 Δb^* 上升及 ΔL^* 下降。同樣的，Kiguchi 等人 (2007) 亦指出，WPC 初期之表面顏色變化主要係來自於木材中成分的改變。另外，當耐候時間達 42 天時，無論 ΔL^* 、 Δa^* 或 Δb^* 均有顯著變化。而造成此現象之原因，主要與戶外耐候試驗期間之降雨情形有關。由圖 1 (e) 試驗地區的降雨量可以發現，於耐候時間第 30 天時，有明顯之降雨情形，其降雨量約 20 mm。因此，木材中之抽出成分及因光降解所產生之醌類物質，因雨水淋洗作用而導致 WPC 其 ΔL^* 值上升以及 Δa^* 與 Δb^* 值下降。此外，Kiguchi 等人 (2007) 亦指出，

WPC 的褪色現象主要係木材中的木質素與半纖維素受到光降解，以及水的淋洗作用所導致。再者，Stark (2006) 於 WPC 的耐候試驗中發現，抽出成分亦為影響木材顏色的主要因子，當試材受到雨水的淋洗作用後，會導致 WPC 的褪色。另一方面，經過 48 週耐候試驗後，除 PS 製備之 WPC 呈現黃化現象外，其餘各 WPC 表面之顏色均呈灰白色。同樣的，Li (2000) 及 Fabiyi 等人 (2008) 的研究指出，HDPE 與木材所製備之 WPC 經戶外耐候試驗後，除表面之木材會失去原有木材顏色而轉變成灰色之外，於塑膠基質方面，亦會減低其透明度 (Transparency)。至於以 PS 所製備之 WPC，其表面呈現黃化之原因，推測可能係因為 PS 基質中苯環結構吸收 UV 光後，因光氧化作用而形成醜類等有色物質所致。

(II) 塑膠基質對 WPC 經戶外耐候試驗後表面結構性質之影響

WPC 經耐候試驗後，除了會造成顏色變化外，亦會造成表面結構產生改變。目前已有許多學者指出，WPC 無論是經戶外或加速耐候試驗，其表面均會產生開裂之情形 (Li, 2000; Stark and Matuana, 2004; Kiguchi *et al.*, 2007; Seldén *et al.*, 2004)。因此，本研究利用 SEM 觀察 WPC 於戶外耐候試驗前後，其表面之結構性質。由圖 2 可以發現，各 WPC 之表面於耐候試驗前均相當平整，且木材與塑膠間具有完整之膠合界面，顯示 WPC 表面結構不會受到塑膠基質的不同而有所改變。然而，經 48 週耐候試驗後，WPC 表面之塑膠與木材片受光降解及雨水淋洗作用，而導致塑膠開裂及木材膨脹等現象，且其 WPC 表面結構之變化會因塑膠基質不同而有所差異。其中，以 HDPE 及 rHDPE 所製備之 WPC (如圖 2 所示)，經 48 週耐候試驗後，於試材表面可以清楚發現木材與塑膠界面產生剝離之現象。再者，塑膠基

質亦有開裂之情形，且越接近木材與塑膠界面，其開裂情形越嚴重。而以 LDPE 製備者亦具有相似之情形，但其開裂情形更為劇烈，其主要原因係 LDPE 所製備之 WPC 具有較高之吸水膨脹性所致 (Lee *et al.*, 2010)。此外，利用 PP 所製備之 WPC，其塑膠開裂之情形較 PE 類塑膠所製備者嚴重，甚至有塑膠剝落之情形，此現象與 Seldén 等人 (2004) 的研究結果相似。而以 PS 製備之 WPC，則為 5 種複合材中，表面劣化情況最為嚴重者，其表面之木材與塑膠界面存有許多大裂縫；且由於木材過度膨脹，以及 PS 塑膠與木材之界面遭受嚴重破壞，因此經雨水淋洗後，大部分包覆在木材外部之塑膠均被雨水淋洗掉。至於造成 PS 製備之 WPC 其表面結構破壞較為嚴重之原因，推測除了該塑膠基質易受光降解之影響外，PS 所製備之 WPC 具高吸水性及吸水膨脹率之特性 (Lee *et al.*, 2010)，亦是導致其表面嚴重劣化的主要因素之一。

(III) 塑膠基質對 WPC 經戶外耐候試驗後抗彎性質之影響

不同塑膠基質所製備之 WPC，其 MOR 及 MOE 性質如表 1 所示。由表中結果可以得知，5 種 WPC 中，以 LDPE 製備者其 MOR 最低，強度僅 8.5 MPa。然而，以 PP 所製備之 WPC 則具有最佳之抗彎強度，其 MOR 高達 25.4 MPa。而 HDPE、rHDPE 及 PS 製備之 WPC，其 MOR 則分別為 21.0、20.3 及 20.0 MPa。另外，於表 1 中亦可發現，MOE 具有與 MOR 相似之趨勢，同樣以 LDPE 製備者最低，其 MOE 僅 1.1 GPa。而以 HDPE、rHDPE、PP 及 PS 塑膠所製備者，其 MOE 則介於 1.7–2.0 GPa，且彼此間無顯著差異。然而，此 5 種 WPC 中木材與塑膠的混合比均相同，僅塑膠基質有所差異，因此造成 WPC 機械性質的差異，主要係來自於塑膠本身的性質。一般而言，塑膠之強度性質為 PP > PS >

表 1 不同塑膠基質 WPC 經戶外耐候試驗後之 MOR 及 MOE 保留率

Table 1 The MOR and MOE retention ratios of various WPCs after outdoor weathering for different time

WPC	MOR (MPa)	MOR retention ratio (%)					MOE (GPa)	MOE retention ratio (%)				
		at different weathering time (week)						at different weathering time (week)				
		4	8	16	24	48		4	8	16	24	48
HDPE	21.0 ± 1.9 ^B	90 ± 7 ^a	88 ± 3 ^a	89 ± 4 ^a	89 ± 4 ^a	72 ± 5 ^b	1.7 ± 0.1 ^A	73 ± 4 ^a	75 ± 8 ^a	77 ± 4 ^a	70 ± 4 ^{ab}	59 ± 6 ^b
rHDPE	20.3 ± 0.9 ^B	87 ± 3 ^a	85 ± 6 ^a	84 ± 4 ^a	75 ± 3 ^{ab}	72 ± 3 ^b	1.7 ± 0.2 ^A	74 ± 6 ^a	74 ± 6 ^a	74 ± 2 ^a	74 ± 2 ^a	61 ± 4 ^b
LDPE	8.5 ± 0.7 ^C	87 ± 5 ^a	89 ± 7 ^a	85 ± 7 ^a	81 ± 9 ^a	63 ± 7 ^b	1.1 ± 0.1 ^B	77 ± 4 ^a	72 ± 5 ^a	68 ± 5 ^a	68 ± 7 ^a	39 ± 2 ^b
PP	25.4 ± 1.4 ^A	86 ± 9 ^{ab}	87 ± 9 ^{ab}	90 ± 2 ^a	77 ± 9 ^{ab}	69 ± 5 ^b	2.0 ± 0.2 ^A	77 ± 14 ^{ab}	77 ± 12 ^{ab}	82 ± 1 ^a	70 ± 8 ^{ab}	59 ± 4 ^b
PS	20.0 ± 3.2 ^B	90 ± 4 ^a	94 ± 1 ^a	80 ± 10 ^{ab}	66 ± 22 ^{ab}	53 ± 10 ^b	2.0 ± 0.2 ^A	86 ± 7 ^a	84 ± 1 ^a	72 ± 8 ^{ab}	57 ± 13 ^{bc}	44 ± 8 ^c

Values are the mean ± SD (n = 5). Different capital and lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) within a column and a row, respectively.

HDPE > LDPE，而此趨勢與本試驗中 WPC 所得的結果相符合。此外，利用原生及回收 HDPE 所製備之 WPC 具有相似的抗彎性質，由此可知 HDPE 經回收再製後，並不影響其製備成 WPC 之性質表現。

另一方面，不同塑膠基質之 WPC 經戶外耐候試驗後對 MOR 及 MOE 保留率之影響如表 1 所示。由表中可以得知，WPC 之 MOR 保留率均隨耐候時間的增加而降低。經 48 週耐候試驗後，各 WPC 之 MOR 強度保留率由大至小則依序為

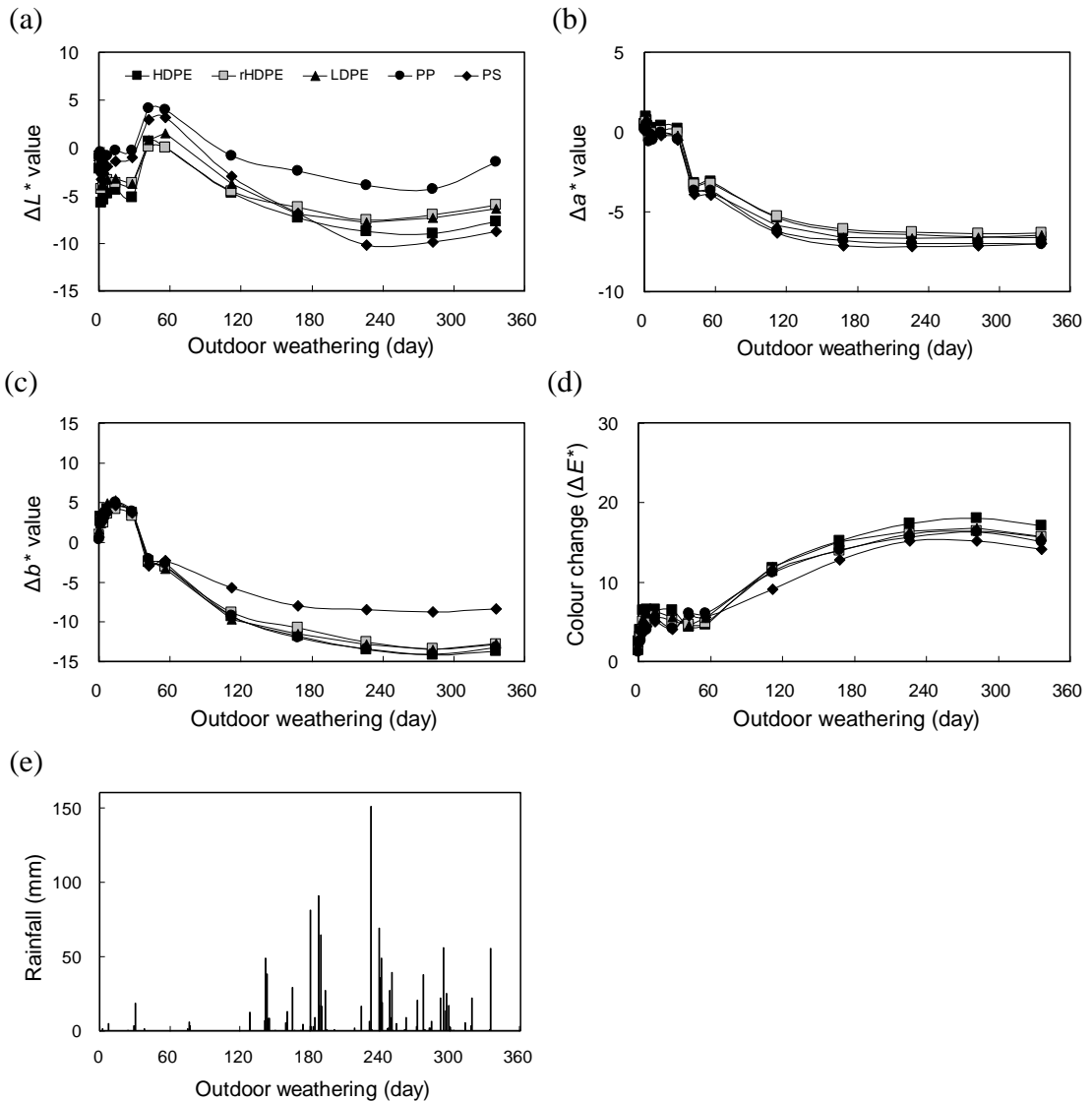


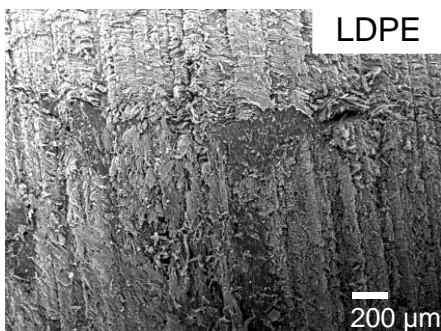
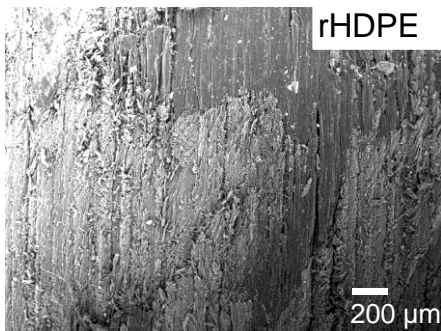
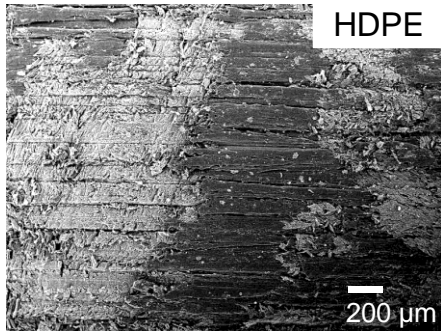
圖 1 不同塑膠基質 WPC 於 336 天戶外耐候試驗期間顏色參數變化及降雨量

Fig. 1 Changes in color parameters of various WPCs (n = 7) and rainfall during outdoor weathering for 336 days. (a): ΔL^* , (b): Δa^* , (c): Δb^* , (d): ΔE^* , (e): rainfall.

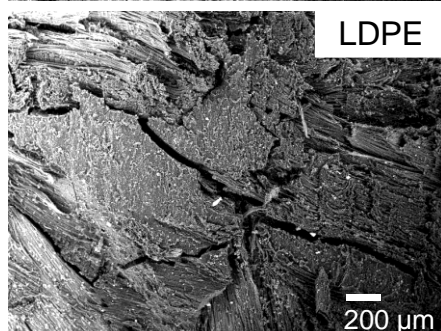
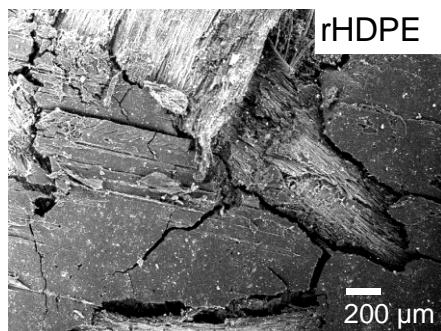
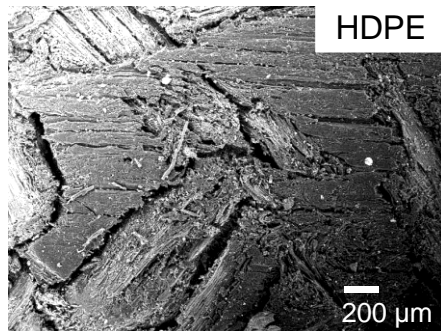
HDPE(72%)、rHDPE(72%)、PP(69%)、LDPE(63%)及PS(53%)。此結果顯示，戶外耐候試驗會造成 WPC 強度降低 25~50%；其中，又以 PS 製備者影響最大。而此結果與 WPC 表面結構變化(圖 2)相似，同樣是以 PS 製備者之耐候性質較其他類型 WPC 低。而在 MOE 保留率方面，由表中亦可以發現，不同塑膠基質所製備之 WPC，其 MOE 保留率與 MOR 具有相似的情形，均隨著耐候時間增加而降低。經 48 週耐候試驗後，以 HDPE、rHDPE 及 PP 製備者具有較高的

保留率，其 MOE 保留率約為 60%。而利用 LDPE 及 PS 製備之 WPC，其 MOE 保留率較低，僅分別為 39 及 44%。一般而言，於戶外耐候試驗時，WPC 除受到戶外日照、溫度及降雨等影響而發生劣化之外，試驗期間木材收縮、膨脹及塑膠開裂等亦為造成 WPC 性質降低的主要因子(Li, 2000)。而利用 LDPE 及 PS 所製備之 WPC，因具有較高吸水膨脹率(Lee *et al.*, 2010)，且表面開裂情形亦十分嚴重，故導致複合材呈現較低的 MOR 及 MOE 保留率。

(a) Before weathering



(b) After 48 weeks weathering



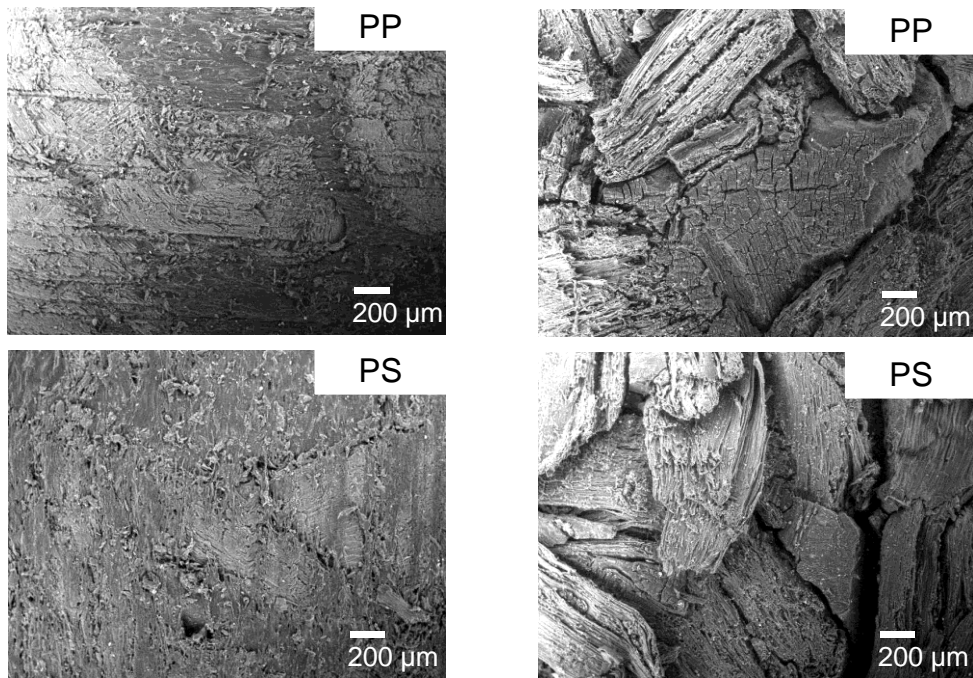


圖 2 不同塑膠基質 WPC 經戶外耐候試驗前後表面之電子顯微照片

Fig. 2 SEM micrographs of various WPCs before (a) and after (b) outdoor weathering for 48 weeks.

(IV) 塑膠基質對 WPC 經戶外耐候試驗後表面官能基之影響

圖 3 為 5 種塑膠基質之 WPC 於戶外 48 週耐候試驗期間之 ATR-FTIR 光譜。由圖中可以發現，WPC 於 1600 及 1510 cm^{-1} 之木質素特定吸收峰強度，均隨著耐候時間增加而下降，且在第 4 週耐候試驗後此吸收峰即消失。另外，代表木質素芳香環上 C-O stretching 的 1240 cm^{-1} 吸收峰，其強度亦隨著耐候時間增加而減低；相對的， 1640 cm^{-1} 之乙烯基 (Vinyl group) 吸收峰於耐候初期則有上升之情形。此現象主要係 WPC 中塑膠基質於耐候試驗期間，透過 Norrish II 的降解機制形成乙烯基所致。此外，於 1735 cm^{-1} 非共軛酯基之吸收峰，經耐候試驗後則轉變成羧酸基 (1714 cm^{-1})，此亦顯示 WPC 中有光氧化的作用產生。由此得知，WPC 於耐候試驗初期，複合材表層即開始產生劣解，並導致其表面顏色產

生變化。另外，由圖 3 中亦可發現，無論利用那一種塑膠基質所製備之 WPC，於耐候試驗後期 (8-48 週)，乙烯基的特定吸收峰均隨著耐候時間增加而有消失的現象，此主要係因為 WPC 中塑膠基質的降解產物於戶外耐候試驗期間受到雨水的淋洗作用所致。

另一方面，Fabiya 等人 (2008) 的研究報告指出，利用 HDPE 與木材所製備之 WPC 經耐候試驗後，羰基的吸收可分為四種型態，其分別為共軛酮基 ($1700-1685\text{ cm}^{-1}$)、羧酸基 ($1725-1715\text{ cm}^{-1}$)、酯基 ($1745-1730\text{ cm}^{-1}$) 及 γ -內酯基 ($1800-1765\text{ cm}^{-1}$)。而 Ndiaye 等人 (2008) 的研究亦發現，PP 製備之 WPC 經加速耐候試驗後，其表面羰基主要是由 1713 、 1735 及 1780 cm^{-1} 之吸收峰所組成，其中，又以羧酸基 (1713 cm^{-1}) 之吸收最為明顯。至於 PS 塑膠經光氧化後所形成之羰基的吸收峰，則可分為

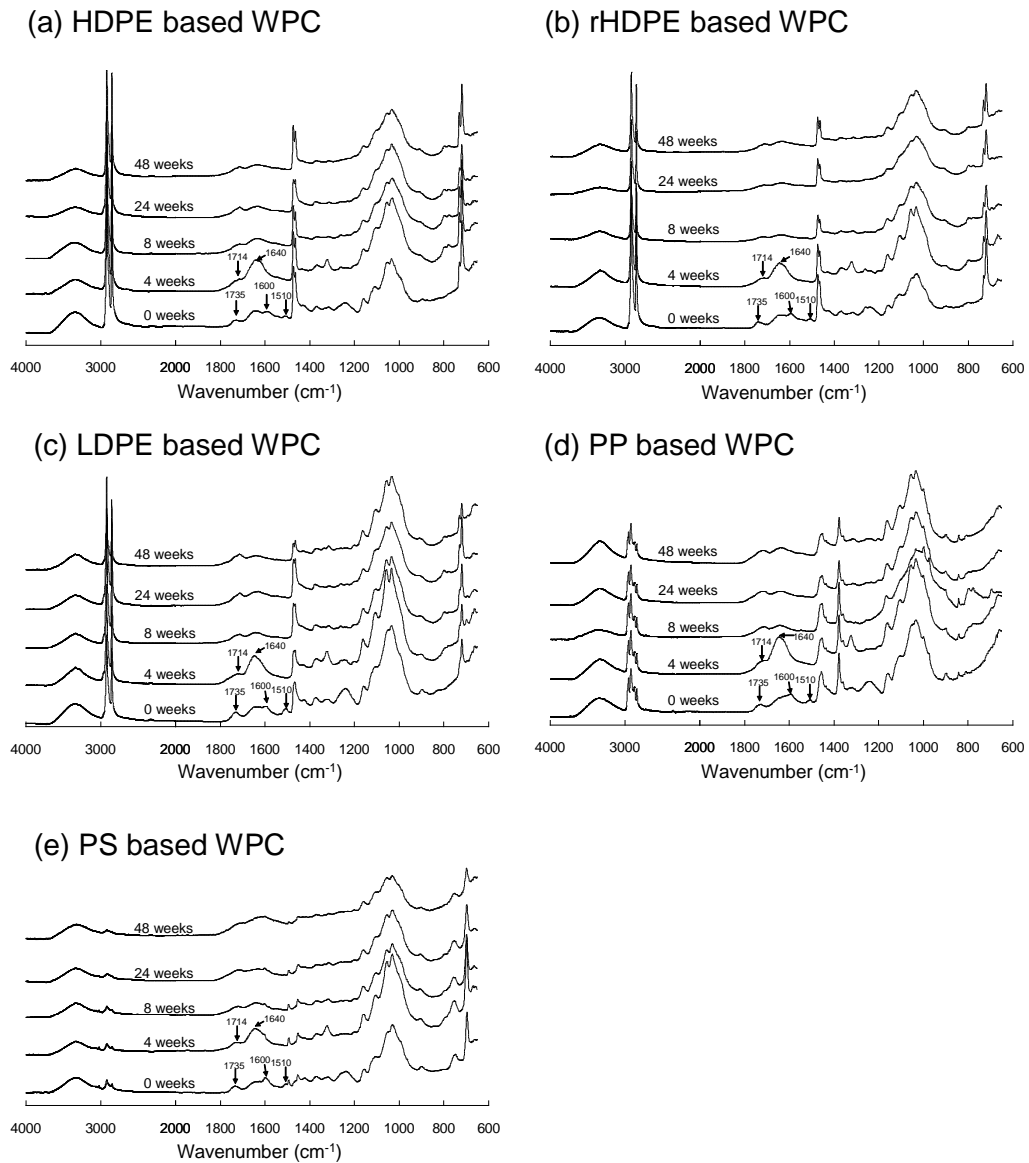


圖 3 不同塑膠基質 WPC 經 48 週戶外耐候試驗後之 ATR-FTIR 光譜

Fig. 3 ATR-FTIR spectra of various WPCs after outdoor weathering for 48 weeks.

1775、1740、1720、1690 及 1670 cm^{-1} (Lucki and Rånby, 1979)。由此可知，透過 FTIR 分析可以得知 WPC 經耐候試驗後表面化學組成之變化；換言之，透過官能基之吸收強度的消長，則可得知 WPC 表層物質之劣化情形。而由圖 4 中

WPC 表面羰基指數之變化可以發現，利用 HDPE 及 LDPE 所製備之 WPC，羰基指數變化量呈現先上升後下降之現象，其分別在耐候試驗第 14 及第 7 天時達到最高，之後則隨耐候時間增加而降低，且經 112 天之耐候試驗後，變化均趨於

平緩，而此現象與 Fabiyi 等人 (2008) 之試驗結果相似。另外，利用 rHDPE 所製備之 WPC 則具有與 HDPE 製備者相似之結果。至於 WPC 表面羰基含量下降之原因，推測係因為降解產物受到雨水淋洗作用所致。此外，以 PP 製備者其羰基指數增加之幅度較高，且在耐候試驗達 28 天時即達到最高，之後則趨於平緩；而造成此現象之原因，推測主要係此時羰基的生成速率與雨水淋洗作用達

到平衡所致。相對的，以 PS 製備者其羰基指數於耐候試驗初期僅些微增加，而當耐候試驗達 112 天時，羰基指數才有較大幅度的上升，且在試驗第 224 天時，羰基指數達到最高。綜合上述之試驗結果可以得知，塑膠種類會影響 WPC 表面之羰基指數，而導致此情形之原因，除不同塑膠基質具有不同之劣化型態外，雨水的淋洗作用亦可能是主要原因之一。

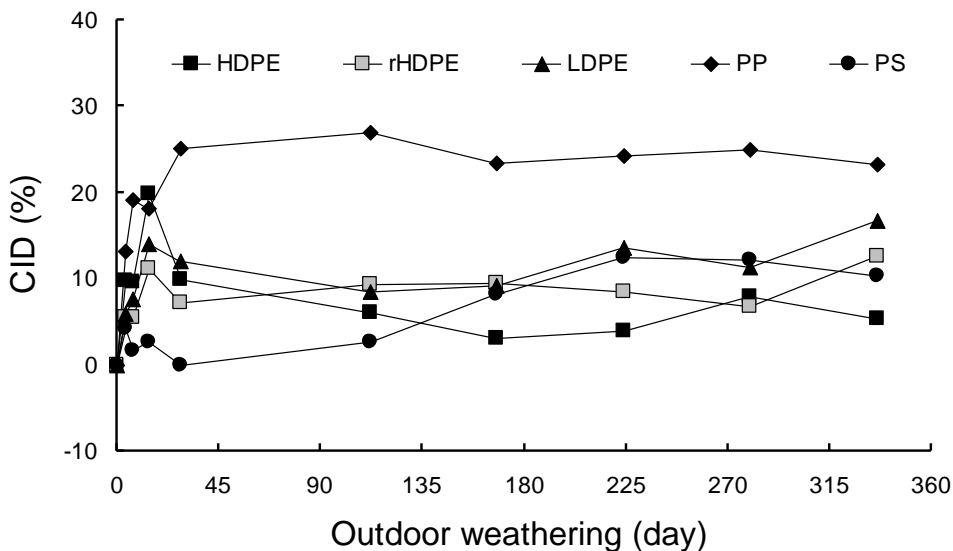


圖 4 不同塑膠基質 WPC 於 48 週戶外耐候試驗過程中羰基指數之變化

Fig. 4 Carbonyl index difference (CID) of various WPCs during 48 weeks of outdoor weathering.

IV、結論

近年來隨著科技及文明的進步，人們對於自然資源的需求量也隨之增加。相對的，也導致自然資源的過度開發，進而衍生出許多生態破壞及廢棄物等問題。而木材塑膠複合材 (WPC) 之開發與應用，即為有效利用自然資源及解決廢棄物問題之方法。然而，因 WPC 之耐候性質普遍不佳，影響其應用於戶外之使用性。因此，耐候性質已成為 WPC 相當重要的研究課題之一。而為了瞭解不同塑膠基質所製備之 WPC 其戶外耐候性質表現，本研究以 5 種塑膠基質為材料製備複

合材，且利用戶外耐候試驗方式評估 WPC 之耐候性。試驗結果得知，木材塑膠複合材經戶外耐候試驗後，除 PS 製備者表面呈現黃化外，其餘木材塑膠複合材均呈現灰白色。至於抗彎強度方面，以 HDPE、rHDPE 及 PP 所製備之木材塑膠複合材具有較佳之強度保留率；相對的，LDPE 及 PS 所製備者則較差。此外，因 WPC 中塑膠基質的降解產物於戶外耐候試驗期間受到雨水淋洗作用，導致 WPC 於戶外耐候試驗後， 1640 cm^{-1} 之乙烯基吸收峰會隨耐候時間增加而逐漸消失。另一方面，由 WPC 表面羰基指數之變化

則可以發現，以 PP 製備者，其羰基指數增加幅度最大，而利用 HDPE、rHDPE 及 LDPE 所製備之 WPC，羰基指數變化量則呈現先上升後下降之現象。

V、致謝

本研究感謝行政院農業委員會林務局予以經費補助 (100 農科-5.4.2-務-el)，使本試驗得以順利完成，特此致謝。

VI、參考文獻

1. 吳東霖、王贊鈞、李家皇、陳合進、陳載永、吳志鴻 (2008) 製程條件對木質粒片-塑膠複合材機械性質之影響。林產工業 27:13-24。
2. 吳東霖、陳載永、吳志鴻 (2011) 竹材加工廢料應用在生物可分解型塑膠複合材製備之研究。中華林學季刊 44:613-626。
3. 張懋如、吳東霖、洪克昌、陳載永、吳志鴻 (2009) 台灣二葉松木材-塑膠複合材之理學機械性質。林業研究季刊 31:65-74。
4. 陳合進、陳載永、徐俊雄、黃偉銘 (2003) 模壓式製造木材-HDPE 塑膠複合材戶外利用之接受性調查(I): 新安裝之設施的接受性。國立中興大學農林學報 52(4):11-20。
5. 陳載永、陳合進、F. A. Kamke (2002) 平壓式製造木材粒片-塑膠複合材之探討。木工家具 216:108-112。
6. 陳載永、陳合進、徐俊雄 (2000) 簡介木質纖維與塑膠混鍊製造生態複合材之方法介紹。木工家具 187:89-93。
7. Ashori, A. (2008) Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresour. Technol.* 99:4661-4667.
8. Chen, H.-C., T.-Y. Chen and C.-H. Hsu (2006) Effects of wood particle size and mixing ratios of HDPE on the properties of the composites. *Holz Roh Werkst.* 64:172-177.
9. Clemons, C. (2002) Wood-plastic composites in the United States: The interfacing of two industries. *Forest Prod. J.* 52(6):10-18.
10. Fabiyi, J. S., A. G. McDonald, M. P. Wolcott and P. R. Griffiths (2008) Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes. *Polym. Degrad. Stabil.* 93:1405-1414.
11. García, M., J. Hidalgo, I. Garmendia and J. García-Jaca (2009) Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. *Composites A* 40:1772-1776.
12. Hung, K.-C. and J.-H. Wu (2010) Mechanical and interfacial properties of plastic composite panels made from esterified bamboo particles. *J. Wood Sci.* 56:216-221.
13. Hung, K.-C., Y.-L. Chen and J.-H. Wu (2012) Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites. *Polym. Degrad. Stabil.* Accepted and in Press (DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.06.016).
14. Jiang, H. and P. Kamdem (2004) Development of poly(vinyl chloride)/wood composites. A literature review. *J. Vinyl Addit. Technol.* 10:59-69.
15. Kiguchi, M., Y. Kataoka, H. Matsunaga, K. Yamamoto and P. D. Evans (2007) Surface deterioration of wood-flour polypropylene composites by weathering trials. *J. Wood Sci.* 53:234-238.
16. Lee, C.-H., T.-L. Wu, Y.-L. Chen and J.-H. Wu (2010) Characteristics and discrimination of five types of wood-plastic composites by FTIR spectroscopy combined with principal component analysis. *Holzforschung* 64:699-704.
17. Li, R. (2000) Environmental degradation of wood-HDPE composite. *Polym. Degrad. Stabil.* 70:135-145.
18. Lucki, J. and B. Rånby (1979) Photo-oxidation of polystyrene-Part 2: Formation of carbonyl groups in photo-oxidation polystyrene. *Polym. Degrad. Stabil.* 1:1-16.
19. Ndiaye, D., E. Fanton, S. Morlat-Therias, L. Vidal, A. Tidjani and J. L. Gardette (2008) Durability of wood polymr composites: Part 1.

- Influence of wood on the photochemical properties. *Compos. Sci. Technol.* 68:2779–2784.
20. Ochi, S. (2006) Development of high strength biodegradable composites using Manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites A* 37:1879–1883.
 21. Seldén, R., B. Nyström and R. Långström (2004) UV aging of poly(propylene)/wood-fiber composites. *Polym. Compos.* 25:543–533.
 22. Stark, N. M. (2006) Effect of weathering cycle and manufacturing method on performance of wood flour and high density polyethylene composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 100:3131–3140.
 23. Stark, N. M. and L. M. Matuana (2004) Surface chemistry and mechanical property changes of wood-flour/high-density-polyethylene composites after accelerated weathering. *J. Appl. Polym. Sci.* 94:2263–2273.
 24. Stark, N. M., L. M. Matuana and C. M. Clemons (2004) Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 93:1021–1030.

