



公開  
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070404e203

## 行政院農業委員會林務局111年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**熱改質技術於耐久性竹材製品開發之應用（2/3）（第2年/全程3年）**  
(英文名稱)**Application of Thermal Modification Technology on the Development of Durable Bamboo Products (2/3)**

計畫編號：**111農科-7.4.4-務-e2(3)**

全程計畫期間：自 110年1月1日 至 112年12月31日  
本年計畫期間：自 111年1月1日 至 111年12月31日

計畫主持人：**吳志鴻**  
研究人員：**許晉璋、王重堯**  
執行機關：**國立中興大學**



1111666



## 一、執行成果中文摘要：

本計畫係以孟宗竹材為材料，探討真空水熱處理對其物理機械及化學性質之影響，以尋求孟宗竹材之最適化真空水熱處理條件。試驗結果顯示，孟宗竹材之表面顏色隨熱處理溫度及持溫時間增加而變深，明度值 ( $L^*$ ) 由未處理材之72.0降低至240°C/16 h處理材之26.5，而色差值 ( $\Delta E^*$ ) 則隨熱處理溫度及持溫時間增加而提高，且以240°C/8 h及240°C/16 h處理者最高，其值分別為45.4及45.3。另外，真空水熱處理材之質量損失率隨處理溫度及持溫時間增加而提高，且當熱處理條件低於 200°C/8 h時，真空水熱處理材之質量損失率均小於10%。而真空水熱處理竹材中除220°C/16 h外，各處理材之氣乾密度與未處理材間均無顯著差異，其值介於627-720 kg/m<sup>3</sup>之間。至於真空水熱處理對孟宗竹材吸濕性及尺寸安定性之影響方面，160°C /4 h真空水熱處理材之平衡含水率及體積膨脹係數即與未處理材具有顯著差異，顯示以較低溫度 (160°C) 對孟宗竹材進行短時間 (4 h) 之真空水熱處理即可有效降低其吸濕性並提高尺寸安定性。再者，真空水熱處理孟宗竹材之MOE除220°C/16 h (7.9 GPa) 及240°C/16 h (7.9 GPa) 外，各處理材之MOE與未處理材間均無顯著差異，其值介於9.0-11.0 GPa之間。然而，真空水熱處理孟宗竹材之MOR除160°C/4 h (132 MPa) 外，各處理材之MOR與未處理材 (165 MPa) 間均具有顯著差異，且隨熱處理條件加劇而降低，其值介於55-127 MPa之間。此外，由全反射式傅立葉轉換紅外線光譜分析 (Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy, ATR- FTIR) 、近紅外線光譜分析 (Near-infrared spectroscopy, NIR) 以及X-ray繞射分析 (X-ray diffraction spectroscopy, XRD) 之試驗結果可以得知，孟宗竹材經真空水熱處理後，半纖維素發生去乙醯基及脫水反應，使羥基及乙醯基含量降低，進而提高孟宗竹材之尺寸安定性。同時，於真空水熱處理過程中，木質素會進一步發生縮合及交聯反應，使木質素之相對含量提高。然而，真空水熱處理對孟宗竹材纖維素之結晶結構及結晶度均無顯著影響。綜合上述試驗結果可以得知，孟宗竹材以160°C進行4 h真空水熱處理時，不僅能有效降低吸濕性及提高尺寸安定性，且質量損失率僅1.7%，亦能保有約80%之抗彎強度，故實為國產孟宗竹材之最適化真空水熱處理條件。

## 二、執行成果英文摘要：

This project used moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) as materials to evaluate the effect of vacuum-hydrothermal (VH) treatment on the physicomechanical and chemical properties of moso bamboo, and to find the optimal conditions for VH treatment of bamboo. The results revealed that the surface color of moso bamboo was darker with increasing the treatment temperature and time. The lightness ( $L^*$  value) of untreated bamboo (72.0) is lower than that of the 240°C/16 h VH-treated bamboo (26.5). The color difference ( $\Delta E^*$  value) of moso bamboo increased with increasing the treatment temperature and time, and the highest values were 45.4 and 45.3 for those treated at 240°C/8 h and 240°C/16 h, respectively. In addition, the mass loss of VH-treated bamboo increased with increasing the treatment temperature and time. When the heat treatment condition is lower than 200°C/8 h, the mass loss of VH-treated bamboo is less than 10%. Except for 220°C /16 h VH-treated bamboo, the air-dry density of bamboo was no significant difference between the VH-treated bamboo and the untreated bamboo, and the values were in a range of 627-720 kg/m<sup>3</sup>. The equilibrium moisture content and volumetric swelling coefficient of the 160°C/4 h VH-treated bamboo was significantly different from those of the untreated bamboo, thus moso bamboo treated at 160°C for 4 h could reduce hygroscopicity and enhance dimensional stability effectively. Furthermore, the modulus of elasticity (MOE) was no significant





difference between the VH-treated bamboo and the untreated bamboo, whose values were 9.0-11.0 GPa, except for 220°C/16 h (7.9 GPa) and 240°C/16 h (7.9 GPa) VH-treated bamboo. However, the modulus of rupture (MOR) for VH-treated bamboo (55-127 MPa) had significant differences to the untreated bamboo, except for 160°C/4 h (132 MPa) VH treatment. In addition, the MOR decreased with the intensification of heat treatment conditions. Furthermore, attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), near-infrared spectroscopy (NIR), and X-ray diffraction spectroscopy (XRD) analysis revealed that, after VH treatment, the hemicellulose will undergo deacetylation and dehydration reactions, and caused the reduction of hydroxyl and acetyl groups to improve dimensional stability of moso bamboo. Condensation and cross-linking reactions of lignin were also found during VH treatment, which increasing the relative content of lignin. However, the crystallinity of moso bamboo has no significant change after VH treatment. Based on the above test results, it can be known that when moso bamboo is subjected to VH treatment at 160°C for 4 h, it can not only effectively reduce the hygroscopicity and improve the dimensional stability, but also the mass loss is only 1.7%, and about 80% of the flexural strength can be retained. Therefore, it is actually the optimal VH treatment condition for domestic moso bamboo.

### 三、計畫目的：

近年來，環境保護及自然資源保育之重要性逐漸受到全球重視，使得木竹材等可再生之天然生物性材料資源的有效與合理利用廣受探討。其中，竹類分布相當廣泛，舉凡熱帶、亞熱帶、溫度，甚至寒帶均可見其蹤跡，且以亞洲地區分布最廣，佔世界竹林面積之85%（路統信，1986；王瀛生、吳孟玲，2010）。而台灣森林面積中約有6%為竹林（邱立文等人，2015），且竹材具有無性生長繁殖、生長快、成材早、加工利用價值高、產量高且穩定以及等特性，故實為台灣重要之再生性森林資源（邱祈榮，2011）。而台灣之經濟竹種以孟宗竹（*P. pubescens* Mazel）、桂竹（*P. makinoi*）、麻竹（*Dendrocalamus latiflorus* Munro）、綠竹（*Bambusa oldhamii* Munro）、刺竹（*B. stenostachya* Hackel）以及長枝竹（*B. dolichoclada* Hayat）六種為主；其中，孟宗竹除為台灣中部地區主要竹種之外，其竹肉較為厚實，且具有良好之加工性，故為業者常用竹種之一（文化部，2014；吳仕揚，2015）。此外，四季之改變對氣溫及光照時數均有大幅變化，而植物體則會因應四季改變而有不同之適應方式，進而使竹材組成分有所差異。有鑑於此，實有必要系統性分析不同伐採季節所得孟宗竹材之化學組成分差異。

有鑑於此，本計畫第一年即以春、夏、秋、冬四個季節伐採之國產孟宗竹材為試材，對其進行化學組成分分析及近紅外線光譜儀（Near infrared spectroscopy，NIR）分析。除了探討伐採季節對其化學組成分之影響，以利於後續分析不同季節所伐採孟宗竹材之熱改質效果之影響因子外，亦利用其NIR圖譜建立各化學組成含量之預測模型。試驗結果顯示，春、夏、秋、冬四季孟宗竹中段之萃取物含量分別為5.7、8.0、4.7以及6.3%，且夏季之萃取物含量較早期之試驗結果為高，而秋季時新葉抽發消耗部分養分則導致萃取物含量降低。另外，不同季節孟宗竹全纖維素、 $\alpha$ -纖維素以及卡森木質素則分別為56.3-64.1%、41.4-44.4%以及18.9-21.4%，此值均較早期之試驗結果為低。至於灰分方面，春季至冬季孟宗竹中段之含量分別為1.1、0.4、1.1以及1.5%。由此可以得知，不同季節伐採孟宗竹之化學組成分雖然均有顯著差異，但其變化並無明顯規律。此外，NIR之預測模型發現，醇苯萃取物及全纖維素之性能偏差





(Ratio of performance deviation, RPD) 均符合可應用於品質管制之範圍 (RPD < 5)，且預測準確度高，顯示NIR可作為未來孟宗竹材醇苯萃取物及全纖維素含量檢測之利器。

另一方面，竹材製品一般易受其吸濕性之影響而產生收縮膨脹，進而導致尺寸安定性不佳，加上容易受到真菌、白蟻、蛀蟲、海蟲以及細菌等生物性危害，最終影響竹製品之品質 (Zheng et al., 2015; Martínez et al., 2005; Wang et al., 2012)。根據早期研究指出，熱改質處理技術不僅能有效改善木材之尺寸安定性 (Icel et al., 2015; Korkut and Bektas, 2008; Cao et al., 2012)、耐久性以及耐腐朽性 (Rowell et al., 2009; Esteves and Pereira, 2009; Ohnesorge et al., 2009; Lovri et al., 2017) 等性質，亦為對環境較友善之木材改質方法。而熱改質處理技術依加熱介質之差異，主要可分為水熱處理

(Hydrothermal treatment)、惰性氣體熱處理以及油熱處理 (Oil heat treatment) 三大類 (Esteves and Pereira, 2009)；其中，以惰性氣體熱處理之研究最廣，而油熱處理則具有均勻受熱之特性，但熱處理後殘留於木材之油則容易影響後續利用。相對的，水熱處理因加熱介質為水蒸氣，故除了能降低因快速升溫所造成之木材開裂等缺陷之外，亦能有效降低成本及能量消耗 (Fujino et al., 2002)，且無油熱處理有介質殘留之問題。同時，於升溫前進行預真空，則可去除處理槽及木材內之空氣，以確保熱處理環境為低氧狀態，並能降低水之沸點使液態水提前氣化，使木材細胞內部可於較低溫度時充滿水蒸氣，亦能有效降低熱處理材之開裂 (Wentzel et al., 2019)；惟目前將真空水熱處理技術 (Vacuum-hydrothermal treatment, VH treatment) 應用於耐久性竹材製品開發之相關研究仍十分缺乏。

而本計畫第二年即利用真空水熱處理技術於不同處理條件下對孟宗竹材進行熱改質，除評估其各項物理機械性質及化學結構之外，亦藉此分析不同水熱處理條件對孟宗竹材熱改質效能之影響，以瞭解國產孟宗竹材之最適化熱改質製程。另一方面，熱改質竹材主要係期望能用以開發耐久性竹材製品，故其耐久性之研究即相當重要。因此，本年度所研製高尺寸安定性之水熱處理竹材可供第三年進行耐久性研究之用，並作為相關竹材加工產業開發高尺寸安定性竹製品之參考。

#### 四、重要工作項目及實施方法：

##### (一) 試驗材料

###### 1. 孟宗竹材

本試驗所使用之竹材係購自南投縣竹山鎮欣林竹材加工廠之4年生以上國產孟宗竹 (Moso bamboo)，其伐採季節為秋季 (9月)。試驗原竹於伐採後選取其中央段，將圓筒狀原竹剖為3-6片竹片，再將竹青部分之蠟質去除後，裁切為寬度30 mm之細竹片。該細竹片放至氣乾後，續以雙面鉋將其表面刨光成平整表面。最終，裁切為尺寸900 mm × 30 mm × 5 mm (長 × 寬 × 厚) 之試材後，以供後續進行真空水熱處理之用。

###### 2. 膠合劑

本計畫用以檢測孟宗竹材膠合性質之膠合劑係購自長春人造樹脂廠股份有限公司 (Chang Chun Plastics Co., Ltd., Hsinchu County, Taiwan) 所提供之酚甲醛樹脂 (Phenol formaldehyde resin, PF)，型號為PF125，固形份 (Solid content) 為46%，黏度 (Viscosity) 為757 cps，而硬化溫度則為150°C。

##### (二) 孟宗竹材之真空水熱處理

本試驗將孟宗竹材置於自製之可控溫控壓之半工業級熱處理槽 (槽內部直徑及長度分別為400 及1200 mm) 中，並添加處理槽內體積1/100之蒸餾水 (約1500 mL) 於槽內後，利用抽氣幫浦將槽內壓力降至23 kPa以下，以達到真空狀態。接著，以3 °C/min之升溫速率，將槽內溫度分別升溫至160、180、200、220以及240°C後，於水蒸氣環境下進行不同時程 (4、8以及16 h) 之水熱處理，待試驗結束後冷卻至50°C以下，即可取得各組熱處理材。其中，升溫曲線如圖1





所示，而各組試材之試驗代號、熱處理溫度、持溫時間以及持溫結束時槽內壓力則如表1所示。最後，將試材置於20°C、65% RH之恆溫恆濕室中進行調濕，以供後續試驗之用。

### (三) 膠合剪力試材之製備

本試驗以200 g/m<sup>2</sup>之佈膠量分別對未處理及水熱處理孟宗竹材進行單面佈膠後，將試材以纖維走向平行之方式堆疊。隨後，將試材於壓力1.5 MPa下進行1 min之冷壓後，續於溫度為160°C、壓力為1.5 MPa之條件下進行4 min熱壓，隨即冷卻至室溫，即完成試材之膠合。

### (四) 性質分析

#### 1. 質量損失率 (Mass loss)

本試驗測量真空水熱處理前後試材之絕乾質量後，依下式計算試材之質量損失率。

$$\text{Mass loss (\%)} = [(m_0 - m_1)/m_0] \times 100$$

式中， $m_0$ 為水熱處理前試材之絕乾質量， $m_1$ 為水熱處理後試材之絕乾質量。

#### 2. 表面顏色 (Surface color)

本試驗使用Perkin-Elmer (Lambda 850+, MA, USA) 紫外光-可見光分光光度計搭配Perkin-Elmer (60 mm Pbs, MA, USA) 積分球之方式測量未處理及水熱處理孟宗竹材之表面顏色。檢測時，依國際照明協會制訂之CIE LAB色彩體系，測定試材之明度 ( $L^*$ )、紅綠參數 ( $a^*$ )、黃藍參數 ( $b^*$ )，並進一步計算各組試材水熱處理前後之明度差值 ( $\Delta L^*$ )、紅綠參數差值 ( $\Delta a^*$ )、紅綠參數差值 ( $\Delta b^*$ ) 以及色差值 ( $\Delta E^*$ ) 等數值，其計算公式如下所示。

$$\Delta L^* = L^*_h - L^*_0$$

$$\Delta a^* = a^*_h - a^*_0$$

$$\Delta b^* = b^*_h - b^*_0$$

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

式中， $L^*_h$ 、 $a^*_h$ 以及 $b^*_h$ 分別為真空水熱處試材之明度值、紅綠值以及黃藍值， $L^*_0$ 、 $a^*_0$ 以及 $b^*_0$ 則分別為熱處理前試材之明度值、紅綠值以及黃藍值。

#### 3. 表面影像 (Surface image)

本試驗利用多功能事務機 (PSC1210, HP, Malaysia) 之掃瞄功能，垂直拍攝水熱處理前後孟宗竹材之表面影像。

#### 4. 氣乾密度 (Air-dried density)

本試驗將試材裁切為5 mm (T) × 20 mm (W) × 80 mm (L) 之試片後，置於20°C、65% RH之恆溫恆濕室中調整2週後，測量其長度、寬度以及厚度，並換算其體積，再測量其質量後，依下式計算試材之密度。

$$\text{Air-dried density (kg/m}^3\text{)} = m/V$$

式中， $m$ 為試材調濕後之質量 (kg)， $V$ 為試材調濕後之體積 (m<sup>3</sup>)。

#### 5. 平衡含水率 (Equilibrium moisture content, EMC) 及抗吸濕效能 (Moisture excluding efficiency, MEE)

本試驗將試材裁切為5 mm (T) × 20 mm (W) × 80 mm (L) 之試片後，置於20°C、65% RH之恆溫恆濕室中調整2週後，並測量其質量。接著，將其置於105°C之烘箱中乾燥至恆重，並測量其絕乾質量後，除計算試材之平衡含水率 (EMC) 外，亦參照Hill (2006) 之方法計算試材之抗吸濕效能 (Moisture excluding efficiency, MEE)。

$$\text{EMC (\%)} = (w - w_0)/w_0 \times 100$$

$$\text{MEE (\%)} = (\text{EMC}_u - \text{EMC}_h)/\text{EMC}_h \times 100$$

式中， $w$ 為試材之氣乾質量 (g)， $w_0$ 為試材之絕乾質量 (g)， $\text{EMC}_u$ 為未處理試材之平衡含水率 (%)， $\text{EMC}_h$ 為真空水熱處理材之平衡含水率 (%)。





## 6. 體積膨脹係數 (Volumetric swelling coefficient, S) 及抗膨脹效能 (Anti-swelling efficiency, ASE)

本試驗參照CNS 14927 (2012) 木材體積膨脹率試驗法之試驗方法，將試材裁切為5 mm (T) × 20 mm (W) × 20 mm (L) 之試片後，置於105°C之烘箱中乾燥至恆重，測量其長度、寬度以及厚度，並換算其體積。接著，將其浸漬於20 ± 5°C之蒸餾水中一週後，測量其長度、寬度以及厚度，並換算其體積後，依下列式子計算試材之體積膨脹係數 (S)。同時，本試驗亦參照 Prakash和Mahadevan (2008) 之方法進一步計算其抗膨潤效能 (ASE)，藉此評估真空水熱處理材之抗膨脹性。

$$S (\%) = ((V_1 - V_0)/V_0) \times 100$$

$$ASE (\%) = ((S_u - S_h)/S_u) \times 100$$

式中， $V_0$ 為絕乾狀態下試材之體積， $V_1$ 為吸濕飽水狀態下試材之體積， $S_u$ 為未處理試材之體積膨脹係數 (%)， $S_h$ 為熱處理材之體積膨脹係數 (%)。

## 7. 抗彎性質 (Bending properties)

本試驗先將試材裁切成尺寸為5 mm (T) × 20 mm (W) × 80 mm (L) 之試片，並置於20°C、65% RH之恆溫恆濕機中調整2週後，並測量其長度、寬度及厚度後，以跨距為試材厚度之14倍及載重速度為5 mm/min之試驗條件，且試材竹青側朝上之方式進行中央集中載重抗彎試驗，記錄試片之最大載重值及其經時載重與變形量，並參照 CNS 454 (2013) 木材抗彎試驗法之式子計算試材之抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 及抗彎彈性模數。

$$MOR (N/mm^2, MPa) = 3PL/(2bh^2)$$

$$MOE (N/mm^2, MPa) = \Delta PL^3/(4\Delta Ybh^3)$$

式中，P為最大載重 (N)，L為跨距 (mm)， $\Delta P$ 為比例限界內上限載重與下限載重之差值 (N)， $\Delta Y$ 為 $\Delta P$ 相對之跨距中央之彎曲變形量 (mm)，b為試片寬度 (mm)，h為試片厚度 (mm)。

## 8. 膠合剪力 (Bonding shear strength)

本試驗參照CNS 5809 (1980) 黏著劑之抗剪強度測定法 (壓縮負荷法) 之檢測方法，將膠合後之未處理及水熱處理孟宗竹材裁切成膠合剪斷面積為25 mm × 25 mm之壓縮剪斷膠合試片，並測量其膠合面之長度及寬度後進行常態膠合剪力試驗。試驗時，以9.81 kN/min以下之載重速度進行壓縮抗剪試驗，記錄試片之最大載重值，並依下式計算試材之膠合剪力。

$$\text{Bonding shear strength (MPa)} = P/(b_s h_s)$$

式中，P為最大載重 (N)， $b_s$ 為試片膠合面之寬度 (mm)， $h_s$ 為試片膠合面之長度 (mm)。

## 9. 全反射式傅立葉轉換紅外線光譜分析 (ATR-FTIR)

本試驗利用Perkin-Elmer (Spectrum 100, UK) 傅立葉轉換紅外線光譜儀 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)，搭配全反射式 (Attenuated total reflectance, ATR) 附件，測定試材表面官能基之變化。分析時，所採用之解析度為4 cm<sup>-1</sup>，掃描次數為32 次，掃描波數 (Wavenumber) 範圍為4000-650 cm<sup>-1</sup>。

## 10. 近紅外線光譜分析 (NIR)

本試驗利用Perkin-Elmer (Spectrum Two NTM, UK) 之近紅外線光譜儀 (Near-infrared spectroscopy, NIR)，測定試材表面官能基之變化，並評估不同改質試材間之關聯性。分析時，所採用之解析度為8 cm<sup>-1</sup>，掃描次數為32 次，掃描波數 (Wavenumber) 範圍為10000-4000 cm<sup>-1</sup>。

## 11. X-ray繞射試驗 (XRD)

本試驗使用MAC science (MXP18, Japan) 之X-ray繞射儀 (X-ray diffraction spectroscopy, XRD)，分析試材之結晶變化。分析時，所用的光源為CuK $\alpha$  (40 kV, 30





mA)，掃描角( $2\theta$ )為 $2\text{-}35^\circ$ 。此外，分析所得之結果，則依下列式子計算試材之結晶度(Crystallinity index, CrI) (Hung and Wu, 2010)。

$$\text{CrI (\%)} = ((I_{002} - I_{\text{am}})/I_{002}) \times 100$$

式中， $I_{002}$ 為纖維素002結晶面之最大繞射強度( $2\theta = 22^\circ$ )，而 $I_{\text{am}}$ 則為纖維素非結晶區之繞射強度( $2\theta = 18^\circ$ )。

### (五) 統計分析

本試驗結果利用SAS統計軟體進行單因子變異數分析(One way analysis of variance, ANOVA)，並透過Scheffé檢定(Scheffé test)進行事後檢定分析各組間之差異性，或以學生式T檢定(Student's t-test)評估兩組樣本間之差異(信賴區間為95%)。

## 五、結果與討論：

### (一) 真空水熱處理對孟宗竹材表面顏色之影響

竹材於熱處理過程中，其組成分會發生降解而使表面顏色產生變化，故為了瞭解不同真空水熱處理條件對竹材表面顏色變化之影響，本試驗對試材表面進行影像觀察及顏色參數檢測，其試驗結果分別如圖2及3所示。由圖2中各組試材之表面顏色可以發現，竹材之表面顏色隨熱處理溫度及時間提高而變深，推測造成其原因主要係竹材於熱處理期間會產生具不飽和鍵或苯環結構等發色團之產物所致(Wang et al., 2016)。而圖3則為各組試材之明度( $L^*$ )、紅綠參數( $a^*$ )、黃藍參數( $b^*$ )以及色差值( $\Delta E^*$ )之變化；其中，由圖3a試材之明度值可以發現，未處理孟宗竹材之 $L^*$ 值為72.0，經真空水熱處理後其值則隨真空水熱處理溫度及時間增加而降低。然而，當真空水熱條件提高至 $220^\circ\text{C}/16\text{ h}$ 後，各組試材之 $L^*$ 值即無顯著差異，其值介於26.4-30.5之間。另外，由圖3b中可以得知，未處理孟宗材之 $a^*$ 值為5.1，而經真空水熱處理後試材之 $a^*$ 呈先上升而後下降之趨勢，當熱處理溫度小於 $200^\circ\text{C}$ 時， $a^*$ 值隨熱處理溫度及持溫時間增加而上升。其中，以 $180^\circ\text{C}/16\text{ h}$ 及 $200^\circ\text{C}/4\text{ h}$ 處理材之 $a^*$ 值最大，其值均為10.3；而當處理條件提高至 $240^\circ\text{C}/16\text{ h}$ 時，試材之 $a^*$ 值則降低至3.9。此結果顯示，竹材以較溫和之條件進行真空水熱處理時其顏色偏向紅色，而提高溫度及持溫時間後，其顏色則偏向藍色。然而，孟宗竹材之 $b^*$ 值則呈先持平而後下降之趨勢，當熱處理條件較 $180^\circ\text{C}/8\text{ h}$ 溫和時，未處理及熱處理孟宗竹材之 $b^*$ 值均無顯著差異，其值介於27.4-25.3之間；之後，試材之 $b^*$ 值則隨熱處理溫度及持溫時間增加而降低，且以 $240^\circ\text{C}/16\text{ h}$ 處理材之 $b^*$ 值最小，其值為4.7。此結果顯示，經真空水熱處理後，竹材表面顏色逐漸向冷色系偏移。

此外，由圖3d中試材之色差值變化可以發現，熱處理材之 $\Delta E^*$ 值隨真空水熱處理溫度及持溫時間增加而提高，且以 $240^\circ\text{C}/8\text{ h}$ 及 $240^\circ\text{C}/16\text{ h}$ 處理材之 $\Delta E^*$ 值最高，其值分別為45.4及45.3。而竹材經熱處理後其表面顏色變化之原因，除了半纖維素或纖維素於熱降解過程中產生糠醛、羥甲基糠醛以及脫水葡萄糖等呈色副產物外，木質素亦會發生 $\beta$ -O-4鍵結斷裂之現象，使甲氧基含量降低而提高具不飽和雙鍵及苯環結構化合物等發色團含量，且木質素之熱降解溫度較半纖維素及纖維素為高，故經熱處理後含有較多發色團之木質素之影響提高，導致竹材之顏色變深。最後，抽出成分之降解並遷移至竹材表面，亦為竹材表面顏色加深之原因(謝茗期, 2021；Bekhta et al., 2014；Sundqvist and Moren, 2002；Cademartori et al., 2013；Sehlstedt-Persson, 2003；Sandoval-Torres et al., 2012)。

### (二) 真空水熱處理對孟宗竹材物理性質之影響

竹材經熱處理後，其熱降解程度會影響竹材之性質，故為了瞭解不同真空水熱處理條件對竹材熱降解程度之影響，本試驗檢測各組熱處理材之質量損失率，其試驗結果如表2所示。由表中結果可以發現，真空水熱處理材之質量損失率隨處理溫度及持溫時間增加而提高，且當熱處理條件低於 $200^\circ\text{C}/8\text{ h}$ 時，真空水熱處理材之質量損失率均小於10%；之後，真空水熱處理材之質





量損失率則有大幅提高之現象。推測其原因主要係於熱處理初期，熱處理材之質量損失率主要來自於吸著水及抽出成分之揮發所致 (Esteves et al. 2008; Winandy and Lebow, 2001)。而當熱處理溫度及持溫時間提高時，竹材之半纖維素開始降解，並產生甲酸及醋酸等酸性降解產物，進而促進多醣類及木質素降解，且此現象隨熱處理溫度及持溫時間增加而提高。同時，當熱處理條件進一步提高至 $220^{\circ}\text{C}/8\text{ h}$ 後，竹材質量損失率則大幅提高至16.6%，顯示於高溫及長時間之熱處理條件下，纖維素可能開始降解，導致孟宗竹之質量損失率顯著提高。此外，當熱處理溫度低於 $220^{\circ}\text{C}$ 時，本試驗之質量損失率均較李承濬 (2020) 柳杉水熱處理及謝茗期 (2021) 繼大杉真空水熱處理之研究為高，其質量損失率分別介於2.7-13.0%及1.7-9.6%，而本試驗真空水熱處理材之質量損失率介於1.7-19.3%。推測其原因，主要係熱處理溫度低於 $220^{\circ}\text{C}$ 時，木竹材之質量損失主要來自半纖維素之降解，故木竹材中甘露糖 (Mannose)、阿拉伯糖 (Arabinose)、木糖 (Xylose) 以及半乳糖 (Galactose) 等含量均隨熱處理溫度及持溫時間增加而降低 (Mburu et al., 2008; Brito et al., 2008)。根據本計畫第一年之成果得知，9月伐採孟宗竹材之半纖維素含量為19.7%；相對的，繼大杉及柳杉所含五碳糖之比例分別為8.0及12.1% (郭寶章, 1995)，故推測此為本計畫之質量損失率較繼大杉及柳杉為高之影響因子。

另外，由表2中各組試材之氣乾密度可以得知，未處理孟宗竹材之氣乾密度為 $771\text{ kg/m}^3$ ，而真空水熱處理材之氣乾密度中除 $220^{\circ}\text{C}/16\text{ h}$  ( $596\text{ kg/m}^3$ ) 外，各處理材之氣乾密度與未處理材間均無顯著差異，其值介於627-720  $\text{kg/m}^3$ 之間。然而，以學生式T檢定進行分析則發現，除 $160^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 、 $160^{\circ}\text{C}/8\text{ h}$ 以及 $200^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 之氣乾密度 ( $695\text{-}720\text{ kg/m}^3$ ) 與未處理材為顯著差異 ( $p < 0.05$ ) 外，各組真空水熱處理材之氣乾密度與未處理材均具有極顯著差異 ( $p < 0.001$ )。

另一方面，為了瞭解不同真空水熱處理條件對竹材吸濕性之影響，本試驗將各組試材置於 $20^{\circ}\text{C}/65\%$  RH之環境下調濕至恆重後，計算其平衡含水率 (EMC) 及抗吸濕效能 (MEE)。由表2之試驗結果可以發現，於 $20^{\circ}\text{C}/65\%$  RH之環境下，未處理材之EMC為11.5%，而經真空水熱處理後，當熱處理溫度低於 $220^{\circ}\text{C}$ 時，其EMC值隨熱處理溫度及持溫時間增加而降低；之後，其值則有提高之現象。其中，又以 $200^{\circ}\text{C}/16\text{ h}$ 真空水熱處理材之EMC最低，其值為5.6%，且MEE達51%。然而， $160^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 真空水熱處理材之EMC (8.4%) 即與未處理材具有顯著差異，且MEE為27%，顯示以較低溫度 ( $160^{\circ}\text{C}$ ) 對孟宗竹材進行短時間 (4 h) 之真空水熱處理即可有效降低其吸濕性。此外，為了瞭解不同真空水熱處理條件對孟宗竹材吸水性及尺寸安定性之影響，本試驗將各組試材浸漬於 $20^{\circ}\text{C}$ 之水中，並檢測其體積膨脹係數 (S) 及抗膨潤效能 (ASE)，其試驗結果如表3所示。由表中可以發現，未處理孟宗竹材之S值為14%，而經真空水熱處理後，各組試材之S值則隨處理溫度及持溫時間增加而降低，且當真空水熱處理條件為 $160^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 時，熱處理材之S值 (10%) 即與未處理者具有顯著差異，顯示以 $160^{\circ}\text{C}$ 對孟宗竹材進行短時間 (4 h) 之真空水熱處理即可有效改善其尺寸安定性。同時，當處理條件提高至 $200^{\circ}\text{C}/8\text{ h}$ 後，真空水熱處理之S值即無顯著變化，其值介於3-4%。另外，由表中各組試材之ASE值可以發現，除 $240^{\circ}\text{C}/16\text{ h}$ 熱處理材外，其ASE值均隨熱處理溫度及持溫時間增加而提高，且以 $240^{\circ}\text{C}/8\text{ h}$ 熱處理材最佳，其值為78%。然而，當真空水熱處理條件達 $200^{\circ}\text{C}/8\text{ h}$ 後，各組熱處理材之ASE即無顯著差異，且其ASE均高於71%，顯示以 $200^{\circ}\text{C}$ 對孟宗竹材進行8 h之真空水熱處理即達到改善孟宗竹材尺寸安定性之最佳效果。另一方面，比對各組真空水熱處理材之質量損失率及其S值可以得知，於質量損失率達10%前，真空水熱處理材之S值隨質量損失率增加而大幅降低，而後則無顯著差異。綜合上述試驗結果可以得知，真空水熱處理可有效降低竹材之吸濕性及尺寸膨脹率。推測造成此現象之原因主要有下列3點：其一為真空水熱處理期間水合氫離子加速多醣類之降解反應，使竹材之可及性羥基減少，進而減少水分子可吸附之位置，而使竹材之吸濕性降低；其二則為半纖維素降解產生之酸性降解產物使非結晶區之纖維素降解，而提高竹材之相對結晶度，進而使水分不易進入；其三為木質素與多醣類之熱降解產物發生重排及交聯反應，除減少竹材之羥基





數量外，多醣類降解後縮合亦會產生較疏水之糠醛分子，此亦會降低竹材之親水性（謝茗期，2021；Altgen et al., 2018；Esteves and Pereira, 2009；Yin et al., 2011）。

### （三）真空水熱處理對孟宗竹材機械性質之影響

為了瞭解真空水熱處理條件對孟宗竹材機械性質之影響，本試驗檢測各組試材之抗彎性質及膠合剪力，其試驗結果如表4所示。由表中抗彎彈性模數（MOE）之試驗結果可以發現，未處理孟宗竹材之MOE為11.1 GPa，而真空水熱處理孟宗竹材中除220°C/16 h (7.9 GPa) 及240°C/16 h (7.9 GPa) 外，各處理材之MOE與未處理材間均無顯著差異，其值介於9.0-11.0 GPa之間。此試驗結果顯示，當真空水熱處理條件較220°C/16 h及240°C/16 h溫和時，真空水熱處理對孟宗竹材之MOE無顯著影響。推測造成此現象之原因，主要係木質材料於熱處理期間會產生比氫鍵能量為高之化學鍵結，且自由體積因氫鍵斷裂而增加，亦促進細胞壁基質之彈性，進而提高熱處理材之剛性（Windeisen et al., 2009；Altgen et al., 2016）；同時，半纖維素降解而減少纖維素和木質素間之應力傳遞，及木質材料熱降解產生之酸性副產物亦加速主成分降解而破壞木質細胞結構，則導致其MOE降低（Gündüz et al., 2009；Borrega and Kärenlampi, 2007；Gawron et al., 2011）。因上述二者之影響達到平衡，故使熱處理孟宗竹材之MOE與未處理者無顯著差異。然而，當真空水熱處理條件提高至220°C/16 h及240°C/16 h時，半纖維素降解及產生醋酸之影響較高，導致此二組熱處理材之MOE較未處理者為低。再者，由表中結果亦可以得知，當真空水熱處理溫度低於200°C時，熱處理時間對試材之MOE無顯著影響。然而，當溫度提高至220°C以上時，試材之MOE則有隨水熱處理時間增加而下降之趨勢。

至於抗彎強度（MOR）方面，未處理孟宗竹材之MOR為165 MPa，而真空水熱處理孟宗竹材中除160°C/4 h (132 MPa) 外，各處理材之MOR與未處理材間均具有顯著差異，且隨熱處理條件加劇而降低，其值介於55-127 MPa之間。推測其原因，主要係經真空水熱處理後，孟宗竹材中半纖維素降解並產生醋酸，進而使其抗彎強度降低（Yun et al., 2016）。再者，當熱處理條件進一步提高至220°C/8 h後，其MOR大幅降低，且此時熱處理孟宗竹材之質量損失率亦大幅提高至16.6%，故推測其MOR大幅降低之原因主要係纖維素開始降解所致。而此試驗結果與卓志隆和陳志昇（2014）及謝茗期（2021）指出，當熱處理材之質量損失率大於10%時，強度性質大幅降低之研究結果相似。

此外，由各組真空水熱處理孟宗竹材之膠合強度檢測結果可以得知，未處理孟宗竹材之膠合強度為2.3 MPa，而以160°C進行真空水熱處理時，對孟宗竹材之膠合強度無顯著影響，其值介於1.9-2.3 MPa之間。相對的，當熱處理溫度提高至200及220°C時，則有助於提高孟宗竹材之膠合強度，其值介於2.6-4.2 MPa之間。推測於此溫度進行熱處理時，由於水分之蒸發及半纖維素之降解，使孟宗竹材之細胞壁產生微裂紋，進而使膠合劑更容易滲透進孟宗竹材，並產生固錨作用所致（Taghiyari et al., 2013）。然而，當熱處理溫度進一步提高至240°C時，熱處理孟宗竹材之膠合強度則降低至1.2-1.7 MPa之間。推測其原因主要係，於此溫度下進行真空水熱處理時，孟宗竹材之細胞壁厚度降低，且易與膠合劑反應之低極性基團產生化學結構之變化，使膠合劑之附著力降低（Taghiyari and Moradi, 2014；Taghiyari et al., 2013）。同時，半纖維素及纖維素降解，使竹材機械性質降低，亦可能為真空水熱處理孟宗竹材之膠合剪力降低之原因之一（Can et al., 2021）。然而，由表中膠合剪力之試驗結果可以發現，各組試材之樣本數僅為3，且多組試材仍具有較高之標準差。造成此現象之原因主要係，孟宗竹材經真空水熱處理後均有些微變形之現象且試片較小，故試片於佈膠及黏合時不易進行，導致膠合試片常有脫膠及試片密合度不足之現象；同時，抽出成分於熱處理過程中產生疏水性熱降解產物並遷移至試材表面，亦容易造成熱處理孟宗竹材與PF膠間親和力不足，使得多數膠合剪力試材於試驗前即發生脫離之現象。因此，本計畫膠合剪力之試驗結果無法充分展現真空水熱處理對孟宗竹材膠合性之影響。

綜合上述物理及機械性質之試驗結果可以得知，以160°C進行4 h之真空水熱處理即能有效降低孟宗竹材之吸濕性，並提高尺寸安定性；同時，質量損失率僅1.7%，更能保有約80%之抗彎強度。





度，且對孟宗竹材和PF膠之膠合剪力無顯著影響，故實為國產孟宗竹材之最適化真空水熱處理條件。然而，不同真空水熱處理條件所製備熱處理竹材之抗吸濕性、尺寸安定性以及機械性質均有所差異，故本計畫之研究成果實能作為未來相關產業研發客製化真空水熱處理竹材製品之資料庫，針對不同需求以適當之真空水熱處理條件製備熱處理竹材，降低對竹材資源及能源之浪費。

#### （四）真空水熱處理對孟宗竹材化學性質之影響

竹材與木材相似，於熱處理過程中化學組成分之結果均會有所變化，如半纖維素發生去乙醯基反應（Deacetelyation）、解聚合反應（Depolymerization）以及脫水反應（Dehydration）

（Song et al., 2018）；木質素發生結構改變、縮合反應（Condensation）以及交聯反應（Cross linking）（Wikberg and Maunu, 2004；Nuopponen et al., 2004）；而抽出物質則產生揮發物質及生成新化合物等（Hill, 2006）。而傅立葉轉換紅外線光譜（FTIR）及近紅外線光譜（NIR）均為快速、方便之光譜分析技術，且已廣泛應用於探討木材化學結構變化之分析方法（Popescu et al., 2007）。因此，為瞭解不同真空水熱處理條件對孟宗竹材表面化學官能基之影響，本試驗以FTIR及NIR對各組試材進行分析，其試驗結果分別如圖4及圖5所示。由圖4中FTIR圖譜可以發現，竹材主成分之官能基主要分布於波數 $3800\text{--}2750\text{ cm}^{-1}$ 及 $1800\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ 之指紋圖譜區。其中，波數 $3340\text{ cm}^{-1}$ 為竹材中羥基（-OH）之特定吸收峰，波數 $2910\text{ cm}^{-1}$ 為亞甲基（C-H）之非對稱伸縮振動吸收峰，波數 $1730\text{ cm}^{-1}$ 為乙醯基中羰基（C=O）之伸縮振動吸收峰，波數 $1600\text{、}1510$ 以及 $1250\text{ cm}^{-1}$ 均為木質素苯環（C=C）之特定吸收峰。而竹材經真空水熱處理後，於波數 $3340\text{ cm}^{-1}$ 之羥基吸收峰強度降低，顯示竹材之半纖維素於熱處理過程中降解為醋酸，並催化纖維素及半纖維素之羥基行脫水反應，進而使試材中之羥基減少（Kubovský et al., 2020；Wang et al., 2020）。

另外，於波數 $1730\text{ cm}^{-1}$ 之半纖維素上乙醯基之吸收峰強度除了有降低之趨勢外，亦往低波數位移，顯示竹材於熱處理過程中，半纖維素產生去乙醯基反應並產生酸性降解產物

（Tjeerdsma and Militz, 2005；Gao et al., 2018）。其中，酸性降解產物主要係由葡萄糖鏈上甲酸酯之羧酸基所形成之甲酸，及由甲基葡萄糖醛酸木聚醣（Methylglucuronoxylan）中乙酸酯之乙醯基熱裂解而產生之醋酸（Sundqvist et al., 2006）。相對的， $1250\text{、}1510$ 以及 $1600\text{ cm}^{-1}$ 等木質素苯環（C=C）之特定吸收峰經真空水熱處理後則有提高之情形，且提高幅度隨熱處理溫度上升而增加，顯示真空水熱處理竹材之木質素相對含量較未處理者為高，此試驗結果與Yuan等人（2021）及Li等人（2022）之研究結果相似。推測造成此現象之原因，除了木質素 $\beta$ -O-4鍵結於熱處理過程中斷裂而產生之游離酚類化合物和 $\alpha$ 及 $\beta$ 羥基化合物進一步發生交聯反應之外（Tjeerdsma and Militz, 2005；Nuopponen et al., 2004）；木質素上甲氧基受熱斷裂後，其芳香環上新生成之反應位置亦可能進一步產生縮合反應（Wikberg and Maunu, 2004），進而提高木質素之吸收峰強度。

此外，由圖中亦可以發現，當熱處理溫度提高至 $220$ 及 $240^{\circ}\text{C}$ 時，於波數 $898\text{ cm}^{-1}$ 之纖維素或半纖維素C<sub>1</sub>位置之C-H特定吸收峰強度有降低之現象，顯示纖維素於高溫下會產生降解反應，此試驗結果與李承濬（2020）、Özgenç等人（2017）以及Chien等人（2018）之研究結果相似。推測其原因主要係，半纖維素於真空水熱處理過程中發生去乙醯基反應及脫水反應，並生成有機酸降解產物，導致纖維素及半纖維素發生酸水解反應而降低其聚合度，進而使吸收峰強度降低（李承濬，2020；Garrote et al., 1999；Jeong and Lee, 2015）。

另一方面，由圖5中真空水熱處理孟宗竹材之NIR圖譜可以發現，竹材之NIR圖譜與木材相似，主要可分為下列5個區域：波數 $9000\text{--}7500\text{ cm}^{-1}$ 為醣類及木質素之甲氧基及亞甲基中C-H官能基之第1及第2倍頻彎曲振動吸收；波數 $7500\text{--}6100\text{ cm}^{-1}$ 為C-H官能基第1倍頻吸收帶及O-H官能基第1倍頻伸縮振動吸收；波數 $6100\text{--}5400\text{ cm}^{-1}$ 為脂肪族及芳香族中C-H官能基伸縮振動及所有主成分之O-H官能基振動吸收；波數 $5400\text{--}4525\text{ cm}^{-1}$ 為C=O官能基、O-H官能基以及芳香族之伸縮





及變形振動等吸收峰；波數4525-4000  $\text{cm}^{-1}$ 為C-H官能基伸縮及變形振動吸收（謝茗期，2021；Popescu et al., 2018）。其中，各組試材於波數5166  $\text{cm}^{-1}$ 處均具有顯著之吸收峰，且經真空水熱處理後有降低之趨勢。而根據Schwanninger等人（2011）指出，此吸收峰為試材中水分子之氫鍵，且氫鍵對此吸收峰強度之影響較羰基為高。因此，推測造成此吸收峰強度降低之原因，主要係孟宗竹材經真空水熱處理後，其表面之羥基含量降低，使其親水性降低所致。同時，於波數6882  $\text{cm}^{-1}$ 處羥基第1倍頻吸收峰之強度亦有降低之趨勢，亦可印證上述之推測。此外，波數9000-7500  $\text{cm}^{-1}$ 處之寬吸收峰隨真空水熱處理溫度提高而降低，而基線之吸收強度則隨之提高，推測其原因主要係此波段受試材顏色及粒徑大小之影響，熱處理後竹材表面顏色加深所致（Bächle et al., 2010；Schwanninger et al., 2011）。另外，根據Yang等人（2018）指出，此波段包含波數8654及8450  $\text{cm}^{-1}$ 處C-H第2倍頻及第1倍頻之吸收峰、波數8238  $\text{cm}^{-1}$ 處C-H第2倍頻之吸收峰以及波數7410  $\text{cm}^{-1}$ 處半纖維素乙醯基C-H第1倍頻之吸收峰。因此，推測造成此波段吸收峰強度降低之原因主要係熱處理溫度提高時，纖維素開始產生熱降解且半纖維素產生去乙醯化反應所致。

為瞭解孟宗竹材經真空水熱處理後結晶度之變化，本計畫以XRD檢測各組試材之結晶結構，並進一步計算其結晶度。由圖6之試驗結果可以得知，未處理及各組真空水熱處理孟宗竹材於掃描角15°及22°處均具有明顯之繞射峰，其分別代表纖維素101/101以及002結晶面之繞射峰；且真空水熱處理材之繞射峰並無顯著位移現象，顯示真空水熱處理對孟宗竹材之纖維素結晶結構無顯著影響。另外，由各組試材之結晶度可以得知，未處理孟宗竹材之結晶度約為71%，而經真空水熱處理後，對其結晶度並無顯著影響，其結晶度介於65-76%。根據Yun 等人（2015）研究指出，於高溫下進行熱處理時，纖維素分子鏈會發生脫水及縮合反應並產生醚鍵，使非結晶區之微纖維排列整齊，進而使結晶度些微提高。推測造成此差異之原因，主要係本試驗所使用孟宗竹材之結晶度較高，進而使其結晶度於真空水熱處理過程中無顯著變化。而竹材之纖維素結晶度為影響其MOE之重要因子之一，故未處理及各組真空水熱處理孟宗竹材之結晶度無顯著差異，亦可能為上述各組孟宗竹材之MOE無顯著差異之因子。

## 六、結論：

本計畫以秋季（9月）伐採之國產孟宗竹材為試材，並利用真空水熱處理技術於不同處理條件下對孟宗竹材進行熱改質，除評估其表面顏色、其質量損失率、氣乾密度、平衡含水率等物理性質之變化外，亦檢測抗彎性質、膠合性質以及化學結構之變化，以尋求最適化之真空水熱處理條件。試驗結果顯示，孟宗竹材之表面顏色隨熱處理溫度及持溫時間增加而變深，且孟宗竹材之明度值（ $L^*$ ）亦隨真空水熱處理之溫度及持溫時間增加而降低，其值由未處理材之72.0降低至240°C/16 h處理材之26.5。而孟宗竹材經熱處理後，其紅綠參數（ $a^*$ ）值則呈先上升而後下降之趨勢，且以180°C/16 h及200°C/4 h處理材之 $a^*$ 值最大，其值均為10.3。然而，孟宗竹材之黃藍參數（ $b^*$ ）則呈先持平而後下降之趨勢，當熱處理條件較180°C/8 h溫和時，未處理及熱處理孟宗竹材之 $b^*$ 值均無顯著差異，其值介於27.4-25.3之間；之後，試材之 $b^*$ 值則隨熱處理溫度及持溫時間增加而降低。相對的，熱處理材之色差值（ $\Delta E^*$ ）則隨熱處理溫度及持溫時間增加而提高，且以240°C/8 h 及240°C/16 h處理者最高，其值分別為45.4及45.3。

另外，真空水熱處理材之質量損失率隨處理溫度及持溫時間增加而提高，且當熱處理條件低於200°C/8 h時，真空水熱處理材之質量損失率均小於10%；之後，真空水熱處理材之質量損失率則有大幅提高之現象。而真空水熱處理材之氣乾密度中除220°C/16 h (596 kg/m<sup>3</sup>) 外，各處理材之氣乾密度與未處理材間均無顯著差異，其值介於627-720 kg/m<sup>3</sup>之間。至於真空水熱處理對孟宗竹材吸濕性及尺寸安定性之影響方面，於20°C/65% RH之環境下，未處理材之EMC為11.5%，而經真空水熱處理後，160°C/4 h真空水熱處理材之EMC (8.4%) 即與未處理材具有顯著差異，且MEE為27%，顯示以較低溫度 (160°C) 對孟宗竹材進行短時間 (4 h) 之真空水熱處





理即可有效降低其吸濕性。同時，竹材之體積膨脹係數亦具有相似之試驗結果，當孟宗竹材以 $160^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 進行真空水熱處理後，其體積膨脹係數即由未處理材之14%降低至10%，且二者間具有顯著差異。同時，當處理條件提高至 $200^{\circ}\text{C}/8\text{ h}$ 後，真空水熱處理之S值即無顯著變化，其值介於3-4%，顯示以 $200^{\circ}\text{C}$ 對孟宗竹材進行8 h之真空水熱處理即達到改善孟宗竹材尺寸安定性之最佳效果。

再者，真空水熱處理孟宗竹材中除 $220^{\circ}\text{C}/16\text{ h}$  (7.9 GPa) 及 $240^{\circ}\text{C}/16\text{ h}$  (7.9 GPa) 外，各處理材之MOE與未處理材間均無顯著差異，其值介於9.0-11.0 GPa之間。然而，MOR方面，除 $160^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$  (132 MPa) 外，各處理材之MOR與未處理材 (165 MPa) 間均具有顯著差異，且隨熱處理條件加劇而降低，其值介於55-127 MPa之間。另一方面，FTIR、NIR以及XRD之結果顯示，孟宗竹材於真空水熱處理過程中，半纖維素熱降解而發生去乙醯基及脫水反應，使羥基及乙醯基含量降低，進而提高孟宗竹材之疏水性及尺寸安定性。同時，於真空水熱處理過程中，木質素之甲氧基及脂肪族側鏈斷裂後會進一步發生縮合及交聯反應，使木質素之相對含量提高，進而提高木質素特性吸收峰之強度。然而，真空水熱處理對孟宗竹材纖維素之結晶結構及結晶度均無顯著影響。

綜合上述試驗結果可以得知，以 $160^{\circ}\text{C}$ 進行4 h之真空水熱處理即能有效降低孟宗竹材之吸濕性，並提高尺寸安定性；同時，質量損失率僅1.7%，更能保有約80%之抗彎強度，可於不影響竹材機械性質之情形下，有效提高孟宗竹材之吸濕性及尺寸安定性，故實為兼具物理及機械性質之國產孟宗竹材最適化真空水熱處理條件。本計畫已順利達成今年度之目標，除了完成不同真空水熱處理條件之熱改質孟宗竹材之製備外，各組熱改質竹材之物理機械性質檢測及化學結構分析業已完成。此外，不同真空水熱處理條件所製備熱處理竹材之抗吸濕性、尺寸安定性以及機械性質均有所差異，故本計畫之研究成果實能作為未來相關產業研發客製化真空水熱處理竹材製品之資料庫，針對不同需求以適當之真空水熱處理條件製備熱處理竹材，降低對竹材資源及能源之浪費。

## 七、參考文獻：

1. 中華民國國家標準CNS 454 (2013) 木材抗彎試驗法。經濟部標準檢驗局。
2. 中華民國國家標準CNS 5809 (1980) 黏著劑之抗剪強度測定法（壓縮負荷法）。經濟部標準檢驗局。
3. 中華民國國家標準CNS 14927 (2012) 木材體積膨脹率試驗法。經濟部標準檢驗局。
4. 文化部 (2014) 台灣竹產業基礎調查與竹林研發調查。2014年12月15日。取自：  
[http://cci.culture.tw/cci/cci/market\\_detail.php?sn=9728](http://cci.culture.tw/cci/cci/market_detail.php?sn=9728)
5. 王瀛生、吳孟玲 (2010) 台灣竹材替代木質材料展現竹之美。林業研究專刊17(4)：54-60。
6. 李承濬 (2020) 水熱處理對柳杉木材物理機械及潛變性質之影響。國立中興大學森林學系碩士論文。94頁。
7. 卓志隆、陳志昇 (2014) 热處理對三種國產人工林木材力學性質之影響。林業工業 33 (1)：1-12。
8. 吳仕揚 (2015) 竹齡及高度對孟宗竹及其竹展開板物理及機械性質之影響。國立中興大學森林學系碩士論文。67頁。
9. 邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬 (2015) 第4次全國森林資源調查成果概要。台灣林業 41(4)：3-13。
10. 邱祈榮 (2011) 竹林面積知多少？林業研究專訊18：16-18。
11. 郭寶章 (1995) 臺灣貴重針葉五木。中華林學會叢書956號。510頁。
12. 路統信 (1986) 我國竹類植物及其地理分佈。現代育林2(1)：85-94。





13. 謝茗期 (2021) 真空水熱處理對櫟大杉木材物理化學、抗生物性及潛變性質之影響。國立中興大學森林學系碩士論文。120頁。
14. Altgen, M., W. Willems, and H. Militz (2016) Wood degradation affected by process conditions during thermal modification of European beech in a high-pressure reactor system. *Eur. J. Wood Prod.* 74:653-662.
15. Altgen, M., T. Uimonen, and L. Rautkari (2018) The effect of de- and repolymerization during heat-treatment on the mechanical behavior of Scots pine sapwood under quasi-static load. *Polym. Degrad. Stabil.* 147:197-205.
16. ASTM D 2395-07a (2007) Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. ASTM international, West Conshohocken, PA.
17. ASTM D 4442-07 (2007) Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. ASTM international, West Conshohocken, PA.
18. Bächle H., B. Zimmer, E. Windeisen, and G. Wegener (2010) Evaluation of thermally modified beech and spruce wood and their properties by FT-NIRspectroscopy. *Wood Sci. Technol.* 44(3):421.
19. Borrega, M. and P. Kärenlampi (2007) Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 66:63-69.
20. Breliid, P. L., R. Simonson, O. Bergman, and T. Nilsson (2000) Resistance of acetylated wood to biological degradation. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 58:331-337.
21. Brito, J. O., F. G. Silva, M. M. Leão, and G. Almeida (2008) Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. *Bioresour. Technol.* 99(18):8545-8548.
22. Cao, Y., J. Lu, R. Huang, and J. Jiang (2012) Increased dimensional stability of Chinese fir through steam-heat treatment. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 70:441-444.
23. Can, A., T. Krystofiak, and B. Lis (2021) Shear and adhesion strength of open and closed system heat-treated wood samples. *Maderas-Cienc. Tecnol.* 23: 32.
24. Esteves, B. and H. Pereira (2009) Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources* 4:370-404.
25. Esteves, B. M., J. Graça, and H. M. Pereira (2008) Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. *Holzforschung* 62:344-351.
26. Fujino, T., J. M. Calderon-Moreno, S. Swamy, T. Hirose, and M. Yoshimura (2002) Phase and structural change of carbonized wood materials by hydrothermal treatment. *Solid State Ionics* 151:197-203.
27. Garrote, G., H. Domínguez, and J. C. Parajó (1999) Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 57:191-202.
28. Gawron, J., M. Grzeskiewicz, J. Zawadzki, T. Zielenkiewicz, and A. Radomski (2011) The influence of time and temperature of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) heat treatment in superheated steam on the carbohydrates content. *Wood Res.* 56:213-220.



29. Gao, L., W. Guo, and S. Luo (2018) Investigation of changes in compressed moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) after hot-press molding. *J. Wood Sci.* 64(5):557-565.
30. Gündüz, G., D. Aydemir, and G. Karakas (2009) The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. *Mater. Des.* 30(10):4391-4395.
31. Hill, C. A. S. (2006) Wood modification: Chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons Ltd, England. 239 pp.
32. 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.
33. Icel, B., G. Guler, O. Isleyen, A. Beram, and M. Mutlubas (2015) Effects of industrial heat treatment on the properties of spruce and pine woods. *Bioresources* 10:5159-5173.
34. Jeong, S. Y., and J. W. Lee (2015) Hydrothermal Treatment. In: A. Pandy, S. Negi, P. Binod and C. Larroche eds. Pretreatment of biomass: processes and technologies. Elsevier, Amsterdam. pp. 61-74.
35. Korkut, S. and I. Bektas (2008) The effects of heat treatment on physical properties of Uludag fir (*Abies bornmuelleriana* Mattf.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Forest Prod. J.* 58:95-99.
36. Kubovský, I., D. Kaíková, and F. Kaík (2020) Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification. *Polymers* 12(2):485-496.
37. Li, Z. Z., Y. Luan, J. B. Hu, C. H. Fang, L. T. Liu, Y. F. Ma, Y. Liu, and B. H. Fei (2022) Bamboo heat treatments and their effects on bamboo properties. *Constr. Build. Mater.* 331:127320.
38. Lovri, A., V. Zdravković, R. Popadić, and G. Milić (2017) Properties of plywood boards composed of thermally modified and non-modified Poplar veneer. *Bioresources* 21:8581-8594.
39. Martínez, Á. T., M. S. Francisco, J. Ruiz-Dueñas, P. Ferreira, S. Camarero, F. Guillén, M. J. Martínez, A. Gutiérrez, and J. C. del Río (2005) Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *Int. Microbiol.* 8:195-204.
40. Mburu, F., S. Dumarçay, J. F. Bocquet, M. Petrissans, and P. Gérardin (2008) Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevillea robusta* wood. *Polym. Degrad. Stab.* 93(2): 401-405.
41. Nuopponen, M., T. Vuorinen, S. Jämsä, and P. Viitaniemi (2004) Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies. *J. Wood Chem. Technol.* 24(1):13-26.
42. Ohnesorge, D., A. Tausch, I. Krowas, C. Huber, G. Becker, and S. Fink (2009) Laboratory tests on the natural durability of six different wood species after hydrothermal treatment. In: Proceeding of 4th European Conference on Wood Modification. Stockholm, Sweden. pp. 159-164.



43. Özgenç, Ö., S. Durmaz, I. H. Boyaci, and H. Eksi-Kocak (2017) Determination of chemical changes in heat-treated wood using ATR-FTIR and FT Raman spectrometry. *Spectrochim. Acta A Mol.* 171:395-400.
44. Popescu, C. M., M. C. Popescu, G. Singurel, C. Vasile, D. S. Argyropoulos, and S. Willfor (2007) Spectral characterization of eucalyptus wood. *Appl. Spectrosc.* 61(11):1168-1177.
45. Prakash, G. K. and K. M. Mahadevan (2008) Enhancing the properties of wood through chemical modification with palmitoyl chloride. *Appl. Surf. Sci.* 254: 1751-1756.
46. Rowell, R. M., R. E. Ibach, J. McSweeny, and T. Nilsson (2009) Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood. In: Proceeding of 4th European Conference on Wood Modification. Stockholm, Sweden. pp. 489-502.
47. Schwanninger, M., J. C. Rodrigues, and K. Fackler (2011) A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *J. Near Infrared Spec.* 19:287-308.
48. Song, K., I. Ganguly, I. Eastin, C. Dou, R. Bura, and A. Dichiara (2018) Structure-property relationships of hydrothermally treated western hemlock. *SN Appl. Sci.* 1(84).
49. Sundqvist, B., O. Karlsson, and U. Westermark (2006) Determination of formic acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. *Wood Sci. Technol.* 40: 549-561.
50. Taghiyari, H. R., A. Enayati, and H. Gholamiyan (2013) Effects of nano-silver impregnation on brittleness, physical and mechanical properties of heat-treated hardwoods. *Wood Sci Technol.* 47(3):467-480.
51. Taghiyari, H. R. and M. B. Moradi (2014) Effect of heat treatment on longitudinal gas and liquid permeability of circular and square-shaped native hardwood specimens. *Heat Mass Transf.* 50(7):1125-1136.
52. Tjeerdsma, B. F. and H. Militz (2005) Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 63:102-111.
53. Wang, X., J. Liu, and Y. Chai (2012) Thermal, mechanical, and moisture absorption properties of wood-TiO<sub>2</sub> composites prepared by a sol-gel process. *Bioresources* 7:893-901.
54. Wang, Q., X. Wu, C. Yuan, Z. Lou, and Y. Li (2020) Effect of saturated steam heat treatment on physical and chemical properties of bamboo. *Molecules* 25(8):1999.
55. Wentzel, M., A. Roller, H. Pesenti, and H. Militz (2019) Chemical analysis and cellulose crystallinity of thermally modified *Eucalyptus nitens* wood from open and closed reactor systems using FTIR and Xray crystallography. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 77:517-525.
56. Wikberg, H. and S. Maunu (2004) Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by <sup>13</sup>C CPMAS NMR. *Carbohydr. Polym.* 58:461-466.





57. Winandy, J. E., and P. K. Lebow (2001) Modeling wood strength as a function of chemical composition: An individual effects model. *Wood Fiber Sci.* 33(2): 239-254.
58. Windeisen, E., H. Bachle, B. Zimmer, and G. Wegener (2009) Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. *Holzforschung* 63(6):773-778.
59. Yang, S., Z. Jiang, H. Ren, and B. Fei (2010) Determination of cellulose crystallinity of bamboo culms with X-ray diffraction spectrum. *Journal of Northeast Forestry University* 38(8):75-77.
60. Yin, Y., M. Bian, K. Song, F. Xiao, and J. Xiaomei (2011) Influence of microfibril angle on within-tree variations in the mechanical properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). *IAWA journal* 32(4):431-442.
61. Yuan, T., Z. Wang, X. Han, Z. Yuan, X. Wang, and Y. Li (2021) Multi-scale evaluation of the effect of saturated steam on the micromechanical properties of Moso bamboo. *Holzforschung* 75(11):1052-1060.
62. Yun, H., D. Tu, K. Li, J. Huang, and L. Ou (2015) Variation and correlation of heat-treated wood's crystalline structure and impact toughness. *Bioresources* 10:1487-1494.
63. Yun, H., K. Li, D. Tu, C. Hu, and G. C. South (2016) Effect of heat treatment on bamboo fiber morphology crystallinity and mechanical properties. *Wood Res.* 61(2):227-234.
64. Zheng, R., M. A. Tshabalala, Q. Li, and H. Wang (2015) Construction of hydrophobic wood surfaces by room temperature deposition of rutile ( $TiO_2$ ) nanostructures. *Appl. Surf. Sci.* 328:453-458.





表 1. 真空水熱處理之製程條件

Table 1. Set point parameters applied during the VH treatment processes

Sample code	Temperature (°C)	Duration (h)	Pressure (MPa)
160°C/4 h	160 ± 5	4	0.12
160°C/8 h	160 ± 5	8	0.14
160°C/16 h	160 ± 5	16	0.16
180°C/4 h	180 ± 5	4	0.19
180°C/8 h	180 ± 5	8	0.24
180°C/16 h	180 ± 5	16	0.26
200°C/4 h	200 ± 5	4	0.28
200°C/8 h	200 ± 5	8	0.34
200°C/16 h	200 ± 5	16	0.44
220°C/4 h	220 ± 5	4	0.48
220°C/8 h	220 ± 5	8	0.69
220°C/16 h	220 ± 5	16	0.73
240°C/4 h	240 ± 5	4	0.76
240°C/8 h	240 ± 5	8	1.10
240°C/16 h	240 ± 5	16	1.13



表 2. 真空水熱處理孟宗竹材之質量損失率、密度、平衡含水率以及抗吸濕效能  
Table 2. Mass loss (ML), density, equilibrium moisture content (EMC) and moisture excluding efficiency (MEE) of moso bamboo after VH treatment

Sample	ML (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	EMC (%)	MEE (%)
Control	-	771 ± 49 <sup>a</sup>	11.5 ± 0.4 <sup>a</sup>	-
160°C/4 h	1.7 ± 0.3 <sup>f</sup>	705 ± 89 <sup>ab*</sup>	8.4 ± 0.3 <sup>b</sup>	27 ± 3 <sup>g</sup>
160°C/8 h	2.1 ± 0.5 <sup>f</sup>	720 ± 99 <sup>ab*</sup>	7.6 ± 0.3 <sup>c</sup>	34 ± 3 <sup>f</sup>
160°C/16 h	2.3 ± 0.5 <sup>f</sup>	676 ± 75 <sup>ab***</sup>	7.3 ± 0.2 <sup>cd</sup>	37 ± 1 <sup>ef</sup>
180°C/4 h	2.0 ± 0.4 <sup>f</sup>	647 ± 101 <sup>ab***</sup>	7.6 ± 0.2 <sup>c</sup>	34 ± 1 <sup>f</sup>
180°C/8 h	3.6 ± 0.7 <sup>ef</sup>	640 ± 108 <sup>ab***</sup>	6.8 ± 0.3 <sup>de</sup>	41 ± 2 <sup>de</sup>
180°C/16 h	5.2 ± 1.3 <sup>e</sup>	658 ± 91 <sup>ab***</sup>	5.8 ± 0.2 <sup>gh</sup>	49 ± 2 <sup>ab</sup>
200°C/4 h	4.6 ± 1.5 <sup>e</sup>	695 ± 117 <sup>ab*</sup>	6.0 ± 0.2 <sup>fgh</sup>	48 ± 2 <sup>abc</sup>
200°C/8 h	10.8 ± 2.2 <sup>d</sup>	650 ± 43 <sup>ab***</sup>	5.7 ± 0.4 <sup>gh</sup>	50 ± 4 <sup>ab</sup>
200°C/16 h	12.6 ± 1.4 <sup>d</sup>	627 ± 109 <sup>ab***</sup>	5.6 ± 0.2 <sup>h</sup>	51 ± 2 <sup>a</sup>
220°C/4 h	10.5 ± 2.2 <sup>d</sup>	680 ± 79 <sup>ab***</sup>	6.2 ± 0.3 <sup>fg</sup>	46 ± 3 <sup>bc</sup>
220°C/8 h	16.6 ± 1.2 <sup>c</sup>	645 ± 54 <sup>ab***</sup>	6.4 ± 0.3 <sup>ef</sup>	45 ± 3 <sup>cd</sup>
220°C/16 h	19.3 ± 0.6 <sup>b</sup>	596 ± 72 <sup>b***</sup>	6.0 ± 0.3 <sup>fgh</sup>	48 ± 3 <sup>abc</sup>
240°C/4 h	16.2 ± 0.9 <sup>c</sup>	672 ± 70 <sup>ab***</sup>	6.0 ± 0.3 <sup>fgh</sup>	48 ± 3 <sup>abc</sup>
240°C/8 h	21.3 ± 0.7 <sup>b</sup>	671 ± 70 <sup>ab***</sup>	6.2 ± 0.2 <sup>fg</sup>	46 ± 2 <sup>bc</sup>
240°C/16 h	23.8 ± 1.3 <sup>a</sup>	653 ± 100 <sup>ab***</sup>	6.1 ± 0.3 <sup>fgh</sup>	47 ± 3 <sup>abc</sup>

Values are mean ± SD ( $n = 15$ ). Column with different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ). \*:  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p < 0.001$  (one-tailed test) compared with control.



表 3.未處理及真空水熱處理孟宗竹材經浸水試驗後之體積膨脹係數及抗膨潤效能

Table 3. Volumetric swelling coefficient (S) and anti-swelling efficiency (ASE) of untreated and VH-treated moso bamboo after water absorption test

Sample	S (%)	ASE (%)
Control	14 ± 1 <sup>a</sup>	-
160°C/4 h	10 ± 1 <sup>b</sup>	33 ± 9 <sup>c</sup>
160°C/8 h	9 ± 2 <sup>b</sup>	36 ± 11 <sup>c</sup>
160°C/16 h	9 ± 2 <sup>bc</sup>	40 ± 11 <sup>bc</sup>
180°C/4 h	8 ± 1 <sup>bc</sup>	46 ± 10 <sup>bc</sup>
180°C/8 h	8 ± 2 <sup>bc</sup>	47 ± 11 <sup>bc</sup>
180°C/16 h	6 ± 2 <sup>cd</sup>	57 ± 12 <sup>ab</sup>
200°C/4 h	7 ± 2 <sup>bc</sup>	49 ± 14 <sup>bc</sup>
200°C/8 h	4 ± 1 <sup>d</sup>	74 ± 7 <sup>a</sup>
200°C/16 h	4 ± 2 <sup>d</sup>	73 ± 11 <sup>a</sup>
220°C/4 h	4 ± 1 <sup>d</sup>	74 ± 5 <sup>a</sup>
220°C/8 h	4 ± 1 <sup>d</sup>	75 ± 4 <sup>a</sup>
220°C/16 h	4 ± 1 <sup>d</sup>	74 ± 7 <sup>a</sup>
240°C/4 h	4 ± 1 <sup>d</sup>	75 ± 5 <sup>a</sup>
240°C/8 h	3 ± 1 <sup>d</sup>	78 ± 5 <sup>a</sup>
240°C/16 h	4 ± 1 <sup>d</sup>	71 ± 9 <sup>a</sup>

Values are mean ± SD ( $n = 10$ ). Column with different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).



表 4. 未處理及真空水熱處理孟宗竹材之抗彎彈性模數、抗彎強度以及膠合剪力  
 Table 4. Modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR), and bonding shear strength of untreated and VH-treated moso bamboo.

Sample	MOE (GPa)	MOR (MPa)	$\tau_u$ (MPa)
Control	11.1 ± 0.4 <sup>a</sup>	165 ± 6 <sup>a</sup>	2.3 ± 0.4 <sup>bcd</sup>
160°C/4 h	9.5 ± 0.7 <sup>ab</sup>	131 ± 14 <sup>ab</sup>	2.3 ± 0.3 <sup>bcd</sup>
160°C/8 h	10.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	127 ± 9 <sup>bc</sup>	1.9 ± 0.8 <sup>cdef</sup>
160°C/16 h	9.8 ± 0.9 <sup>ab</sup>	113 ± 11 <sup>bcd</sup>	2.1 ± 0.1 <sup>bcd</sup>
180°C/4 h	9.0 ± 1.1 <sup>ab</sup>	113 ± 11 <sup>bcd</sup>	3.5 ± 0.9 <sup>abcd</sup>
180°C/8 h	9.3 ± 1.5 <sup>ab</sup>	106 ± 16 <sup>bcd</sup>	0.8 ± 0.3 <sup>f</sup>
180°C/16 h	11.0 ± 1.2 <sup>a</sup>	125 ± 13 <sup>bc</sup>	1.2 ± 0.0 <sup>ef</sup>
200°C/4 h	10.2 ± 0.9 <sup>a</sup>	94 ± 12 <sup>cdef</sup>	2.9 ± 0.6 <sup>abcde</sup>
200°C/8 h	9.7 ± 0.7 <sup>ab</sup>	109 ± 14 <sup>bcd</sup>	3.1 ± 0.3 <sup>abcd</sup>
200°C/16 h	9.8 ± 1.1 <sup>ab</sup>	108 ± 20 <sup>bcd</sup>	3.9 ± 0.7 <sup>ab</sup>
220°C/4 h	10.0 ± 0.8 <sup>ab</sup>	102 ± 25 <sup>bcd</sup>	3.7 ± 0.1 <sup>abc</sup>
220°C/8 h	9.0 ± 0.8 <sup>ab</sup>	74 ± 20 <sup>efg</sup>	4.2 ± 0.4 <sup>a</sup>
220°C/16 h	7.9 ± 1.0 <sup>b</sup>	83 ± 11 <sup>defg</sup>	2.6 ± 0.2 <sup>abcdef</sup>
240°C/4 h	10.2 ± 0.9 <sup>a</sup>	75 ± 23 <sup>efg</sup>	1.2 ± 0.2 <sup>ef</sup>
240°C/8 h	9.2 ± 0.5 <sup>ab</sup>	59 ± 6 <sup>fg</sup>	1.2 ± 0.1 <sup>ef</sup>
240°C/16 h	7.9 ± 0.6 <sup>b</sup>	55 ± 7 <sup>g</sup>	1.7 ± 0.0 <sup>def</sup>

$\tau_u$ : Values are mean ± SD ( $n = 3$ ).

Values are mean ± SD ( $n = 9$ ). Column with different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).



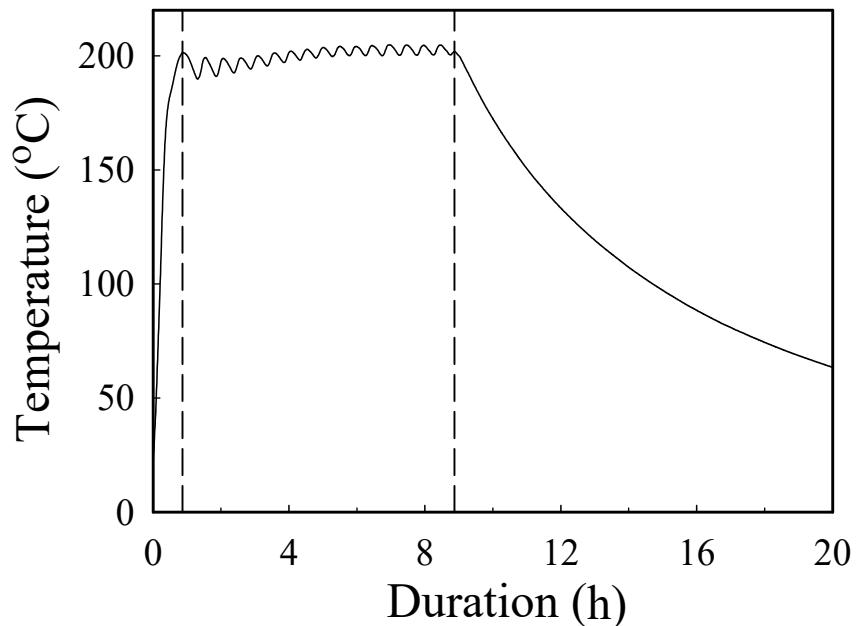


圖 1. 真空水熱處理之升溫曲線（以 200°C/8 h 為例）。

Fig. 1. Heating curve of VH treatment (200°C/8 h).



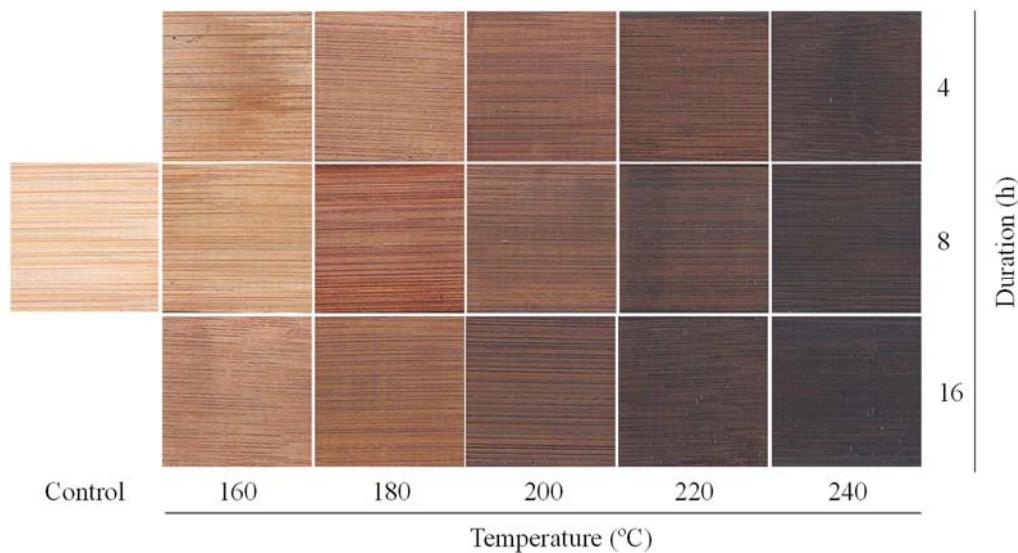


圖 2. 真空水熱處理孟宗竹材之表面影像。

Fig. 2. Surface images of VH-treated moso bamboo.



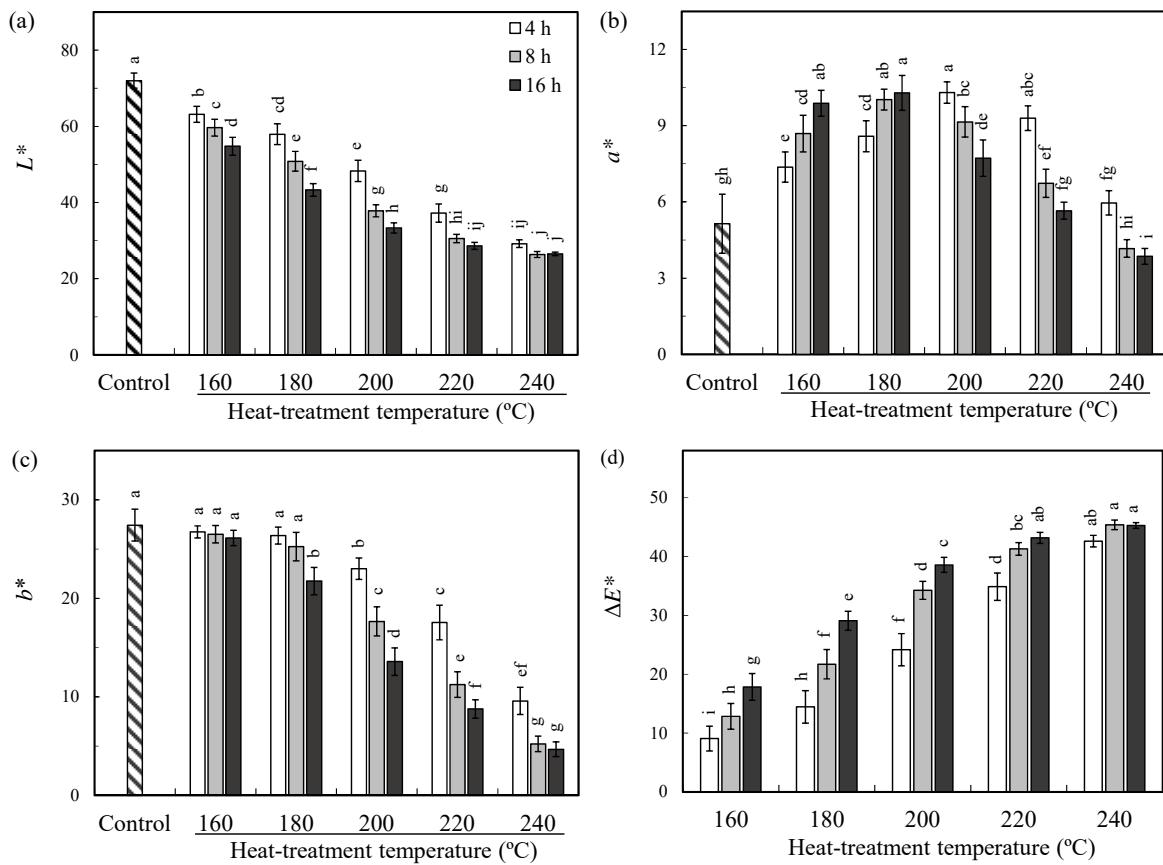


圖 3. 未處理及真空水熱處理孟宗竹材之明度 (a)、紅綠參數 (b)、黃藍參數 (c) 以及色差值 (d)。

Fig. 3.  $L^*$  (a),  $a^*$  (b),  $b^*$  (c), and  $\Delta E^*$  (d) of untreated and VH-treated moso bamboo. Values are mean  $\pm$  SD ( $n = 15$ ). Bars with different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).



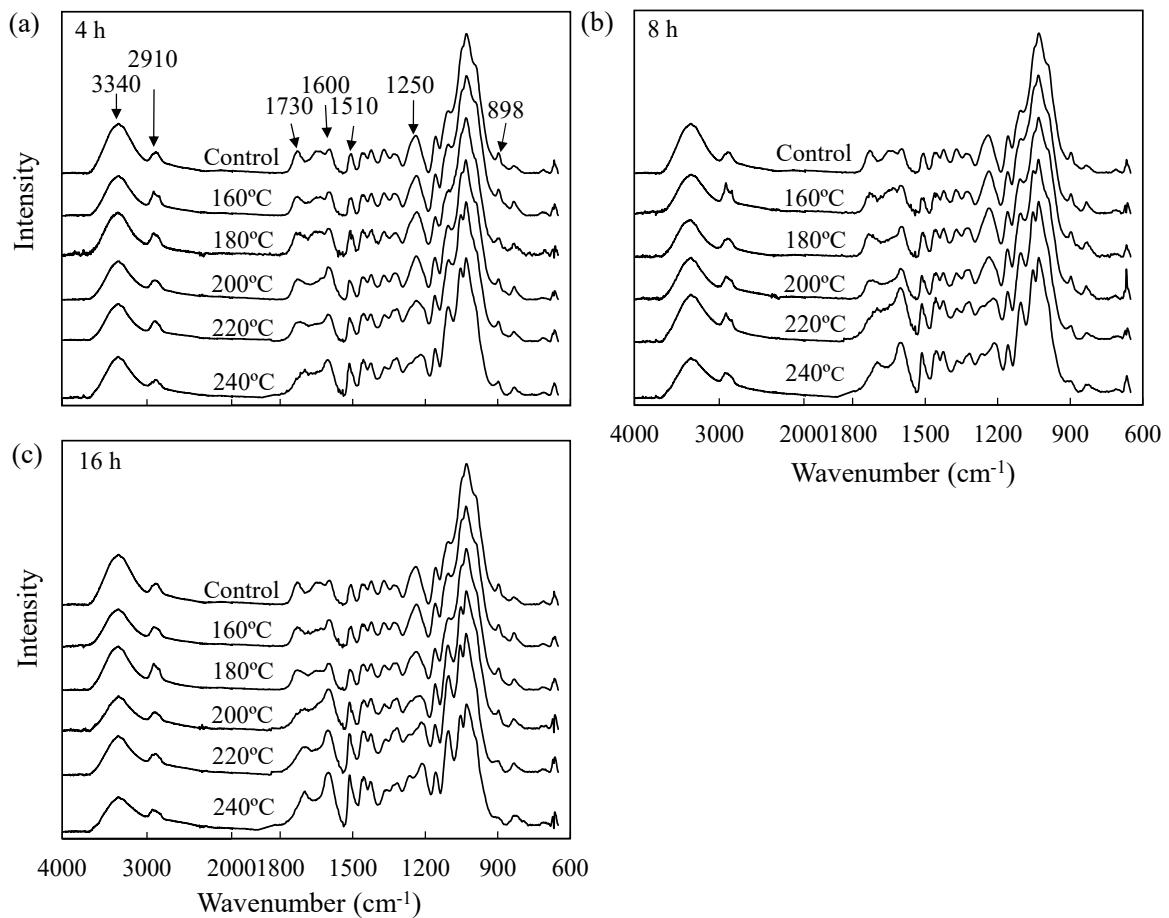


圖 4. 以不同溫度進行 4 (a)、8 (b) 以及 16 h (c) 真空水熱處理所得孟宗竹材之 FTIR 圖譜。

Fig. 4. FTIR spectra of moso bamboo after VH treatment at different temperatures for 4 (a), 8 (b), and 16 h (c).



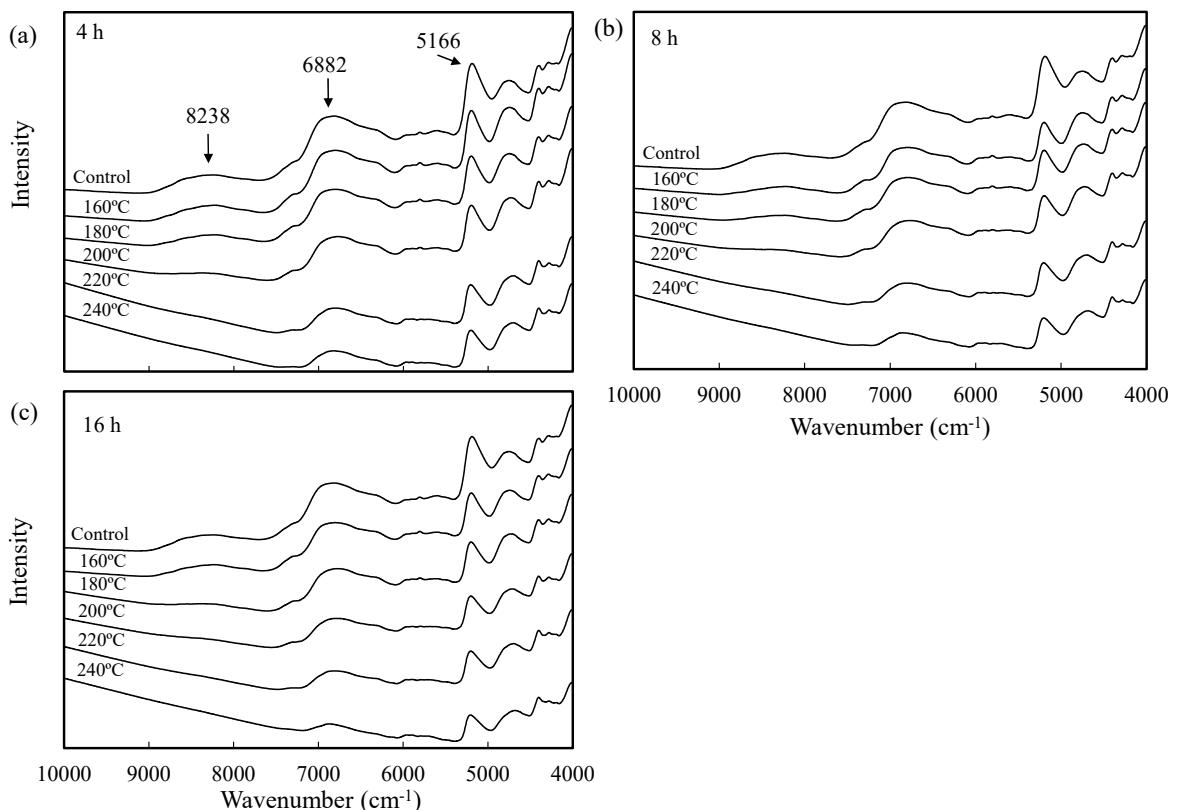


圖 5. 以不同溫度進行 4 (a)、8 (b) 以及 16 h (c) 真空水熱處理所得孟宗竹材之 NIR 圖譜。

Fig. 5. NIR spectra of moso bamboo after VH treatment at different temperatures for 4 (a), 8 (b), and 16 h (c).



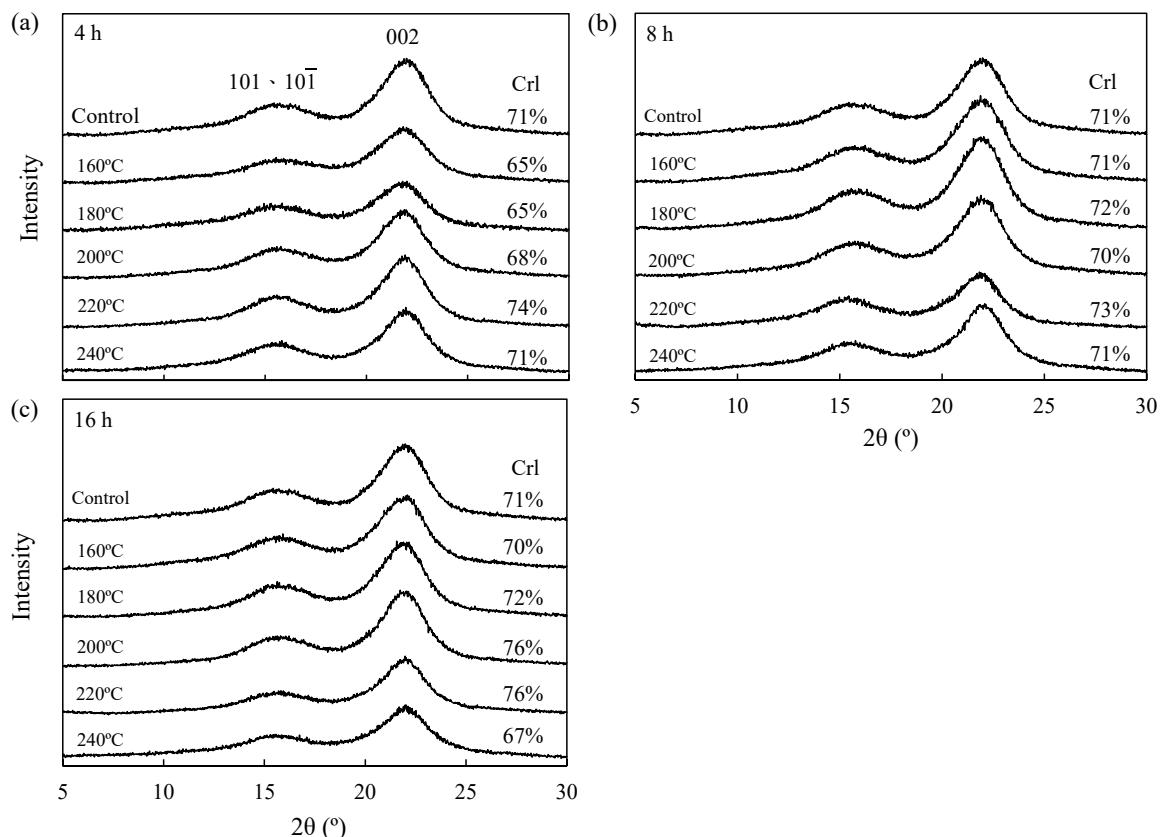


圖6. 以不同溫度進行4 (a)、8 (b) 以及16 h (c) 真空水熱處理所得孟宗竹材之XRD圖譜。

Fig. 6. XRD spectra of moso bamboo after VH treatment at different temperatures for 4 (a), 8 (b), and 16 h (c).





## 111 年農業科技計畫審查意見回應表

計畫研提 期中審查 期末審查

計畫名稱：熱改質技術於耐久性竹材製品開發之應用(2/3)

執行單位：國立中興大學森林學系

計畫主持人：吳志鴻

項次	審查意見	意見回覆	修正頁次
1	期末成果效益報告漏 P.2、P.3 及 P.6，請修正。	感謝委員意見，經與計畫承辦人確認，期末成果效益報告資料漏頁原因，係為印表機資料漏印所致。	研究報告無修正。
2	請補充說明各熱處理條件及各試驗項目之樣本數。	感謝委員建議，各熱處理條件之樣本數為 15 片竹材，至於各試驗項目之樣本數，則已呈現於研究報告各圖說與表說之中。	研究報告無修正。
3	建議後續研究分析熱處理材顏色與相關性質之關係，顏色量測相對於其他性質的測定，係相對較容易的評估方法。另建議熱處理顏色的改變對視覺感官的影響探討。	感謝委員建議，誠如委員所述，顏色量測相對於其他性質的測定係相對較容易的評估方法，故後續若有相關分析會參採委員意見。至於熱處理顏色的改變對視覺感官的影響探討，此部分因較受人為主觀意識所影響，因此目前計畫暫無規劃相關試驗。	研究報告無修正。
4	第三年建議增加莿竹的研究。	感謝委員建議，由於目前莿竹型態與本計畫產品預期規劃有所不同，因此恐難於第三年加入，但未來若有合適機會，亦不排除進行相關研究。	研究報告無修正。
5	孟宗竹桿中央段剖成 3-6 片之竹片，去除竹青蠟質後，切成寬度 30mm，氣乾後，將表面刨光平整，最終切成(長 x 寬 x 高)為 90mm*30mm*5mm 試片。	感謝委員論述。	研究報告無修正。





	試片係在真空水蒸氣處理槽內加熱處理，溫度 160 °C-240°C，時間 4-16 小時。		
6	膠合剪力試驗，試片以纖維平行方式堆疊，採用 PF 膠，佈膠量 200g/m <sup>2</sup> ，先以 1.5 MPa 冷壓 1 分鐘後再以 160°C 1.5 MPa 熱壓 4 分鐘。在此膠合時堆疊是多片試片一起浸型或只有單片？	感謝委員意見，本試驗膠合時堆疊係採多片試片一起。	研究報告無修正。
7	熱處理材質量損失率均小於 10%，平衡含水率(EMC)會減低，未處理材 EMC 11.5%，160°C/4 小時為 8.4%。	感謝委員論述。	研究報告無修正。
8	抗彎性質，未處理材 MOE 為 11.1 GPa，熱處理材為 9.0-11.0 GPa，MOR 未處理材 165 MPa，160°C/4 小時為 132 MPa。	感謝委員論述。	研究報告無修正。
9	膠合剪力，未處理材 2.3 MPa，160 °C /4 小時為 1.9-2.3 MPa，200-220°C 反而增加 2.6-4.2 MPa。	感謝委員論述。	研究報告無修正。
10	膠合時含水率為多少？試片表面有砂磨處理？是否太光滑？熱處理會減低試材 EMC，意味其親水性不佳，亦即對水之溫潤性不良，此在塗裝處理亦會造成負面效果，需考慮進行表面處理。	感謝委員意見，膠合時試片為未砂磨之調濕氣乾材，含水率約為 12%。而試驗結果顯示熱處理試材之親水性確實較低，因此未來若有塗裝處理需求，會參採委員建議，進行表面處理。	研究報告無修正。
11	本計畫完成期末報告評核要求，各計畫內執行檢測項目配合極佳，對未來創新增竹材產品開發應有助益。	感謝委員對本計畫的肯定。	研究報告無修正。
12	目前竹材產品檢測皆依 CNS 木材之檢測標準，未來有無可能增加竹材商品標準檢測。	感謝委員意見，目前 CNS 中未有竹材商品檢測標準，故本計畫之相關檢測係以木材之檢測標準為依	研究報告無修正。



		據。至於未來有無可能增加竹材商品標準檢測，則會依據標檢局公告進行滾動式調整。	
13	真空水熱處理後，竹材表面顏色變深，是否為竹材炭化現象，其可有效降低竹材吸濕性及尺寸膨脹率。	感謝委員意見，本計畫真空水熱處理溫度範圍為160~220°C，並未達到炭化程度，但試驗結果證實，經真空水熱處理可有效降低竹材吸濕性及尺寸膨脹率。	研究報告無修正。
14	表 1-4 表格內建議以虛線表示。	感謝委員意見，已遵照委員意見修改。	研究報告表1~表4。

