

行政院農業委員會林務局委託研究計畫系列 99-00-5-14

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

Potential application of bamboo residue for the manufacture of
biodegradable plastic composites



委託機關：行政院農業委員會林務局

執行機關：國立中興大學森林學系

中華民國 99 年 12 月

<研究團隊>

計畫主持人：國立中興大學森林學系 吳志鴻 副教授

計畫工作人員：

<u>機 關 名 稱</u>	<u>單 位 名 稱</u>	<u>研 究 人 員</u>	<u>職 稱</u>
國立中興大學	森林學系(所)	吳志鴻	副教授
國立中興大學	森林學系(所)	吳東霖	研究生
國立中興大學	森林學系(所)	陳永龍	研究生
國立中興大學	森林學系(所)	趙瑩瑩	研究生

目錄

目錄.....	1
一、中文摘要.....	2
二、英文摘要.....	2
三、計畫目的.....	3
四、重要工作項目及實施方法.....	4
(一) 重要工作項目.....	4
(二) 實施方法.....	5
五、結果與討論.....	8
(一) 竹材粒片尺寸對 BPPC 性質之影響.....	8
1. 竹材粒片尺寸對 BPPC 物理性質之影響.....	8
2. 竹材粒片尺寸對 BPPC 抗彎性質之影響.....	10
3. 竹材粒片尺寸對 BPPC 抗拉性質之影響.....	10
4. 竹材粒片尺寸對 BPPC 內聚強度之影響.....	11
5. 竹材粒片尺寸對 BPPC 熱性質之影響.....	12
(二) 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 性質之影響.....	14
1. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 物理性質之影響.....	14
2. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 抗彎性質之影響.....	15
3. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 抗拉性質之影響.....	16
4. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 內聚強度之影響.....	17
5. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 熱性質之影響.....	18
(三) 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 性質之影響.....	20
1. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 物理性質之影響.....	20
2. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 抗彎性質之影響.....	21
3. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 抗拉性質之影響.....	22
4. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 內聚強度之影響.....	23
5. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 熱性質之影響.....	24
六、結論.....	26
七、參考文獻.....	26
附件一（期中及期末簡報審查意見回覆表）.....	30

一、中文摘要

本研究利用桂竹加工廢料及聚乳酸製備生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材 (Bamboo particle-PLA composite, BPPC)，並測定其竹材粒片尺寸、竹材粒片混合比例及生物系潤滑劑含量對複合材各項物理機械性質之影響，以探討複合材最適化製備條件。試驗結果顯示，利用竹材粒片尺寸-6+16 mesh 所製備之 BPPC，具有最佳之抗彎強度及最小的吸水率。此外，於 PLA 基質中混合竹材粒片，可提升複合材抗拉彈性模數及其橡膠態區之儲存模數。而添加適量的生物系潤滑劑 (3-4 wt%) 則可增加複合材耐水性、尺寸安定性、內聚強度以及儲存模數。

【關鍵詞】竹材粒片聚乳酸複合材、生物可分解型、生物系潤滑劑、物理機械性質、儲存模數

二、英文摘要

In this study, Makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) residue and polylactic acid (PLA) were employed to manufacture biodegradable bamboo particle-PLA composite (BPPC). In order to obtain an optimal formula for composite processing, the physicomechanical properties of BPPC were determined as functions of bamboo particle size, bamboo particle content and bio-based lubricant content. Results demonstrated that the BPPC with bamboo particle of -6+16 mesh exhibited the strongest MOR and the lowest water absorption. In addition, the tensile modulus and storage modulus (rubbery plateau) were significantly improved when the PLA reinforced with bamboo particle. On the other hand, the water absorption resistance, dimensional stability, internal bond and storage modulus of BPPC could be increased by adding the bio-based lubricant at weight fraction of 3-4%.

【Key words】 Bamboo particle-PLA composite, Biodegradable, Bio-based lubricant, Physicomechanical property, Storage modulus

三、計畫目的

根據林務局第三次森林資源及土地利用調查資料，台灣林地面積為 2,102,400 公頃，占全島總面積 58.5%，其森林覆蓋率在全球主要國家居第八位，其中竹林面積更達 152,300 公頃，顯示台灣的竹材資源極為豐富。因此，竹材應用於國內民生用途之範圍甚廣，舉凡家具、編織、建築、造紙及工藝等均為其利用標的。另外，根據 1974 年台灣竹類資源調查資料，在所有竹類中經濟價值最高且栽種面積最廣者為麻竹，其次為桂竹、刺竹、綠竹、孟宗竹；其中，桂竹因材質優良且用途廣泛，而成為台灣竹類中最重要的竹材資源（葉英晉，2000）。然而，這些竹材在加工及製造過程中，往往會產生許多殘料，而此殘料一般多作為焚燒原料或任其腐朽，鮮少得到有計畫及有系統的回收與再利用，其不僅耗費寶貴的天然森林資源，更對環境造成莫大的衝擊。因此，為面對此重要之挑戰，國內許多專家學者曾著手進行竹材加工利用等相關研究，例如：竹材粒片板（陳載永，1981；陳載永、王瀛生 1981）、單板貼面竹材粒片板（王松永、黃問珖，1981；褚炳麟等，1984）、礦物性複合材（陳載永等，1999；徐俊雄等，1999）、竹筋補強混泥土（陳載永、薛秀輝，1985）、竹材保綠（張上鎮等，2002；吳志鴻等，2001；Wu *et al.*, 2002；Wu *et al.*, 2005）、竹材積層板（莊純合、蔡崑堉，2000；劉正字等，1994）以及人工造型竹（陳載永等，2003）等。

而近年來，木材塑膠複合材（Wood-plastic composite, WPC）的發展已漸趨完善，且應用領域亦十分廣泛，其主要原因乃因為這類複合材同時結合了木材和塑膠兩種材料的特性，因此可以相互的改善兩種材料各自之缺點。根據前人研究發現，於塑膠基質中混合木質纖維後，可以明顯的提升高分子材料之抗彎強度（Modulus of rupture, MOR）及抗彎彈性模數（Modulus of elasticity, MOE）（張懋如等，2009；Ochi, 2006），且所製備之複合材亦能改善木材的尺寸安定性、耐腐朽性，並增加高分子材料的挺性以及降低生產成本等（陳合進等，2003；陳載永等，2000；Chen *et al.*, 2006；Saheb and Jog, 1999）。目前，這類製品已廣泛應用於地板、

壁板、天花板、籬笆、戶外用鋪板、戶外用椅及路標等產品，且其用量有逐年上昇之趨勢（陳載永等，2002）。另外，聚乳酸（Polylactic acid, PLA）屬於天然聚酯類高分子，可從天然玉米澱粉中發酵聚合而成，係天然可更新資源，同時並具有生物可分解性及生物吸收性（Gutierrez-Villarreal *et al.*, 2008），因此若作為複合材料的基質，將可增加材料的生物分解性能。另一方面，以生物可分解型之塑膠取代目前化石工業所生產之熱塑性塑膠時，其所製備之複合材除具有優異之物理與機械性質之外，於材料生命週期終了時，亦期能藉由回收再利用或天然的生物分解方式，降低其對環境所造成之危害。然而，目前以竹材加工廢料製備生物可分解型塑膠複合材尚缺乏相關之研究。因此，本試驗以生物可分解型塑膠（聚乳酸）取代目前常見之石油系熱塑性塑膠，除評估生物可分解型塑膠應用於竹材粒片聚乳酸複合材（Bamboo particle-PLA composite, BPPC）製備之可行性外，並針對複合材之各項物理性質及機械性質進行系統性的評估與研究，以期獲得最適化生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材之製備條件。

四、重要工作項目及實施方法

（一）重要工作項目

1. 完成不同竹材粒片尺寸製備生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材，並進行複合材之物理、機械性質及熱性質檢測。
2. 完成不同竹材粒片含量製備生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材，並進行複合材之物理、機械性質及熱性質檢測。
3. 完成不同生物系潤滑劑添加量製備生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材，並進行複合材之物理、機械性質及熱性質檢測。
4. 綜合上述複合材各項性質分析，以獲得最適化生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材之研製條件。

(二) 實施方法

1. 試驗材料

(1) 竹材加工廢料

本試驗所用之試材，取自南投縣竹山地區竹材加工廠之桂竹 (*Phyllostachys makinoi*) 刨屑。經磨切機製成粒片後，隨即將所製得之桂竹粒片置入 70°C 烘箱中乾燥 24 h 後，續以震動篩分機將桂竹粒片分為粒徑 -6+16、-16+24、-24+30 以及 -30+60 mesh 共四部分，之後將原料以塑膠袋密封備用。

(2) 生物可分解型塑膠材料

本試驗所使用之生物可分解型塑膠材料為聚乳酸 (Polylactic acid, PLA; 型號: NCP0001; 偉盟工業股份有限公司)。將 PLA 顆粒以圓盤式磨粉機進行磨粉處理後，利用篩分機篩分通過 20 mesh 網篩之 PLA 粉末，以供後續複合材製備之用。

(3) 生物系潤滑劑 (Bio-based lubricant)

本試驗所使用之生物系潤滑劑為大豆油。試驗時，藉由潤滑劑將粒片均勻分散於 PLA 基質中，以形成均質複合材板坯。

2. 生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材之製備

本試驗所製備之生物可分解型竹材粒片聚乳酸複合材，主要分為不同竹材粒片尺寸 (-6+16、-16+24、-24+30 及 -30+60 mesh)、不同竹材粒片/PLA 混合比 (竹材粒片/PLA 在複合材中之混合比分別為 0/100、20/80、30/70、40/60、50/50、60/40、70/30 及 80/20 wt%) 及不同生物系潤滑劑添加量 (相對於竹材粒片絕乾重之 1、2、4 及 8 wt%) 三部分，而複合材製備之預設密度為 0.9 g/cm³，成板尺寸為 300 mm (長) × 200 mm (寬) × 4 mm (厚)。依上述試驗所需重量之絕乾竹材粒片、聚乳酸及潤滑劑，將其置於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，熱壓溫度為 180°C，於壓力 4.5 MPa 下進行熱壓。當板坯中心溫度達 165°C 時，再將板坯置於冷壓機中進行冷卻，使板坯中心溫度冷卻至 40°C 以完成複合材之製備。之後，將 BPPC 置於 23°C、50% RH 之恆溫恆濕室中調濕 7 天，以供後續各項性質分析。

3. 性質分析

(1) 密度 (Density)

依 ASTM D 2395-07a 之檢測標準，將試材裁切成適當之試片，並置於 23 ± 2°C、50 ± 5% RH 之恆溫恆濕室中調整至恆重，測量試片之長度、寬度及厚度，並換算其體積 (V, cm^3)，測定其質量 (m_1, g)，並依此計算試片密度。

$$\text{密度 (g/cm}^3\text{)} = \frac{m_1}{V}$$

(2) 含水率 (Moisture content)

依 ASTM D 4442-07 之檢測標準，將試材裁切成適當之試片，置於 23 ± 2°C、50 ± 5% RH 之環境調整至恆重，測定試片之質量 (m_1, g)。接著將其置入 105°C 之烘箱內乾燥至恆重，測定其乾燥後之絕乾質量 (m_0, g)，並計算試片含水率。

$$\text{含水率 (\%)} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

(3) 吸水率及吸水厚度膨脹率 (Water absorption and thickness swelling)

依 ASTM D 1037-06a 之檢測標準，將試材裁切成適當之試片，置於 23 ± 2°C、50 ± 5% RH 之環境調整至恆重，測量試材之重量、寬度、長度、厚度。試材水平置入 20 ± 1°C 之蒸餾水中，置入深度為距水面下 25 mm，試驗時間分別為 2 h 及 24 h。測定試材吸水後之重量及厚度後，並依此計算試片之吸水率及吸水厚度膨脹率。

$$\text{吸水率 (\%)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

$$\text{吸水厚度膨脹率 (\%)} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100$$

式中， m_1 ：試片吸水前質量 (g)； m_2 ：試片吸水後質量 (g)； t_1 ：試片吸水前厚度 (mm)； t_2 ：試片吸水後厚度 (mm)。

(4) 抗彎強度 (MOR) 與抗彎彈性模數 (MOE)

依 ASTM D 790-07 之檢測標準，將試材裁切成 80 mm × 16 mm × 4 mm 之試片後，置於 23 ± 2°C、50 ± 5% RH 之環境調整 40 h 以上，測量試片之長度、寬度、厚度及重量。之後，以 64 mm 之載重跨距及載重速度 1.7 mm/min 進行檢測，紀錄試片之最大載重值及其經時載重與變形量，並依此計算試片之抗彎強度及抗彎彈性模數。

$$\text{MOR (N/mm}^2, \text{MPa)} = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2}$$

$$\text{MOE (N/mm}^2, \text{MPa)} = \frac{\Delta P \times L^3}{4 \times \Delta Y \times b \times h^3}$$

式中， P ：最大載重 (N)； L ：跨距 (mm)； b ：試片寬度 (mm)； h ：試片厚度 (mm)； ΔP ：比例限界內單位變形量下的應力 (N)； ΔY ： ΔP 相對之跨距中央之彎曲變形量 (mm)。

(5) 抗拉強度 (Tensile strength) 與抗拉彈性模數 (Tensile modulus)

依 ASTM D 638-08 之檢測標準，將試材裁切成 165 mm × 19 mm × 4 mm 之啞鈴型試片 (Type I) 後，置於 23 ± 2°C、50 ± 5% RH 之環境調整 40 h 以上，測量試片之寬度及厚度。之後，以載重速度 5 mm/min 進行檢測，紀錄試片之最大載重值及其經時載重與變形量，並依此計算試片之抗拉強度及抗拉彈性模數。

(6) 內聚強度 (Internal bond)

本試驗參考 CNS 2215 粒片板之檢測標準，將試材裁切成 50 mm × 50 mm × 12 mm 之試片，並置於 20°C、65% RH 之恆溫恆濕室中調濕 7 天後，在鋼製鈎板膠合上試片。以垂直板面 2 mm/min 之速度施加拉伸荷重，測定剝離破壞時之最大載重，並依此計算內聚強度。

$$\text{內聚強度 (N/mm}^2\text{)} = P/(b \times L)$$

式中，P：剝離破壞時之最大載重 (N)；b：試片寬度 (mm)；L：試片長度 (mm)。

(7) 動態機械性質分析 (Dynamic mechanical analysis, DMA)

將試材置於升溫速率為 2 °C/min、頻率為 1 Hz 及溫度範圍為 0–160°C 之條件下，測試生物可分解型竹材塑膠複合材的動態機械性質，以探討各複合材於不同溫度下之熱性質變化。

4. 統計分析

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

五、結果與討論

(一) 竹材粒片尺寸對 BPPC 性質之影響

1. 竹材粒片尺寸對 BPPC 物理性質之影響

為了探討竹材粒片尺寸對 BPPC 性質之影響，本試驗利用 -6+16、-16+24、-24+30 及 -30+60 mesh 共 4 種粒片尺寸，並以 50/50 (wt%) 之竹材粒片與 PLA 混合比製備 BPPC。表 1 為竹材粒片尺寸對 BPPC 物理性質之影響，表中結果顯示，竹材粒片尺寸對複合材密度並無顯著影響，其密度均介於 0.97–1.02 g/cm³ 之間，因此於

後續機械性質之比較上，可忽略密度對其性質之影響。而在含水率性質方面，4種不同竹材粒片尺寸所製備之 BPPC，除了-16+24 mesh 及-30+60 mesh 之間有顯著差異外，其他各組間無顯著差異，其含水率介於 3.0–3.8%之間。此外，本試驗將 BPPC 浸水 2 h 及 24 h 後，測定其吸水率及吸水厚度膨脹率，藉此評估 BPPC 之耐水性及尺寸安定性。由表 1 可以發現，在 BPPC 之 2 h 吸水率方面，由小到大依序為-6+16 mesh (2.2%)、-16+24 mesh (6.5%)、-24+30 mesh (9.0%) 及-30+60 mesh (10.7%)。同樣地，24 h 吸水率亦有相同趨勢，顯示隨著竹材粒片尺寸的減小，BPPC 之吸水率則有隨之增加之趨勢。而 WPC 之吸水性質除易受木材纖維中的細孔 (Fine pores)、細胞腔 (Lumens) 及羥基 (Hydroxyl group) 數量之多寡等影響外，其他如木質材料與塑膠間界面的不相容性，易導致其界面間產生許多的裂縫 (Flaws) 或缺口 (Gapes)，使得水分子可透過毛細管 (Capillary) 作用滲透到 WPC 之內部 (Adhikary *et al.*, 2008; Espert *et al.*, 2004)。因此，造成竹材粒片尺寸較小之 BPPC 具有較高吸水率之原因，推測主要是因為隨著竹材粒片尺寸的減小，其竹材之表面積及裸露之羥基數則隨之增加，提高了複合材與水分子接觸之機會，故導致 BPPC 的吸水率隨之上升。然而，在 BPPC 之 2 h 及 24 h 吸水厚度膨脹率方面，竹材粒片尺寸大小對 BPPC 之吸水厚度膨脹率並無顯著之影響，此一結果與張懋如等人 (2009) 以不同台灣二葉松粒片尺寸製備複合材之試驗結果相似。

表 1 竹材粒片尺寸對 BPPC 物理性質之影響

Table 1 Effects of bamboo particle size on physical properties of BPPC

Particle size (mesh)	Density (g/cm ³)	Moisture content (%)	Effects of 2 h soaking		Effects of 24 h soaking	
			Water	Thickness	Water	Thickness
			absorption (%)	swelling (%)	absorption (%)	swelling (%)
-6+16	0.99 ± 0.02 ^a	3.3 ± 0.4 ^{ab}	2.2 ± 0.6 ^b	3.0 ± 0.8 ^a	7.5 ± 1.4 ^c	4.5 ± 1.0 ^a
-16+24	1.02 ± 0.06 ^a	3.0 ± 0.2 ^b	6.5 ± 2.9 ^{ab}	3.9 ± 1.2 ^a	9.3 ± 2.8 ^{bc}	5.0 ± 1.0 ^a
-24+30	1.00 ± 0.04 ^a	3.4 ± 0.2 ^{ab}	9.0 ± 2.5 ^a	3.9 ± 0.4 ^a	12.5 ± 2.8 ^{ab}	4.8 ± 0.6 ^a
-30+60	0.97 ± 0.03 ^a	3.8 ± 0.1 ^a	10.7 ± 3.0 ^a	3.1 ± 0.6 ^a	15.2 ± 2.8 ^a	4.7 ± 0.4 ^a

The content of bamboo particle within BPPC is 50 wt%. Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant difference ($p < 0.05$).

2. 竹材粒片尺寸對 BPPC 抗彎性質之影響

抗彎強度 (MOR) 與抗彎彈性模數 (MOE) 為評估複合材料機械性質之重要指標之一。由圖 1 可以發現，以不同竹材粒片尺寸所製備之 BPPC，除 -6+16 mesh 具有較高之 MOR (38.7 MPa) 之外，其餘各組間並無顯著差異 (各組之值約在 28 MPa 左右)。而在 MOE 方面，各組間亦無統計上差異，其值約在 2.7 GPa 左右。綜合上述結果得知，竹材粒片尺寸為 -6+16 mesh 時，其所製備之 BPPC，具有較佳之抗彎性質。

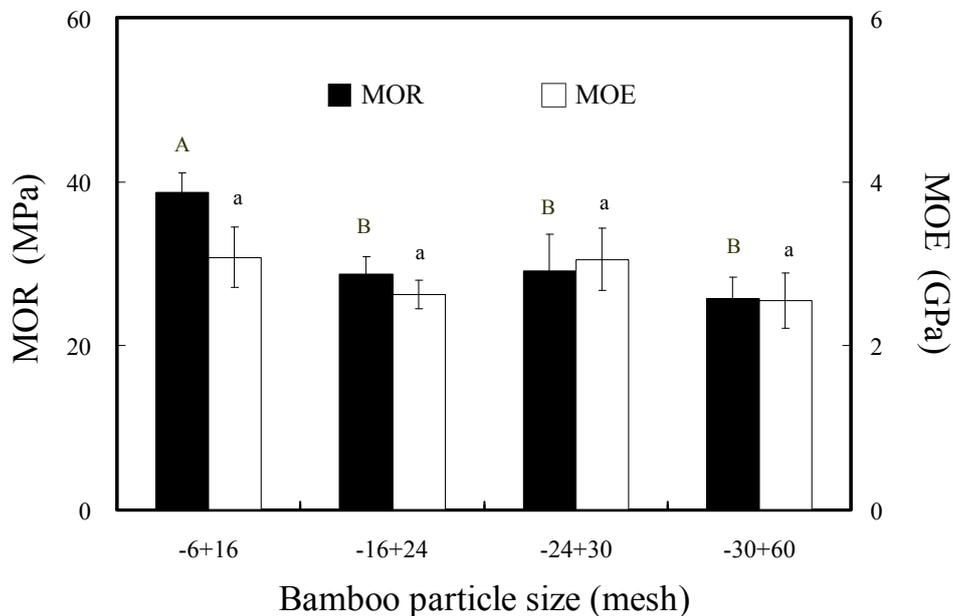


圖 1 竹材粒片尺寸對 BPPC 抗彎性質之影響。

Fig. 1 Effects of bamboo particle size on MOR and MOE of BPPC. The content of bamboo particle within BPPC is 50 wt%. Values are mean \pm SD ($n = 5$). Different letters indicate significant difference among groups ($p < 0.05$).

3. 竹材粒片尺寸對 BPPC 抗拉性質之影響

表 2 為竹材粒片尺寸對 BPPC 抗拉性質之影響，由表中可以發現，4 種粒片尺寸中以 -6+16 mesh 所製備之 BPPC 其抗拉強度最大 (23.0 MPa)，而隨著竹材粒片尺寸減小，其抗拉強度則隨之下降。至於在抗拉彈性模數方面，則呈現相類似趨

勢，各組之間仍以-30+60 mesh 所製備 BPPC 之抗拉彈性模數最小 (2.5 GPa)。另外，在破壞伸長率方面，不同竹材粒片尺寸所製備之 BPPC 其各組間之破壞伸長率並無明顯差異。綜合上述結果得知，竹材粒片尺寸為-6+16 mesh 時，其所製備之 BPPC 具有較佳之抗拉性質。

表 2 竹材粒片尺寸對 BPPC 抗拉性質之影響

Table 2 Effects of bamboo particle size on tensile properties of BPPC

Bamboo particle size (mesh)	Tensile properties		
	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
-6+16	23.0 ± 2.6 ^a	3.3 ± 0.1 ^a	0.9 ± 0.1 ^a
-16+24	20.1 ± 6.1 ^{ab}	3.4 ± 0.4 ^a	0.8 ± 0.1 ^a
-24+30	16.8 ± 3.8 ^{ab}	2.9 ± 0.4 ^{ab}	0.8 ± 0.1 ^a
-30+60	14.7 ± 2.6 ^b	2.5 ± 0.3 ^b	0.8 ± 0.1 ^a

The content of bamboo particle within BPPC is 50 wt%. Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant difference ($p < 0.05$).

4. 竹材粒片尺寸對 BPPC 內聚強度之影響

內聚強度為評估複合材之機械性質重要指標之一，通常可作為複合板材內部膠合性質及兩材料間界面性質優劣之依據 (Lin *et al.*, 2002)。因此，透過複合材之內聚強度可初步判斷複合材內部材料之界面性質或膠合性質；較佳之界面性質即可反應出較高之內聚強度。由圖 2 之結果可以得知，竹材粒片尺寸為-6+16、-16+24、-24+30 及-30+60 mesh 時，其內聚強度則分別為 0.9、0.8、0.8 及 0.4 MPa (各組均達 CNS 2215 素面粒片板 18 型之規範 0.3 MPa 以上)。此結果顯示，BPPC 以較大竹材粒片尺寸 (-6+16、-16+24 及-24+30 mesh) 製備者，具有較高之內聚強度；相對的，當粒片尺寸小於 30 mesh 的篩網孔徑時，其內聚強度則會大幅降低。而造成 BPPC 內聚強度降低之原因，主要係在相同竹材與 PLA 混合比下，竹材粒片尺寸較小者，具有較多的表面積，使複合材之膠合界面增加，因此部分竹材粒

片將無法被塑膠分子完整包覆，進而導致複合材內聚強度減小。

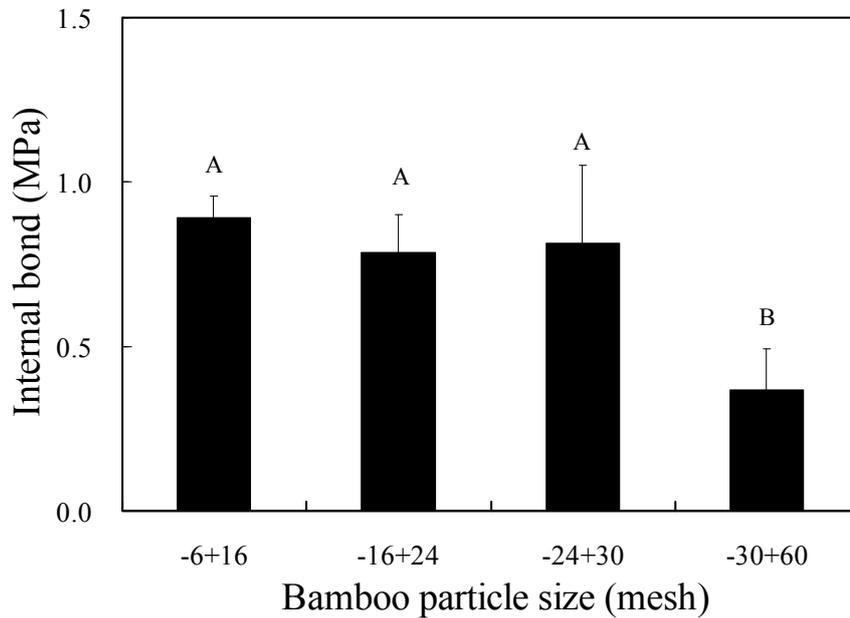


圖 2 竹材粒片尺寸對 BPPC 內聚強度之影響。

Fig. 2 Effects of bamboo particle size on internal bond of BPPC. The content of bamboo particle within BPPC is 50 wt%. Values are mean \pm SD ($n = 5$). Different letters indicate significant difference among groups ($p < 0.05$).

5. 竹材粒片尺寸對 BPPC 熱性質之影響

本研究以 DMA 評估各複合材於不同溫度下之儲存模數 (Storage modulus) 及損失正切 (Loss tangent, $\tan \delta$)。由圖 3A 之結果可以發現，BPPC 於玻璃態區 (0–60°C) 時之儲存模數遠高於橡膠態區 (60–160°C)。以竹材粒片尺寸 -6+16 mesh 所製備之 BPPC 為例，其在室溫 (25°C) 時之儲存模數為 2.6 GPa，然而當溫度提高至 90°C 時，其儲存模數則大幅下降至 0.2 GPa。此原因主要是當溫度超過 PLA 之玻璃轉移溫度 (Glass transition temperature, T_g) (實測值約 68°C) 時，PLA 分子隨著溫度升高而增加分子的移動性 (Kim *et al.*, 2006)，使得 BPPC 儲存模數隨之下降。

另一方面，由圖 3A 中亦可以發現，以竹材粒片尺寸-16+24 mesh 所製備之 BPPC，其儲存模數均較其他複合材者大。相對的，以竹材粒片尺寸為-24+30 mesh 及-30+60 mesh 所製備 BPPC，其儲存模數最小，於室溫（25°C）時，-16+24 mesh 所製備 BPPC 之儲存模數約為-24+30 或-30+60 mesh 所製備者的 1.3 倍。此外，由圖 3B 中可以發現，不同竹材粒片尺寸所製備之 BPPC，其 T_g 均約為 68°C，各組間並無明顯之差異。

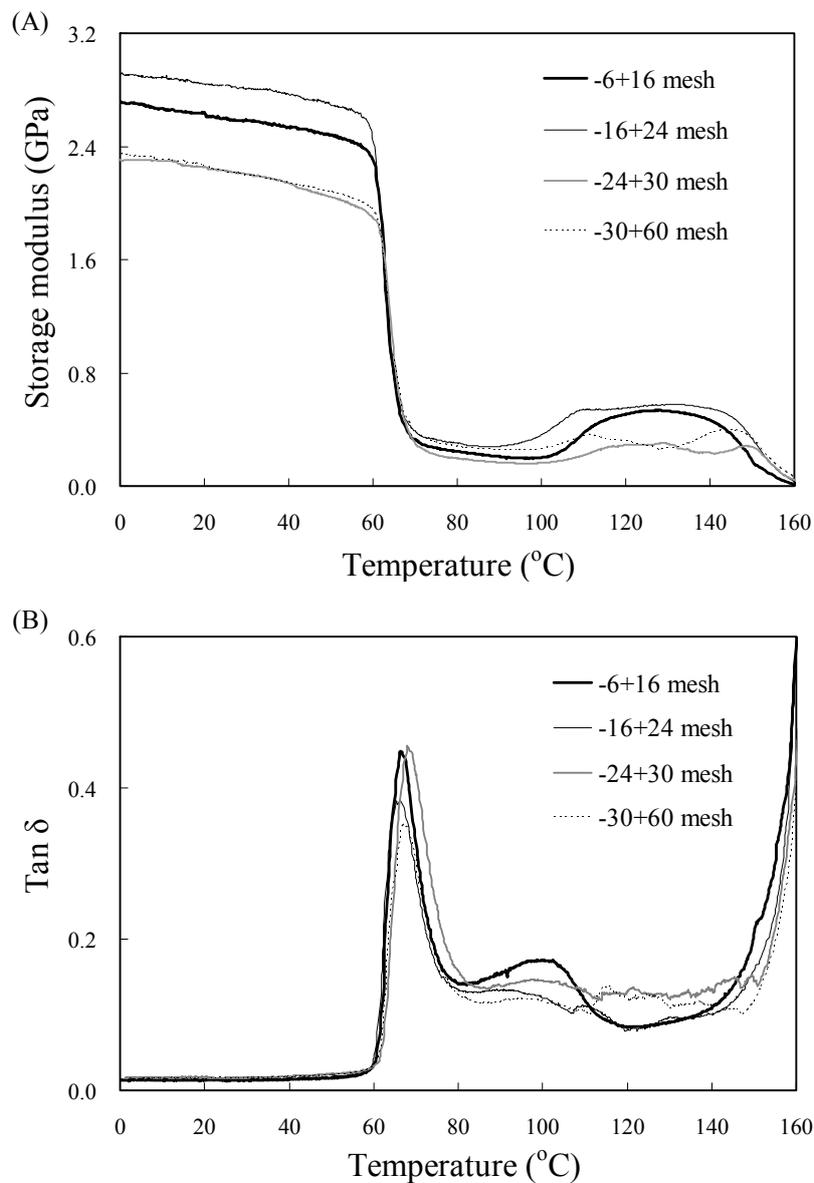


圖 3 竹材粒片尺寸對 BPPC 儲存模數 (A) 及 $\text{Tan } \delta$ (B) 之影響。

Fig. 3 Effects of bamboo particle size on storage modulus (A) and $\text{Tan } \delta$ (B) of BPPC. The content of bamboo particle within BPPC is 50 wt%.

(二) 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 性質之影響

1. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 物理性質之影響

表 3 為不同竹材粒片含量製備之 BPPC 物理性質，由表中可以得知，隨竹材粒片含量之增加，BPPC 之密度雖略呈下降之趨勢(各組密度值介於 0.95–1.07 g/cm³ 之間)，但對於竹材粒片含量為 30–80 wt%之複合材而言，則不具統計上差異。而在含水率方面，隨著竹材混合比例的增加，BPPC 之含水率有隨之上升趨勢。而造成此現象之原因主要是因為竹材為親水性物質，因此當竹材粒片混合比例增加時，BPPC 之含水率則會隨之上升。而此結果與張懋如等人 (2009) 及 Chen 等人 (2006) 之試驗結果相似，均顯示 WPC 之含水率會隨著木材混合比例增加而增加。另外，由表 3 中 BPPC 之 2 h 及 24 h 吸水率性質可以得知，當竹材含量為 20–80 wt% 時，BPPC 之吸水率會隨著竹材含量增加而有隨之上升趨勢，其 2 h 及 24 h 吸水率分別介於 1.1–29.4% 及 3.2–35.3%。而此原因與含水率相同，主要是因為竹材屬於一親水性物質，因此當 BPPC 中竹材含量增加時，其吸水之情形則會變的更加顯著。此外，在吸水厚度膨脹率方面亦與吸水率呈現相似之結果，當竹材含量為 20–80 wt% 時，BPPC 之吸水厚度膨脹率均隨著竹材含量增加而隨之上升，於 2 h 及 24 h 吸水後，其厚度膨脹率分別為 0.4–17.1% 及 0.9–19.0%。而此一趨勢與 Adhikary 等人 (2008) 分析 WPC 性質所得之結果相似，均顯示隨著木材含量增加，WPC 之吸水率及吸水厚度膨脹率隨之上升。然而，當 BPPC 中竹材含量超過 70 wt% 時，其吸水率及吸水厚度膨脹率，除了受到竹材與 PLA 混合比之影響外，PLA 對竹材包覆的完整性亦為一重要影響因子。一般而言，當 BPPC 中竹材含量低於 70 wt% 時，PLA 分子對於竹材粒片具有較佳的包覆效果(其吸水厚度膨脹率均小於 12%，符合 CNS 2215 素面粒片板之標準)，顯示其可有效的阻礙木材與水分接觸之機會，致使 BPPC 具有較佳抗吸水性及尺寸安定性。

表 3 竹材粒片含量對 BPPC 物理性質之影響

Table 3 Effects of bamboo particle content on physical properties of BPPC

Bamboo particle content (wt%)	Density (g/cm ³)	Moisture content (%)	Effects of 2 h soaking		Effects of 24 h soaking	
			Water	Thickness	Water	Thickness
			absorption (%)	swelling (%)	absorption (%)	swelling (%)
0	1.07 ± 0.07 ^a	0.4 ± 0.2 ^g	0.0 ± 0.1 ^e	0.4 ± 0.1 ^e	0.3 ± 0.2 ^f	0.3 ± 0.2 ^f
20	1.06 ± 0.05 ^{ab}	1.7 ± 0.1 ^f	1.1 ± 0.3 ^e	0.4 ± 0.1 ^e	3.2 ± 0.7 ^{ef}	0.9 ± 0.3 ^f
30	1.01 ± 0.03 ^{abc}	2.3 ± 0.0 ^{ef}	4.7 ± 1.1 ^{de}	0.7 ± 0.4 ^e	8.5 ± 1.0 ^{de}	1.4 ± 0.3 ^{ef}
40	0.99 ± 0.03 ^{bc}	3.1 ± 0.1 ^{df}	6.2 ± 2.3 ^{de}	1.2 ± 0.3 ^e	11.6 ± 2.2 ^d	3.3 ± 0.8 ^{de}
50	0.97 ± 0.03 ^c	3.8 ± 0.1 ^{cd}	10.7 ± 3.0 ^{cd}	3.1 ± 0.6 ^d	15.2 ± 2.8 ^{cd}	4.7 ± 0.4 ^d
60	0.95 ± 0.05 ^c	4.5 ± 0.3 ^{bc}	16.8 ± 5.1 ^{bc}	5.6 ± 1.1 ^c	21.6 ± 4.8 ^{bc}	6.8 ± 0.4 ^c
70	0.95 ± 0.03 ^c	5.0 ± 0.3 ^{ab}	20.1 ± 2.0 ^b	9.4 ± 0.7 ^b	23.1 ± 4.5 ^b	10.4 ± 1.5 ^b
80	0.95 ± 0.02 ^c	5.3 ± 0.5 ^a	29.4 ± 2.0 ^a	17.1 ± 1.1 ^a	35.3 ± 2.3 ^a	19.0 ± 0.9 ^a

The size of bamboo particle within BPPC is -30+60 mesh. Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant difference ($p < 0.05$).

2. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 抗彎性質之影響

竹材與 PLA 混合比對 BPPC 抗彎性質之影響如圖 4 所示，由圖中可以得知，當竹材含量由 0 wt% 增加至 80 wt% 時，BPPC 之 MOR 則由原先之 72.1 MPa 下降至 10.0 MPa；顯示，BPPC 之 MOR 值會隨竹材粒片含量之增加而下降。而此一趨勢與 Hung 與 Wu (2010)、Chen 等人 (2006) 及 Verhey 等人 (2001) 分析木材塑膠複合材所得之試驗結果相似。而造成此現象之原因，推測主要是因為當竹材混合比例增加時，木質纖維間易因氫鍵作用而聚集一起，除導致材料分散性不佳，使應力無法有效於 PLA 與竹材間傳遞 (Adhikary *et al.*, 2008) 之外，PLA 亦無法完全包覆竹材粒片，致使竹材粒片與 PLA 間之界面缺陷明顯增加，而導致 BPPC 之抗彎性質降低。

此外，由圖 4 亦可以發現，竹材粒片含量為 0–60 wt% 時，其各組複合材 MOE 之間並無統計上差異。因此複合材製備時，選用竹材粒片含量為 60 wt% 者，除具有良好之抗彎性質外，亦同時兼具有木質材料利用之優點。然而，當竹材粒片含

量提高至 70 wt% 或 80 wt% 時，其 MOE 則呈現大幅下降。由上述結果顯示，竹材本身具高韌性及挺性之特點，適量的混合竹材粒片可有效提升 BPPC 之 MOE；但當竹材粒片混合比過量時，反而使 PLA 無法完全包覆竹材粒片並增加複合材內部孔隙，進而導致複合材 MOE 的降低 (Luo and Netravali, 1999)。

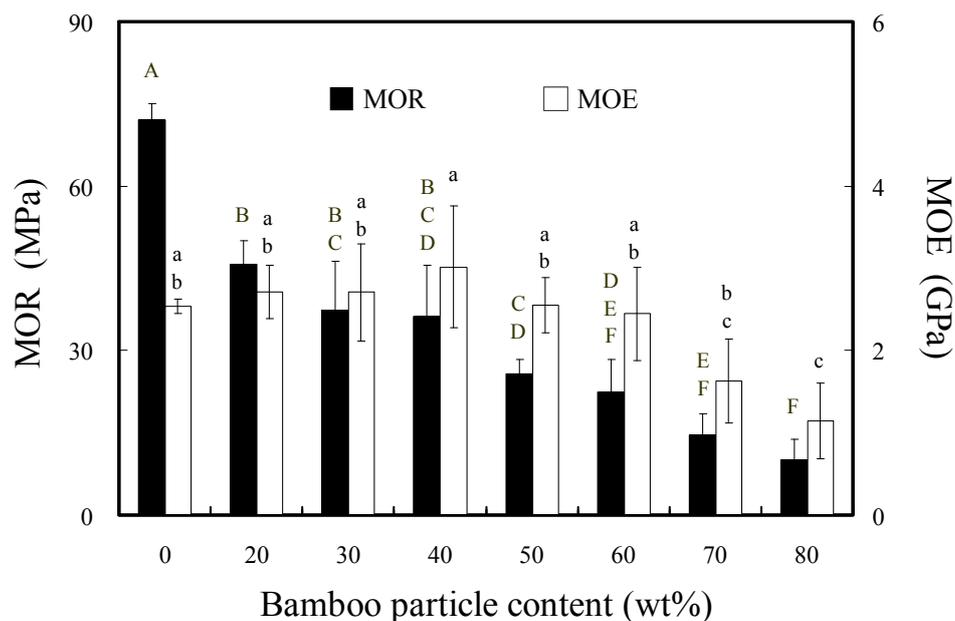


圖 4 竹材粒片含量對 BPPC 抗彎性質之影響。

Fig. 4 Effects of bamboo particle content on MOR and MOE of BPPC. The size of bamboo particle within BPPC is -30+60 mesh. Values are mean \pm SD ($n = 5$). Different letters indicate significant difference among groups ($p < 0.05$).

3. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 抗拉性質之影響

表 4 為竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 抗拉性質之影響，由表中可以得知，當竹材粒片含量由 0 wt% 增加至 80 wt% 時，BPPC 之抗拉強度則由原先之 35.6 MPa 下降至 12.1 MPa；顯示，BPPC 之抗拉強度隨竹材粒片混合比之增加而下降。而此一趨勢與 Lee 與 Wang (2006) 分析竹材塑膠複合材所得之試驗結果相似。而造成此現象之原因，與 MOR 相似，主要係當竹材混合比增加時，會使竹材粒片與 PLA 間之界面缺陷明顯增加，導致 BPPC 之抗拉性質降低。

此外，由表 4 亦可以發現，當竹材粒片含量由 0 wt% 增加至 80 wt% 時，BPPC 之抗拉彈性模數則由原先之 2.2 GPa 上升至 3.1 GPa。由此結果顯示，適量的混合竹材粒片可有效提升 BPPC 之抗拉彈性模數。另外，在破壞伸長率方面，當竹材粒片含量由 0 wt% 增加至 80 wt% 時，BPPC 之破壞伸長率則由 2.7% 下降至 0.7%。顯示，於 PLA 中混合竹材粒片會改變 PLA 之黏彈性 (Viscoelastic behavior)，使之較不具延展性 (Ductility)，進而使 BPPC 破壞伸長率降低。

表 4 竹材粒片含量對 BPPC 抗拉性質之影響

Table 4 Effects of bamboo particle content on tensile properties of BPPC

Bamboo particle content (wt%)	Tensile properties		
	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
0	35.6 ± 5.9 ^a	2.2 ± 0.2 ^b	2.7 ± 0.5 ^a
20	29.8 ± 3.2 ^a	2.9 ± 0.3 ^a	1.5 ± 0.1 ^b
30	21.5 ± 2.0 ^b	2.8 ± 0.2 ^{ab}	1.1 ± 0.1 ^{bc}
40	19.2 ± 2.1 ^{bc}	2.7 ± 0.2 ^{ab}	1.0 ± 0.0 ^{bc}
50	14.7 ± 2.6 ^{bc}	2.5 ± 0.3 ^{ab}	0.8 ± 0.1 ^c
60	13.2 ± 2.1 ^c	2.7 ± 0.2 ^{ab}	0.7 ± 0.1 ^c
70	13.1 ± 1.8 ^c	2.8 ± 0.2 ^a	0.7 ± 0.0 ^c
80	12.1 ± 0.6 ^c	3.1 ± 0.1 ^a	0.7 ± 0.1 ^c

The size of bamboo particle within BPPC is -30+60 mesh. Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant difference ($p < 0.05$).

4. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 內聚強度之影響

圖 5 為 BPPC 之內聚強度，由圖中可以得知，當竹材粒片含量為 20、30、40、50、60、70 及 80 wt% 時，其強度值則分別為 2.5、2.3、1.6、0.4、0.3、0.3 及 0.1 MPa。此結果顯示，隨著竹材粒片混合比的增加，BPPC 之內聚強度會隨之下降，但其中除以竹材粒片含量為 80 wt% 所製備之 BPPC 外，各組仍達 CNS 2215 素面粒片板 18 型之規範 (0.3 MPa 以上)。而造成上述 BPPC 內聚強度下降之原因，推測與抗

彎性質下降原因相同，主要係因為竹材粒片混合比例增加時，竹材粒片易因纖維與纖維間之氫鍵作用而凝聚在一起，無法均勻分散於 BPPC 中。因此在試驗時，應力較易集中這些竹材粒片凝聚的地方，進而導致 BPPC 產生破壞。此外，PLA 混合比例不足，使竹材粒片無法有效地被包覆，亦是造成 BPPC 內聚強度下降的原因之一。

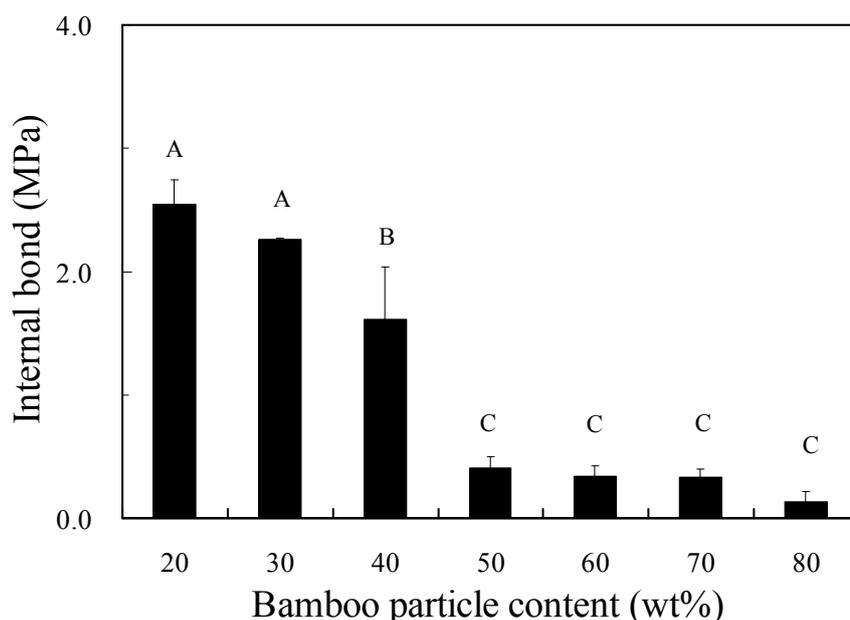


圖 5 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 內聚強度之影響。

Fig. 5 Effects of bamboo particle content on internal bond of BPPC. The size of bamboo particle within BPPC is -30+60 mesh. Values are mean \pm SD ($n = 5$). Different letters indicate significant difference among groups ($p < 0.05$).

5. 竹材粒片與 PLA 混合比對 BPPC 熱性質之影響

不同竹材粒片與 PLA 混合比所製備之 BPPC，其儲存模數如圖 6A 所示。由圖中可以發現，BPPC 於玻璃態區（0–60°C）時，其儲存模數會隨竹材粒片混合比例之增加而下降。以室溫（25°C）為例，當竹材粒片含量由 0 wt% 增加至 80 wt% 時，試材之儲存模數則由原先之 3.0 GPa 下降至 1.6 GPa。相反的，當溫度提高至 90°C 時，試材之儲存模數則由 0.01 GPa 提升至 0.43 GPa。此結果顯示，以竹材粒片含

量為 80 wt%所製備之 BPPC，其於橡膠態區（60–160°C）時，有助於延緩儲存模數之下降。而造成此現象之原因，主要係當竹材混合比例增加時，竹材本身具有較高之熱屏障（Heat barrier）與熱安定性，因此，使複合材在高溫時能減緩其儲存模數之變化。

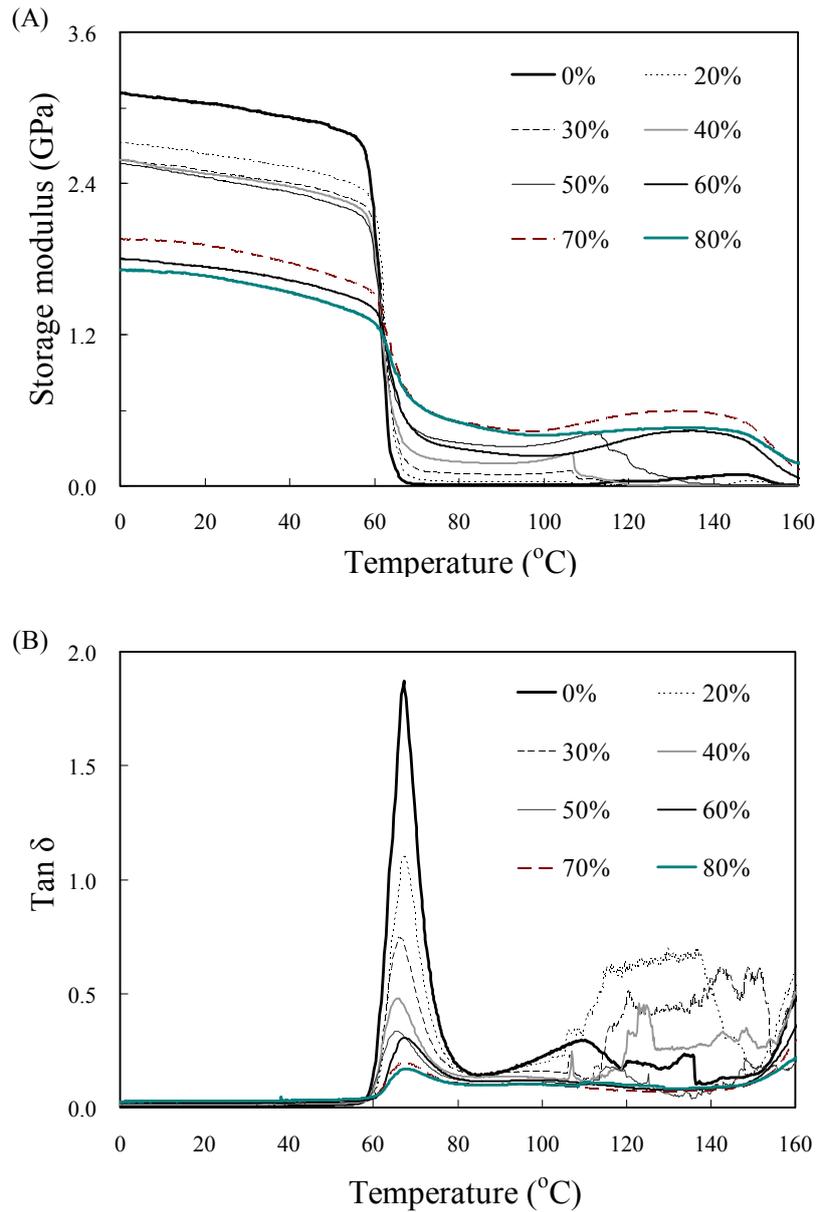


圖 6 竹材粒片含量對 BPPC 儲存模數 (A) 及 Tan δ (B) 之影響。

Fig. 6 Effects of bamboo particle content on storage modulus (A) and Tan δ (B) of BPPC. The size of bamboo particle within BPPC is -30+60 mesh.

另外，由圖 6B 中亦可以發現，不同竹材粒片含量所製備之 BPPC，其 T_g 均約為 68°C ，各組間並無明顯之差異。此外，由 T_g 點之 $\text{Tan } \delta$ 面積大小亦可發現，未混合竹材粒片之純 PLA，其阻尼值 (Damping) 最大，然隨著竹材粒片混合比例的增加，其阻尼值則有隨之下降之趨勢。

(三) 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 性質之影響

1. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 物理性質之影響

生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 物理性質之影響如表 5 所示，由表中可以得知，潤滑劑添加比例對複合材之密度並無顯著影響，其密度均介於 $0.96\text{--}1.00\text{ g/cm}^3$ 之間。而在 BPPC 含水率方面，由表中可以明顯發現，於 BPPC 製備中混入不同比例生物系潤滑劑時，其複合材含水率會隨潤滑劑混入比例的提高而略呈下降之趨勢。推測其原因，主要為潤滑劑屬於疏水性之油脂，會降低 BPPC 中竹材粒片之親水性，故混合潤滑劑製備 BPPC 時，其含水率則明顯降低。此外，由表 5 的試驗結果亦可得知，以不同添加比例 (1、2、4 及 8 wt%) 生物系潤滑劑所製備之 BPPC，雖其 2 h 吸水率之間並無顯著差異；然而，當潤滑劑添加比例為 2 wt% 時，其 24 h 吸水率則與無添加潤滑劑之 BPPC 間具有顯著差異。換言之，於 BPPC 製備過程中添加 2 wt% 潤滑劑，能有效減少 BPPC 之吸水性質。同樣地，在吸水厚度膨脹率方面，潤滑劑亦能明顯減少 BPPC 之吸水特性，而此結果與吳東霖等人 (2008) 以及陳合進等人 (2005) 添加大豆油於 WPC 中所得之結果相似。

表 5 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 物理性質之影響

Table 5 Effects of bio-based lubricant content on physical properties of BPPC

Lubricant content (wt%)*	Density (g/cm ³)	Moisture content (%)	Effects of 2 h soaking		Effects of 24 h soaking	
			Water	Thickness	Water	Thickness
			absorption (%)	swelling (%)	absorption (%)	swelling (%)
0	0.97 ± 0.03 ^a	3.8 ± 0.1 ^a	10.7 ± 3.0 ^a	3.1 ± 0.6 ^a	15.2 ± 2.8 ^a	4.7 ± 0.4 ^a
1	0.96 ± 0.04 ^a	2.7 ± 0.2 ^b	9.0 ± 2.3 ^a	2.1 ± 0.4 ^{ab}	13.2 ± 2.6 ^{ab}	3.1 ± 0.5 ^b
2	1.00 ± 0.03 ^a	2.7 ± 0.3 ^b	5.7 ± 2.2 ^a	1.6 ± 0.7 ^b	9.5 ± 2.1 ^b	2.7 ± 0.7 ^b
4	0.99 ± 0.07 ^a	2.4 ± 0.1 ^b	7.1 ± 4.1 ^a	1.7 ± 0.2 ^b	10.7 ± 4.0 ^{ab}	2.8 ± 0.4 ^b
8	0.96 ± 0.02 ^a	3.0 ± 0.3 ^b	5.5 ± 1.5 ^a	2.0 ± 0.5 ^b	10.0 ± 1.0 ^{ab}	3.0 ± 0.1 ^b

The size and content of bamboo particle within BPPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively. Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant difference ($p < 0.05$).

* Based on the oven dried weight of bamboo particles.

2. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 抗彎性質之影響

生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 之抗彎性質如圖 7 所示，由圖中可以得知，添加比例為 0–8 wt% 生物系潤滑劑之 BPPC，各組之抗彎強度與抗彎彈性模數間並無顯著差異，顯示潤滑劑的混合，無法有效改善竹材粒片與 PLA 之結合性。換言之，潤滑劑雖可降低部分 BPPC 之吸水性質，但對於複合材之抗彎性質，則不具明顯改善效果。

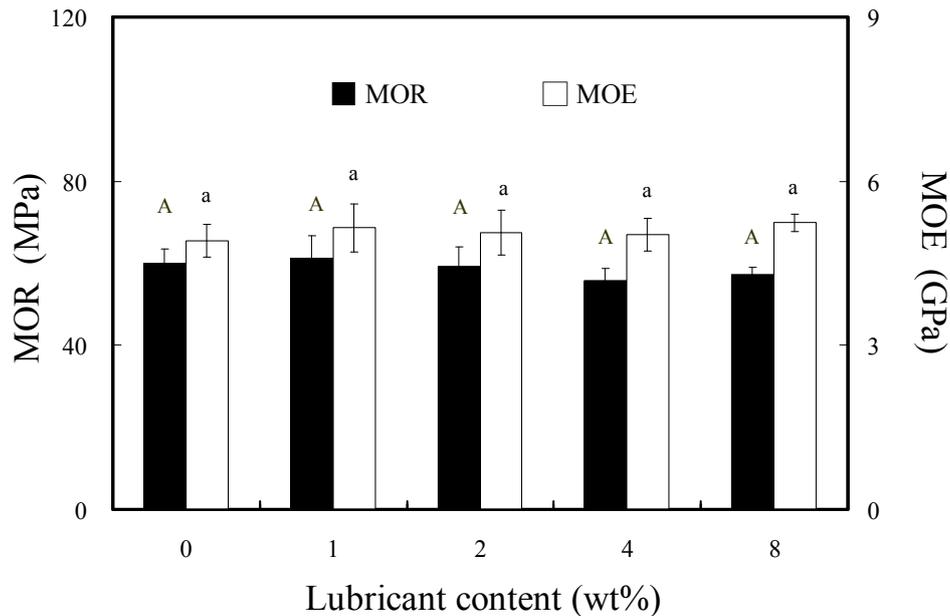


圖 7 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 抗彎性質之影響。

Fig. 7 Effects of bio-based lubricant content on MOR and MOE of BPPC. The size and content of bamboo particle within BPPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively. Values are mean \pm SD ($n = 5$). Different letters indicate significant difference among groups ($p < 0.05$).

3. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 抗拉性質之影響

表 6 為潤滑劑添加比例對 BPPC 抗拉性質之影響，由表中可以得知，BPPC 之抗拉強度隨潤滑劑混入比例之增加而下降，當混入比例由 0 wt% 增加至 8 wt% 時，BPPC 之抗拉強度則由原先之 36.1 MPa 下降至 30.6 MPa。同樣的，當潤滑劑混入比例由 0 wt% 增加至 8 wt% 時，BPPC 之抗拉彈性模數則由原先之 3.6 GPa 下降至 3.4 GPa；而破壞伸長率則由 1.2% 略下降至 1.1%。顯示潤滑劑的添加，無法有效改善竹材粒片與 PLA 間之結合性。

表 6 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 抗拉性質之影響

Table 6 Effects of bio-based lubricant content on tensile properties of BPPC

Lubricant content (wt%)*	Tensile properties		
	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
0	36.1 ± 1.3 ^a	3.6 ± 0.1 ^{ab}	1.2 ± 0.0 ^a
1	35.1 ± 2.0 ^{ab}	3.7 ± 0.2 ^a	1.2 ± 0.1 ^a
2	33.9 ± 2.1 ^{ab}	3.6 ± 0.1 ^{ab}	1.2 ± 0.1 ^a
4	32.1 ± 1.8 ^{bc}	3.6 ± 0.1 ^{ab}	1.2 ± 0.0 ^a
8	30.6 ± 1.1 ^c	3.4 ± 0.0 ^b	1.1 ± 0.1 ^a

The size and content of bamboo particle within BPPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively. Values are mean ± SD ($n = 5$). Different letters within a column indicate significant difference ($p < 0.05$).

* Based on the oven dried weight of bamboo particles.

4. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 內聚強度之影響

由圖 8 中可以得知，當潤滑劑添加比例為 0、1、3、5、10 及 20 wt%時，其 BPPC 之內聚強度則分別為 0.8、1.4、2.2、1.4、1.5 及 1.7 MPa。此結果顯示，當潤滑劑添加比例為 3 wt%時，BPPC 之內聚強度達到最大，然添加比例超過 3 wt%時，BPPC 之內聚強度則隨之下降。而造成上述 BPPC 內聚強度變化之原因，推測主要係因為潤滑劑添加比例達 3 wt%時，可使竹材粒片均勻分散於 PLA 基質中，進而改善 BPPC 之界面性質。而當潤滑劑添加比例超過 3 wt%時，過量之潤滑劑反而會使材料強度性質下降，此結果與 Lu 等人（2005）所得結果相似。因此，混合適量的潤滑劑有助於提升 BPPC 之內聚強度。

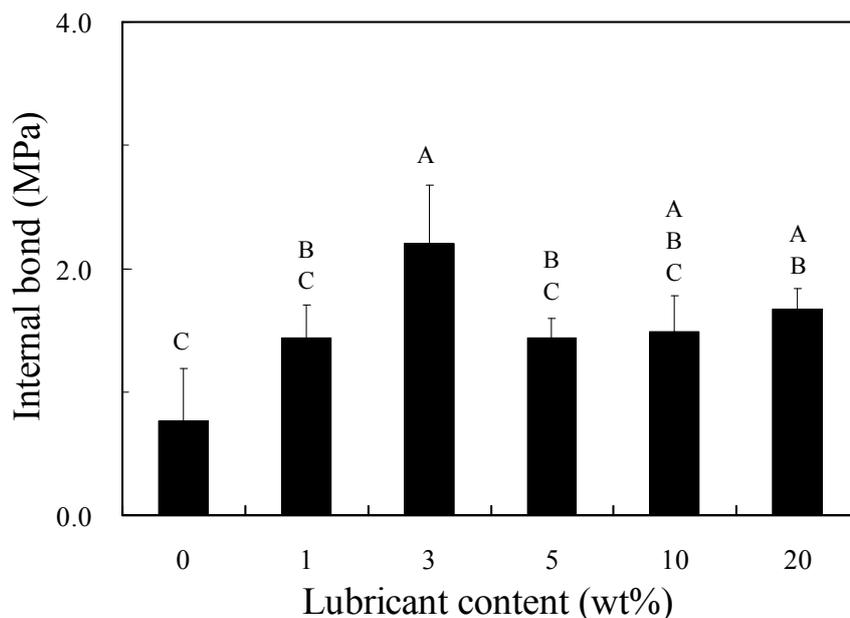


圖 8 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 內聚強度之影響。

Fig. 8 Effects of bio-based lubricant content on internal bond of BPPC. The size and content of bamboo particle within BPPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively. Values are mean \pm SD ($n = 5$). Different letters indicate significant difference among groups ($p < 0.05$).

5. 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 熱性質之影響

不同潤滑劑添加比例所製備之 BPPC，其儲存模數如圖 9A 所示。由圖中可以發現，於 BPPC 中添加潤滑劑時，其儲存模數均較未添加者高。以室溫（25°C）為例，當添加比例由 0 wt% 增加至 4 wt% 時，BPPC 之儲存模數達到最大，其儲存模數由原先之 2.7 GPa 上升至 3.0 GPa。而當添加比例超過 4 wt% 時，BPPC 之儲存模數則小幅下降。此外，由圖 9B 中亦可以發現，不同潤滑劑添加比例所製備之 BPPC，其 T_g 均約為 68°C，各組間並無明顯之差異。綜合上述結果顯示，適當的添加潤滑劑能有效提升 BPPC 之動態機械性質。

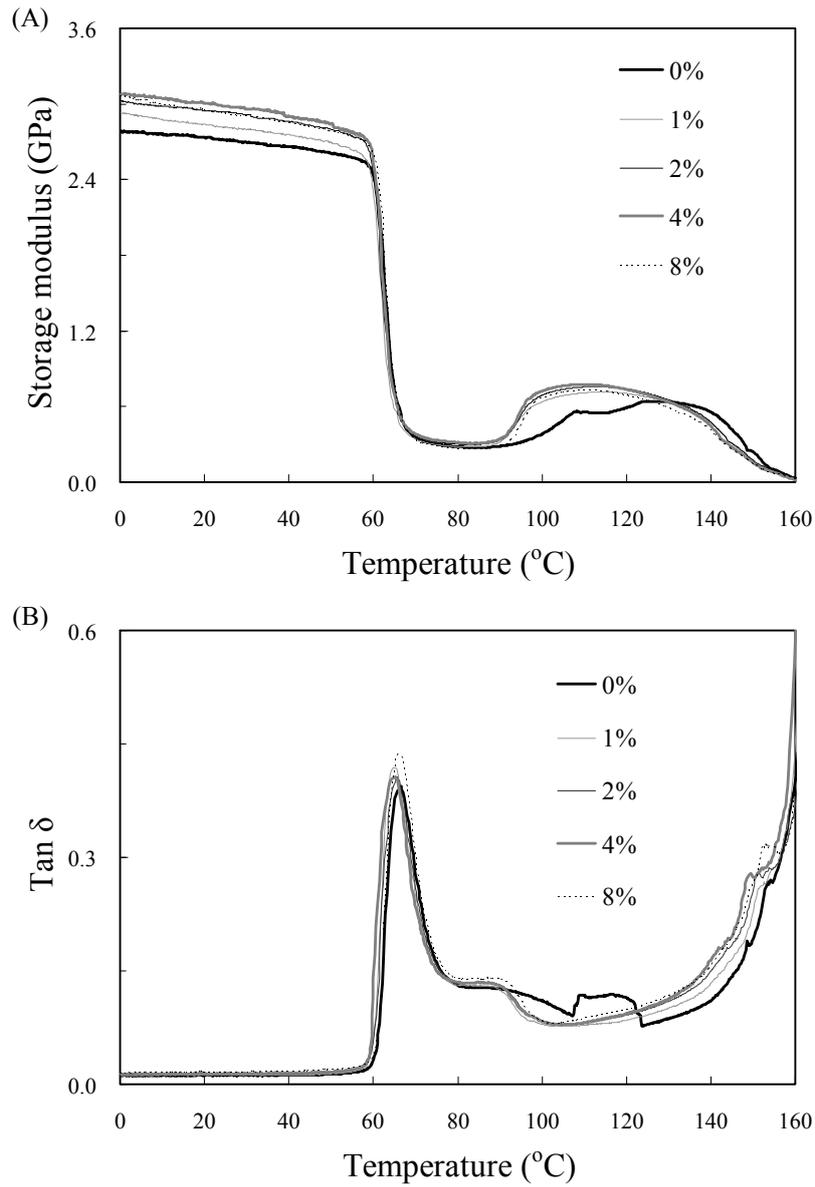


圖 9 生物系潤滑劑添加比例對 BPPC 儲存模數 (A) 及 Tan δ (B) 之影響。

Fig. 9 Effects of bio-based lubricant content on storage modulus (A) and Tan δ (B) of BPPC. The size and content of bamboo particle within BPPC are -30+60 mesh and 50 wt%, respectively.

六、結論

本試驗之目的主要是以竹材加工廢料及聚乳酸製備生物可分解型複合材，除評估竹材粒片尺寸、竹材粒片與 PLA 混合比及生物系潤滑劑添加比例對竹材粒片聚乳酸複合材 (BPPC) 性質之影響外，並藉以探討最適化複合材之製備條件。而由本試驗結果可以發現，利用竹材粒片尺寸-6+16 mesh 所製備之 BPPC，具有較佳之抗彎強度；相對的，以竹材粒片尺寸-30+60 mesh 所製備之 BPPC，則具有較高的吸水率。此外，隨著竹材粒片混合比例之增加，雖會降低其抗彎強度，但卻可提升 BPPC 之抗拉彈性模數及其橡膠態區之儲存模數。另一方面，混合生物系潤滑劑雖無法明顯改善其抗彎強度，但適量的添加 (3-4 wt%) 卻可增加複合材耐水性、尺寸安定性、內聚強度以及儲存模數。

綜合以上試驗成果，本計畫已順利達到預定工作目標，期望藉由計畫的完成除能提高國內竹材加工廢料之利用率，減少資源之浪費及環境的衝擊，以達到節能減碳之效益外，亦期能拓展及提升國內相關生物可分解型複合材及無甲醛系 (Formaldehyde free) 輕質綠建材開發及應用之潛能。

七、參考文獻

- 王松永、黃問瑄 (1981) 竹材粒片板靜曲強度與潛變性質的改善效應研究。中華林學季刊 14:71-94。
- 吳志鴻、葉汀峰、張上鎮 (2001) 鉻磷酸鹽處理麻竹之保綠機制。中華林學季刊 34:241-248。
- 吳東霖、洪克昌、王贊鈞、陳載永、吳志鴻 (2008) 不同界面改質處理對木材粒片-低密度聚乙烯複合材性質之影響。中華林學會 97 年度學術論文發表會論文集。pp. 1156-1166。
- 徐俊雄、陳載永、陳合進 (1999) 石膏-農林廢料複合材之性質。林產工業 18:287-296。
- 張上鎮、葉汀峰、吳志鴻 (2002) 孟宗竹材之低毒性保綠加工處理及其保綠機制。林產工業 21:151-160。

- 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。
- 莊純合、蔡崑堉 (2000) 孟宗竹積層壁板隔音性能之研究-聲音透過損失之測定與分析。林產工業 19:425-434。
- 陳合進、陳載永、徐俊雄 (2005) 戶外曝露對木材粒片-塑膠複合材性質之影響。林產工業 24:107-112。
- 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。
- 陳載永 (1981) 竹材加工廢料製造粒片板與蜂巢板之研究。中華林學季刊 14:103-121。
- 陳載永、王瀛生 (1981) 竹材廢料製造建築用粒片板之研究。中華林學季刊 14:39-60。
- 陳載永、吳東霖、徐俊雄 (2003) 開發人工造型竹之範例。台灣木工機械 3:75-78。
- 陳載永、徐俊雄、游依玲 (1999) 石膏結合農林廢料複合材之水合作用。林產工業 18:393-402。
- 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。
- 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。
- 陳載永、薛秀輝 (1985) 水泥膠合竹材粒片板與竹筋補強混泥土之研究。林產工業 4(2):2-16。
- 葉英晉 (2000) 好竹連山。大地地理出版事業股份有限公司。143 頁。
- 褚炳麟、陳載永、顏聰 (1984) 竹材及粒片板之造型對靜曲強度及熱傳導性之影響。林產工業 3(3):2-29。
- 劉正字、李文昭、王張光 (1994) 竹材積層膠合製作高級製品-竹材塗裝性能之探討。林產工業 13:528-543。
- Adhikary, K. B., S. Pang and M. P. Staiger (2008) Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). Composites B 39:807-815.
- 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.

- Espert, A., F. Vilaplana and S. Karlsson (2004) Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites A* 35:1267–1276.
- Gutierrez-Villarreal, M. H., M. G. Ulloa-Hinojosa and J. G. Gaona-Lozano (2008) Surface functionalization of poly(lactic acid) film by UV-photografting of N-vinylpyrrolidone. *J. Appl. Polym. Sci.* 110:163–169.
- 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.
- Kim, H. S., S. Kim, H. J. Kim and H. S. Yang (2006) Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochim. Acta* 451:181–189.
- Lee, S. H. and S. Wang (2006) Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. *Composites A* 37:80–91.
- Lin, H. C., Y. Fujimoto, Y. Murase and Y. Mataka (2002) Behavior of acoustic emission generation during tensile tests perpendicular to the plane of particleboard II: effects of particle sizes and moisture content of boards. *J. Wood Sci.* 48:374–379.
- Lu, J. Z., Q. Wu and I. I. Negulescu (2005) Wood-fiber/high-density-polyethylene composites: coupling agent performance. *J. Appl. Polym. Sci.* 96:93–102.
- Luo, S. and A. N. Netravali (1999) Interfacial and mechanical properties of environment-friendly green composites made from pineapple fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin. *J. Mater. Sci.* 34:3709–3719.
- Ochi, S. (2006) Development of high strength biodegradable composites using Manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites A* 37:1879–1883.
- Saheb, D. N. and J. P. Jog (1999) Natural fiber polymer composites: A Review. *Adv. Polym. Technol.* 18: 351–363.
- Verhey, S. A., P. E. Laks and D. L. Richter (2001) The effect of composition on the decay resistance of model woodfiber–thermoplastic composites. In: *Proc., The Sixth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*. Madison, WI. pp. 79–86.
- Wu, J. H., M. J. Chung and S. T. Chang (2005) Green color protection of bamboo culms using one-step alkali-pretreatment-free process. *J. Wood Sci.* 51:622–627.

Wu, J. H., S. Y. Wu, T. Y. Hsieh and S. T. Chang (2002) Effects of copper-phosphorous salt treatment on green colour protection and fastness of ma bamboo (*Dendrocalamus latiflorus*). *Polym. Degrad. Stabil.* 78:379–384.

一、期中簡報審查意見回覆表

審查意見	意見回覆
1. 第3頁，標題2.生物可分解型塑膠材料，有關PLA粉末尺寸小於20 mesh之表示方法不甚妥當，會被誤以為是<20 mesh，其實在此應為比20 mesh細之粉末，故以通過20 mesh網篩者表示為妥。	1. 謝謝委員的指正，已遵照審查委員意見修改於報告內文中。
2. 第6頁，標題IV(I)1.第8行，吸水率及吸水厚度膨脹率並不能藉以評估BPPC之抗濕性。足以影響者應是耐水性。又第12行，有關粒片尺寸的「減少」，建議改為粒片尺寸的「減小」。	2. 謝謝委員的指正，已遵照審查委員意見修改於報告內文中。
3. 第9頁，第7行中，為何以吸水厚度膨脹率12%表示，表2中，竹材含量低於70%之60/40者，其2h及24h之吸水厚度膨脹率也只有5.6%及6.8%。12%是否有何特別意義，請加以說明。	3. 吸水厚度膨脹率12%為CNS 2215素面粒片板之上限標準。若複合材之吸水厚度膨脹率低於12%，表示其符合CNS 2215素面粒片板之標準，此說明亦已新增於報告內文中。
4. 添加潤滑劑者是何種Bamboo/PLA比例者，未見在試驗方法中說明，同時也應該在表3及圖3加註說明。又表3中，添加潤滑劑1%者2h之吸水率9.0%與2%者5.7%，8%者5.5%之間，似不能說無差異，請加以說明。	4. 生物系潤滑劑混合比例是相對於竹材粒片絕乾重之1、2、4及8 wt%，而此說明已新增於實施方法中。 此外，吸水率平均值雖有不同，但因數值之標準偏差較大，經統計分析後均落在95%信賴區間內 ($p > 0.05$)，故於統計上不具顯著差異。
5. 添加潤滑劑與否對BPPC之抗彎性並無影響，使用偶合劑可能較為有效。又BPPC板之製備，雖然添加大豆油做為潤滑劑，但如何將竹粒片與PLA作均勻混合，應予說明。另大豆油為低表面張力物質，可能影響竹粒片與PLA之間的膠合力。	5. 根據筆者先前試驗結果得知，(吳東霖等，2008)，以熱壓成型法 (Compression molding) 製備WPC時，耦合劑對複合材之強度性質不具改善效果。因此，本試驗則參考Chen等人 (2006) 以生物系潤滑劑改善木質粒片於基質之分散性，以提升其界面性質。製備方式係將竹材粒片先與潤滑劑混合，使竹材粒片表面沾附潤滑劑；之後，再添加PLA基質進行混合，使PLA黏附在竹材粒片表面，進而達到竹材粒片與PLA間之均勻混合。而本試驗結果亦證實，混合適量的潤滑

	<p>劑 (3 wt%)，確實能有助於提升BPPC之內聚強度，同時並可提升複合材之抗吸水性。</p> <p>引用文獻</p> <p>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.</p> <p>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。</p>
<p>6. WPC所用竹材為親水性材料，PLA為疏水性材料，兩者的界面問題，乃製造WPC的關鍵技術，而本計畫試驗方式未見所用界面活性劑，是否合適？請加以說明。</p>	<p>6. 根據 Satyanarayana 等人 (2009) 之 Review 報告指出，對於生物可分解型複合材之製備，因生物可分解型高分子較石油系高分子具親水性，因此與石油系熱塑性塑膠所製備之 WPC 不同，較不需添加界面活性劑以改善其界面性質。</p> <p>引用文獻</p> <p>Satyanarayana, K. G., G. G. C. Arizaga and F. Wypych (2009) Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview. Prog. Polym. Sci. 34:982–1021.</p>
<p>7. 本計畫試驗材種無特別顯示，若桂竹、孟宗竹以外竹種可加以利用，應屬極具潛力之應用。如以刺竹、長枝竹全材利用，材料供應及附加價值較高。</p>	<p>7. 本試驗主要係利用桂竹作為材料，以了解竹材粒片應用於生物可分解型塑膠複合材之可行性，未來若能進一步研究，將遵照審查委員建議，進行如刺竹、長枝竹等竹材之全材利用等試驗。</p>
<p>8. 台灣目前竹材加工廢料之數量為多少？作為WPC原料之經濟性如何？又目前成型WPC採用擠壓成型及射出成型之製程，本計畫使用抄板製程是否符合產量的經濟效益，及製成之BPPC板是否達</p>	<p>8. 根據陳載永老師 (1981) 之研究報告指出，全台灣每年產生之竹材廢料約為25萬–30萬噸之多，然近年來並未見詳細相關之統計資料，故無法評估，實值得後續持續追蹤。</p>

到CNS規範，請加以說明。

此外，根據Hackwell Group市場分析（2006）之WPC價格約€1/kg（NTD 42/kg），而回收型HDPE塑膠售價約\$0.43/lb（NTD 28/kg）。以木材/HDPE混合比50 wt%為例，每公斤WPC成本約台幣14元。另外，根據Jiang與Kamdern（2004）報告指出，木材纖維售價約\$0.06/lb（NTD 4/kg），以木材/HDPE混合比50 wt%為例，每公斤WPC成本約台幣2元，因此，若以竹材加工廢料作為WPC原料，則可降低材料成本，且隨木質材料之增加，其利潤效益則會隨之提高，實具有經濟上之優勢。

另外，目前WPC之製備主要是採用射出成型或擠壓成型的方式製備，其所生產之產品受機具設備的影響，只能按模具製造出成品，而無法達到目前市售裝修用木質板材之尺寸規格（3' × 6'或4' × 8'），使其材料在應用上廣受限制。而熱壓成型法則可生產大尺寸的板材，係為一種符合市場需求及產量的經濟製程。

至於產品性質方面，於最適化的條件下，本試驗所製備之BPPC均能符合CNS 2215素面粒片板18型之規範，即BPPC之抗彎強度達18.0 MPa以上、內聚強度達0.3 MPa以上以及吸水厚度膨脹率低於12%等檢測標準。

引用文獻

陳載永（1981）竹材加工廢料製造粒片板與蜂巢板之研究。中華林學季刊 14:103-121。

Hackwell group (2006) The European wood plastics composites market. <http://www.woodplasticcomposites.org>.

Jiang, H. and D. P. Kamdem (2004) Development of poly(vinyl chloride)/wood composites. A literature review. J. Vinyl Addit. Technol. 10:59-69.

二、期末簡報審查意見回覆表

審查意見	意見回覆
<p>1. 竹材廢料以桂竹最多，如能以最佳條件配合其他經濟竹種，則更能突顯竹材在強度及穩定性之特性；本計畫與木材同類型產品之各項性質亦可加以比較，以確定何種材料較適合WPC之應用，供廠商進一步量產參考。</p>	<p>1. 本試驗主要係利用桂竹作為材料，以了解竹材廢料應用於生物可分解型塑膠複合材之可行性。而目前由於缺乏同類型木材粒片-PLA複合材之相關資料，因此未來若能進一步研究，將遵照審查委員建議，進行相關比較。</p>
<p>2. 第4頁，第9行 poly(lactic acid)，建請寫成 polylactic acid 即可；第19頁，最後一段之阻尼值 (Damping) 隨竹粒片添加量增加而下降，而阻尼值高吸音性佳，阻尼值低者 BPPC 板強度較佳，竹粒片與 PLA 混合比率多少，可以兼具上述二種優點？</p>	<p>2. 謝謝委員的指正，已遵照審查委員意見修改於報告內文中。此外，有關竹粒片與 PLA 混合比率多少時，可以兼具吸音性佳及強度佳二種優點？由於試材吸音性質的優劣無法單一由阻尼值大小判定，故由目前的試驗結果並無法充分提供相關資訊。因此，有待未來進一步研究加以分析。</p>
<p>3. 結果與討論之(二)，竹材粒片添加量對BPPC性質之影響，文中所用「添加量」一詞有斟酌之必要，因一般添加量之比較乃在一固定量中添加各種不同量做比較。本試驗用竹材粒片與PLA之配合比或混合比較為妥適。如第7頁，結果與討論之(一)之1所述，使用混合比。又圖4之橫坐標particle content，其中文不應是添加量，請查明。</p>	<p>3. 謝謝委員的指正，已遵照審查委員意見修改於報告內文中。</p>
<p>4. 第12頁，第5項第一段，PLA的T_g約為60°C，是否經實測所得，因其T_g與聚合度有關，據 Polymer Science Dictionary 記載，PLA的軟化溫度約在$100\sim 130^{\circ}\text{C}$。又圖6B及圖9B所呈現之$T_g$在$68^{\circ}\text{C}$附近為意料中之結果，因其主要受PLA所支配，而竹材在此溫度下應不受影響；第13頁，不同竹粒片尺寸所</p>	<p>4. 謝謝委員的指正，本文中 PLA 之 T_g 為試驗實測所得 (已於文中說明)。至於 BPPC 於常溫下是否會顯現剛硬而易脆性質，此部分可由試材之抗拉試驗得知，添加竹材於 PLA 中，確實會使 PLA 之延展性受限而降低材料之破壞伸長率，但確切之耐衝擊強度，未來仍需進一步試驗方能證實。</p>

<p>製備之 BPPC，其 T_g 均約為 68 °C，這些 WPC 板置於台灣地區室溫環境使用，是否顯示具剛硬而易脆性質，導致耐衝擊性不佳？請加以說明。</p>	
<p>5. 第 15 頁，第 2 項之木質纖維間因氫鍵作用而聚集在一起之主要原因，即因 PLA 的量相對減少無法將竹粒片完全包覆（或充分接觸）所致。文中所稱竹粒片與 PLA 間之界面缺陷，是否指此而言，請加以說明。</p>	<p>5. 謝謝委員的指正，已遵照審查委員意見修改於報告內文中。</p>
<p>6. 第 21 頁，第 3 行，表 3 應為表 5；第 22 頁，第 3 項所列，由表 6 顯示潤滑劑的添加量，無法有效改善竹材粒片與 PLA 間之結合性，惟為何有助於提升 BPPC 之內聚強度？又 BPPC 之內聚強度試驗，為何潤滑劑之添加量提升至 10 及 20%？請加以說明。</p>	<p>6. 謝謝委員的指正，表 3 誤植部分已遵照審查委員意見修改於報告內文中。至於潤滑劑無法有效改善竹材粒片與 PLA 間之結合性，但卻有助於 BPPC 內聚強度之提升，其原因主要係內聚強度除受上述 PLA 與竹材粒片之結合性影響之外，亦受到複合材之密度剖面影響所致。一般而言，於相同板材密度下，密度剖面愈均勻者，其內聚強度愈大。由此推論，於 BPPC 中添加適量潤滑劑則可改善竹材粒片的分散性，使板材密度剖面較為均一，因此有助於提升 BPPC 之內聚強度。而未來若能進一步研究，將進行相關試驗加以佐證。另外，潤滑劑之混合比例提升至 10 及 20%，其主要係為了探討高添加比例之潤滑劑對 BPPC 內聚強度的影響，而試驗結果發現，過量之潤滑劑反而會使材料強度性質下降。</p>
<p>7. 第 22 頁，生物性潤滑劑添加量無法有效改善竹粒片與 PLA 之間結合力，惟第 23 頁又說明添加適量潤滑劑可提升 BPPC 板之內聚強度，此二種結果是否矛盾？請查明。</p>	<p>7. 此現象同上題之說明，添加適量潤滑劑可提升 BPPC 之內聚強度，推測可能係受 BPPC 密度剖面影響所致。至於確切之原因，未來若能進一步研究，將進行相關試驗加以佐證。</p>