

# 新穎多孔性木料綠建材之熱性質測定與數值模擬熱流分析

曾憲中<sup>1,\*</sup>、鄭澤明<sup>1</sup>、徐維廷<sup>1</sup>、周序潔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>建國科技大學機械工程系暨製造科技研究所

<sup>2</sup>建國科技大學電機工程系

\*tsc@ctu.edu.tw

## 摘 要

綠色建築愈來愈受到重視，預估會以每年 10 % 的速度成長，其中，木料綠建材對環境的友善性非常高，因此其需求量也將大幅增加。本文提出以顆粒或片狀纖維填充形成具開放式孔隙之多孔性木料，其外層則為具穿孔之實木板，搭配風扇形成一具木材香芬與吸濕、除臭功能之半穿透隔間建材，必能增加相關產品的競爭優勢與附加價值。本研究針對多孔性木料綠建材之設計與熱傳特性做有系統的研究探討，先利用實驗方法探討組成結構與組成成份對相關多孔性木料性質的影響，並建立相關的經驗公式，接續則將相關的多孔性質代入進行多孔性材料數值模擬分析，以數值模擬觀察多孔性木料的風阻、降溫與木材香芬送出性能，發現在不同風量穿透下，多孔性木料之類別與長度對其相關功能會有明顯影響，本研究結果可做為此類新穎木料綠建材之重要設計參考。

**關鍵詞：**綠建材、多孔性木料、風阻、降溫、木材香芬。

## 一、前言

依據歐洲建築師協會估計[1-3]，全球建築產業約消耗地球一半的能源，一半的水資源，同時產生 50% 的空氣汙染、42% 的溫室氣體以及 50% 的水汙染，建築業儼然為一高汙染的產業。從 2005 年《京都議定書》生效至 2009 年底哥本哈根會議，各國已開始正視環保綠能的重要性。2008 年美國綠建材產業約達 570 億美元，專家預估在美國綠建材市場每年約可成長 7.2%，2013 年美國綠建材市場將逾 800 億美元，2013 年全球綠建材的產值將高達 5,710 億美元。台灣建築產業二氧化碳排放量約佔每年全國總排放量的 30%，其中建材生產部分佔全國總排放量的 9.31%，足見建築業對於台灣環境劇烈的影響，2004 年我國政府開始推動「綠建材標章」，2010 年 3 月綠建材標章的申請廠商已達 153 家，共核發 320 件標章，總計 3,196 種產品，然相較於日本及歐美先進國家大量使用綠建材，台灣綠建材市場仍有相當大的成長空間。以臺灣為例，目前主要的三種木質綠建材為木材發泡隔熱材、再生粒片纖維板與再生塑木。

本文提出以顆粒或片狀纖維填充形成具開放式孔隙之多孔性木料，如圖 1 所示，其外層則為具穿孔之實木板，搭配風扇形成一具木材香芬與吸濕、除臭功能之半穿透隔間建材，必能增加相關產品的競爭優勢與附加價值。關於本文的相關研究，以多孔性介質熱流研究為主，以下將針對多孔性介質的各項流動與熱傳性質相關研究作分別的探討。

### (1) 穿透率(K)與慣性係數(F)之文獻

有關多孔性介質的流動特性研究，Forchheimer [4]提出在流速大時，由於多孔性介質內介質所造成的形狀阻力(Form drag)與摩擦所引發的表面阻力(Surface drag)具有相當重要的關係，因此考慮慣性項的影響。許多狀況下多孔性介質在有限空間內且有不可滲透壁面時，需考慮壁面上的摩擦阻力，此項阻力可加在顆粒本身所造成的達西阻力上，在文獻[5]中Brinkman提出必須加以考慮在有限空間內與不可滲透壁

面接觸時之壁面上的摩擦力，以符合壁面上不滑移條件。而Jones等人[6]以圓形球粒進行堆疊床之實驗研究，提出於高雷諾數時必須考慮邊界層壁面效應，且槽道與圓球粒徑比例，若太小將會影響堆疊床流動阻力的測定，而提出適用於雷諾數範圍為 $Re=10^3\sim 10^5$ 之經驗公式。以上文獻主要都是以球型堆疊密實床此類多孔性結構進行探討，因此，其有關穿透率與慣性係數的經驗公式並不適用於其他種類的多孔性介質。Beavers與Sparrow [7] 以實驗量測發泡材料與多層網狀材料的流動特性，並整理出與流動壓降之間的關係。Du Plessis [8]則提出發泡結構多孔性介質在極高孔隙率時的穿透率與慣性係數的理論模式。

### (2) 固體與流體間熱傳遞係數(hfs)之文獻

Golombok 等人[9]利用熱再生器技術(Heat regenerator technique)量測條狀纖維結構多孔性介質與多層網狀材料的固體與流體間熱傳遞係數。Yeh [11]之碩士論文研究同樣以單吹實驗法(Single blow method)測定發泡鋁材之固體與流體間熱傳遞係數。前述的文獻所量測的固體與流體間熱傳遞係數值都是整個多孔性介質的平均值，而 Ichimiya [12]則提出一種新的逆向工程測定法配合雙方程式模式(Two-equation Model)來估算陶磁發泡材料其內部不同位置的固體與流體間熱傳遞係數值。Hwang 等人[13]以單吹實驗法(Single blow method)測定發泡鋁材( $\epsilon=0.95/10\text{PPI}$ )之固體與流體間熱傳遞係數。Calmidi 與 Mahajan [14]則是利用實驗量測空氣通道中發泡鋁材的熱流行為，並搭配數值模擬計算的交互驗證與比對，提出發泡鋁材的固體與流體間熱傳遞係數的經驗修正式，他們的經驗修正式經主持人研究團隊多次的研究比對，認為是目前已發表文獻中較為正確的，而主持人研究團隊也將其改寫使之更方便使用。

### (3) 等效熱傳導係數(keff)之文獻

多孔性介質的等效熱傳導係數包括停滯熱傳導係數( $k_0$ , Stagnant thermal conductivity)與橫向熱散逸熱傳導係數( $k_d$ , Transverse thermal dispersion conductivity)，其中針對球型堆疊密實床的研究，例如 Shonnard 與 Whitaker [15]利用實驗進行流體於多孔介質間流動之等效熱傳導係數試驗，並於局部熱平衡假設下以點接觸法(Point contact method)進行分析。Tavman [16]針對球型堆疊而成的多孔介質，分析多種等效熱傳導係數模型與實驗結果的差異，因為每個多孔介質中固體與流體的熱傳導係數比值不同以及孔隙率的不同皆會影響等效熱傳導係數估算。此外，Zehner 與 Schlunder [17]提出著名的球型堆疊多孔介質的等效熱傳導係數經驗公式，被廣為引用。而對於橫向熱散逸熱傳導係數( $k_d$ , Transverse thermal dispersion conductivity)的研究，Hunt 與 Tien [10]以纖維狀多孔性介質進行實驗，探討強制對流熱流進口區域內熱逸散效應，由理論與實驗結果發現熱逸散效應正比於穿透率的平方根與流體速度乘積。

本文將針對多孔性木料綠建材之設計與熱傳特性做有系統的研究探討，多孔性綠建材之夾層堆疊木料之種類與整體堆疊長度將影響降溫與風阻效果，利用實驗方法探討組成結構對相關多孔性木料性質的影響，以便建立相關性質與影響因子之間的經驗關係，接續則將相關的多孔性質代入進行多孔性材料數值模擬分析，以數值模擬觀察多孔性木料的風阻、降溫與木材香芬送出性能，本研究結果可做為此類新穎木料綠建材之重要設計參考。

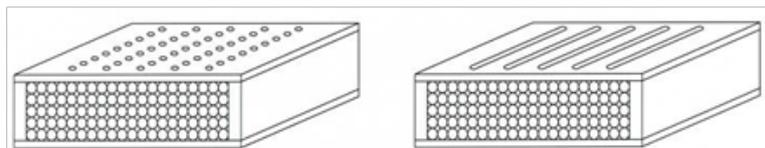


圖 1 本計畫提出之實木夾層堆疊之木料顆粒示意圖

## 二、研究方法

本文以實驗方式進行相關通風性質與熱性質之量測，欲量測之性質包括多孔性木料之孔隙率( $\epsilon$ )、穿透率(K)與慣性係數(F)、固體與流體間熱傳遞係數(hsf)、等效熱傳導係數(ke)等，可以做為設計上的重要參考，更可以做為接續進行多孔性材料數值模擬設計之參數，以數值模擬熱流分析進行最佳化研究。

### A. 多孔性木料通風與熱性質之測定

(1) 孔隙率( $\epsilon$ )之測定：

孔隙率( $\epsilon$ )為多孔性介質中空的體積佔總體積之比值。定義如下列公式：

$$\epsilon = \frac{V_{void}}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{M_s}{M_t} \quad (1)$$

其中  $V_t$  為總體積， $V_s$  為多孔性木料所佔體積， $V_{void}$  為孔隙體積， $M_t$  為佔總體積之實木重量， $M_s$  為多孔性木料重量。實際執行孔隙率量測時，可利用精密電子磅秤量測  $M_t$  與  $M_s$ ，即可獲得多孔性木料之孔隙率。

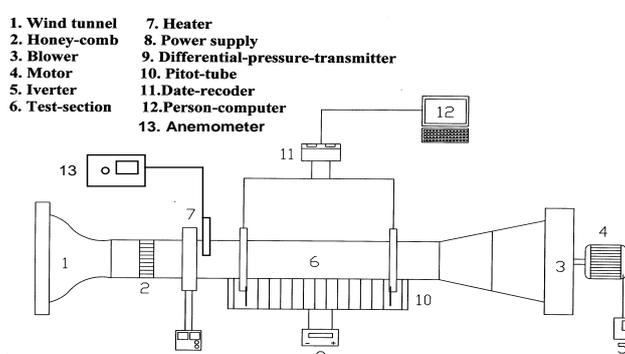


圖 2 暫態單吹實驗設備



圖 3 密實堆疊之木珠(左：Model 1)或纖維木削(右：Model 2)組成之多孔性木料照片

(2) 穿透率(K)與慣性係數(F)之測定：

圖 2 為本計畫所採用之暫態單吹實驗系統示意圖，不同組成結構與組成成份之多孔性木料其相對應之穿透率(K)、慣性係數(F)與內部熱傳遞係數(hsf)可透過此設備量測。實驗系統包括三個主要次系統：(a) 風洞次系統；(b) 測試段；(c) 數據量測次系統。風洞採開放型吸入式進風，由一具 1 馬力之鼓風機吸引空氣進入風洞，風洞入口為  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  之鐘形蜂巢結構，可用以整流減少氣流紊亂度，其後縮至  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  之矩形通道，然後在進入測試段前會先通過一不鏽鋼薄片條繞製之加熱器，可快速將通過之氣流加熱，此外，氣流量係藉由一變頻器控制鼓風機馬達來改變，而通過測試段之加熱氣流最後經由鼓風機出口排出，鼓風機與風洞間由特製布套銜接，可避免風洞隨鼓風機而震動。測試段為一截面  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ 、長 360 mm 之矩形通道，由 20 mm 厚之電木製成，其內部放入本計畫之多孔性木料，多孔性木料為密實

堆疊之木料顆粒或纖維木條組成(如圖 3)。風速計量測通過測試段入口之平均流速，數位壓力計測量通過多孔性木料測試塊之壓力降，測試段入、出口之暫態溫度由 T-type 熱電偶量測，為能測得通過測試段截面之流體均溫，在入、出口分別均勻布置 9 點測溫點，溫度訊號由數據記錄器即時記錄，並存於個人電腦。多孔性木料之穿透率(K)與慣性係數(F)之測定係利用 Darcy [4]與 Forchheimer [6]對多孔性介質壓降特性的描述，多孔性介質槽流之壓力梯度可寫成下式：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K}u + \frac{F\rho}{\sqrt{K}}u^2 \quad (2)$$

再利用 Hunt 與 Tien [10] 的方式重新整理為下式：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\mu u} = \frac{1}{K} + \frac{F}{\sqrt{K}} \frac{\rho u}{\mu} \quad (3)$$

若以  $\frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\mu u}$  為 y 軸參數， $\rho u / \mu$  為 x 軸參數，上述方程式即為一線性方程式表示式，則穿透率(K)為此線性直線的截距之倒數， $F/\sqrt{K}$  則為此線性直線的斜率。

(3) 固體與流體間熱傳遞係數(hfs)之測定：

在暫態單吹實驗法中，若假設通過測試段各截面之氣流溫度與速度為均勻，則在測試段中之氣流與多孔性木料溫度將只與沿流向位置及時間有關，也就是整個測試段中氣流與多孔性木料的熱傳為一維暫態熱傳模式，實驗同時假設：(a) 多孔性木料測試塊視為一種均質的多孔性介質；(b) 氣流為穩態穩流且不可壓縮；(c) 氣流與多孔性介質之熱性質為常數；(d) 氣流在沿流向之橫向熱散逸傳導為可忽略。則相關之統御方程式可以寫成：

$$(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_{fs} a_{fs} (T_f - T_s) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_s^* \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$(\rho C_p)_f \left( \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} + U \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h_{fs} a_{fs} (T_s - T_f) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_f^* \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) \quad (5)$$

方程式中 $\varepsilon$ 表示多孔性木料測試塊的孔隙率，也就是多孔性木料其內部中空的體積佔整體體積的比值；U 是通過測試段截面之平均流速；Ts 與 Tf 分別表示固體與流體之體積平均溫度；hfs 是固體與流體之間的熱傳遞係數；而 afs 則是單位體積內多孔性木料之有效散熱面積，當多孔性木料採用片狀纖維時，afs 很難估算，此時可將 hfs·afs 耦合成一個參數性質； $k_s^*$ 與  $k_f^*(=\varepsilon k_f)$ 分別為固體與流體之等效熱傳導係數， $k_s^*$ 與多孔性介質的結構與組成成份有關，本計畫將規劃實驗量測。邊界與初始條件可以寫成：

$$T_s(0, x) = T_f(0, x) = T_0 \quad (6)$$

$$T_f(t, 0) = \text{measured data} \quad (7)$$

其中 T0 為未加熱前之初始溫度；Tf(t,0)為氣流於入口處之溫度變化。整個統御方程式及邊界與初始條件可以利用有限差分法求解。

圖 4 為暫態實驗法決定固體與流體之間的熱傳遞係數 hfs 的流程圖，在暫態實驗法中，測試段出口處氣流暫態溫度(Tf,out)受很多因素影響，其中包括入口處氣流暫態溫度 (Tf,in)、氣流平均速度(U)、多孔性木料測試塊的孔隙率( $\varepsilon$ )、單位體積內多孔性木料之有效散熱面積(afs)、以及固體與流體之間的熱傳遞係數(hfs)，測試段變動夾層堆疊木料之形狀(球形、方塊狀、纖維條狀)與尺寸、整體堆疊厚度、外層實木的穿孔形狀與穿孔面積比例等即產生不同之 $\varepsilon$ 、 $k_s^*$ 與 afs，求解前述統御方程式及邊界與初始條件即可獲得測試段的溫度場，而 Tf,in、U、 $\varepsilon$ 、 $k_s^*$ 與 afs 均可量測，將之代入統御方程式，並猜一 hfs 值，則

求解述統御方程式即可獲得測試段出口處氣流暫態溫度 $(T_{f,out})_t$ 之數值解，假如此 $(T_{f,out})_t$ 之數值解與實驗量測所得之 $(T_{f,out})_{exp}$  吻合，則表示所猜之  $h_{fs}$  即為特定多孔性木料測試塊與 U 時之固體與流體之間的熱傳遞係數( $h_{fs}$ )。

(4) 等效熱傳導係數( $k_{eff}$ 、 $k_s^*$ )之測定：

不同組成結構與組成成份之多孔性木料將有不同的通風與熱性質，將影響其整體隔熱與散發木材香芬的功能，其中，等效熱傳導係數( $k_{eff}$ 、 $k_s^*$ )更是對隔熱影響非常重要的性質，本計畫整理以往的研究所發表之多孔性介質等效熱傳導係數之相關理論模式，配合實驗量測結果修正，建構可預測不同組成結構與組成成份之多孔性木料的等效熱傳導係數經驗公式。多孔性介質等效熱傳導係數( $k_{eff}$ )較常見有以下幾種型式[21-24]：

$$(a) \quad k_{eff} = k_f \left[ 1 - \sqrt{1 - \varepsilon} + \frac{2\Lambda\sqrt{1 - \varepsilon}}{\Lambda - B} \times \left[ \frac{B\Lambda(\Lambda - 1)}{(\Lambda - B)^2} \ln\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{B + 1}{2} - \frac{\Lambda(B - 1)}{\Lambda - B} \right] \right],$$

$$\Lambda = \frac{k_s}{k_f}, \quad B = 1.25 \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{10/9} \quad (\text{球型堆疊多孔性介質}) \quad (8)$$

$$(b) \quad k_{eff} = \varepsilon k_f + A(1 - \varepsilon)^n k_s \quad (\text{纖維材料多孔性介質}) \quad (9)$$

如圖 5 所示，本計畫將建立一量測多孔性木料其等效熱傳導係數( $k_{eff}$ )的實驗平台，測試段其構形主要設計為一具有 60 mm × 60 mm 之方型凹槽容器，而為了增加實驗的準確度，並且降低熱量的損失，測試段外部主要採用低熱傳導性之電木( $k=0.38$  W/m/K)，以一體成形加工製成，其壁厚為 40 mm。熱傳導係數量測測試段分成底部加熱端與上方冷卻端，加熱端主要由熱電偶、薄膜加熱片所構成，透過電源供應器提供加熱片不同之電壓及電流來產生熱量，再傳遞至多孔性木料測試塊，以測試不同溫度下之等效熱傳導係數值；而冷卻端則由熱電偶及鼓風機所構成，利用鼓風機來增加冷端之熱對流效果，以增加熱端與冷端之溫差來降低實驗誤差。而測試段底部加熱端與頂部冷卻端所設置之多個熱電偶，則連接至溫度記錄器，用以擷取溫度數據進行等效熱傳導係數( $k_{eff}$ )計算，計算公式如后：

$$k_{eff} = \frac{(I \cdot V - Q_{loss}) \cdot L}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (10)$$

其中 V 為電壓、I 為電流、 $Q_{loss}$  為熱損失(實驗測試盒為 40 mm 厚電木製作，熱損將會很小)、A 為加熱截面積、T1 為底部加熱端溫度、T2 為多孔性木料測試塊頂面溫度、L 為多孔性木料測試塊的厚度。

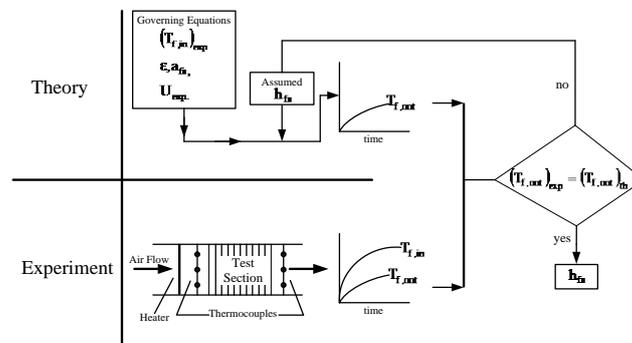


圖 4 暫態實驗法決定  $h_{fs}$  的流程圖

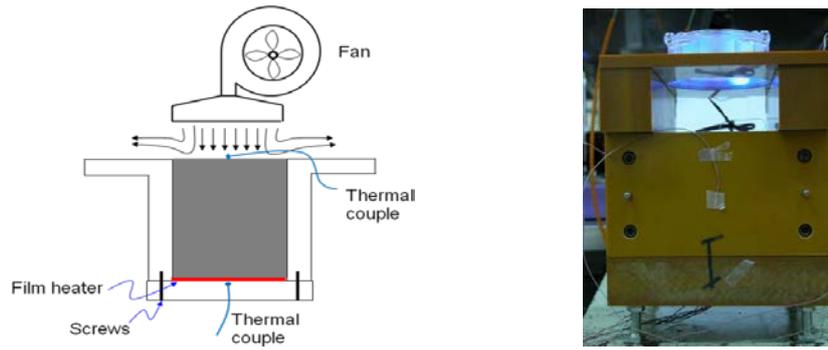


圖 5 熱傳導實驗測試設備圖

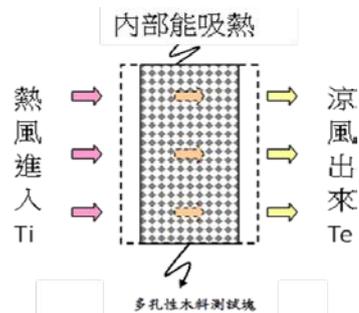


圖 6 物理構型

圖 7 數值計算域與邊界條件

### B. 數值模擬熱流分析

前階段先利用實驗方法探討組成結構與組成成份對相關多孔性木料性質的影響，並建立相關的經驗公式，接續則可以將相關的多孔性質代入進行多孔性材料數值模擬分析，以數值模擬熱流分析進行最佳化研究。本計畫擬進行的數值模擬分析，將採用圖 6 之物理構型進行 2 維分析，多孔性木料測試塊的內部可利用人工製造而具有吸熱能力，當空氣通過多孔性木料測試塊，就能產生溫度降。圖 7 為數值計算域與邊界條件，計算時可以設定多孔性木料測試塊的入口端無因次空氣溫度( $\theta_{f,i}$ )與通風流速( $u_i$ )，經過數值計算獲得出口端的空氣溫度( $\theta_{f,e}$ )與通風壓降( $\Delta p$ )，入、出口端無因次空氣溫度差可作為多孔性木料測試塊的溫降指標( $\Lambda$ )，另利用無因次壓降可定義出風阻指標( $\Pi$ )，而木材香芬的送出是與質傳效率有關，基於質傳與熱傳之間的相似性關聯，因此可利用熱傳遞係數來定義香芬指標( $\Phi$ )：

$$\Lambda = |\theta_{f,e} - \theta_{f,i}| \quad (11)$$

$$\Pi = \frac{\Delta p}{0.5 \rho_f u_i^2} \cdot \text{Re}^2 \quad (12)$$

$$\Phi = \frac{h_{sf} \cdot a_{sf} \cdot H^2}{k_f} \cdot \frac{L}{H} \quad (13)$$

其中  $\rho_f$  為空氣密度， $\text{Re}$  為雷諾數，定義為  $\text{Re} = \rho_f u_i H / \mu$ ， $H$  為多孔性木料測試塊的高度。溫降指標( $\Lambda$ )愈大代表多孔性木料測試塊的降溫效果愈佳；風阻指標( $\Pi$ )愈大則代表多孔性木料測試塊的通風效果愈差；而香芬指標( $\Phi$ )愈大則代表多孔性木料測試塊的木材香芬送出能力愈強。

本文所探討之多孔性木料，由於內部結構與流體間的熱傳機制相當複雜，使得此問題的解析較為困難。想要計算出內部的流場與溫度場是非常花費計算機時間，所以我們將採用多孔性介質的分析方法，並利用體積平均化的技巧(Volume Average Technique)，將微觀的統御方程式發展成多孔性介質的巨觀熱流模式。體積平均化的含意在於使多孔性介質局部孔徑(Pore)間的熱流現象模糊化，用整體的傳輸結果去表示局部孔徑間的種種流力與熱傳效應。本部份主要是以改良型達西模式(Modified Darcy Model)配合單方程式模式或雙方程式模式(One-Equation Model or Two-Equation Model)建立數值計算模型。本計畫擬針對多孔性木料之熱流特性進行數值計算模擬，計算域包括入口端、出口端與中間之多孔性木料層，入口端與出口端為純粹流體部份，中間之多孔性木料層則包含流體與多孔性木料，為簡化問題的複雜性，有以下的假設：(1)多孔性木料是由大量的木料堆疊而成，可視為多孔性結構；(2)考慮非達西影響(Non-Darcian Effect)，例如無滑動邊界、流動慣性等；(3)流體與多孔性木料間為非區域熱平衡(Non-local Thermal Equilibrium)。引進下列無因次參數與渦度及流線函數，

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{u_i}, V = \frac{v}{u_i}, \text{Pr} = \frac{\mu / \rho_f}{k_f / (\rho C_p)_f}, Da = \frac{K}{H^2},$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f u_i H}{\mu}, U_M = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{u_i}, \theta = \frac{T - T_i}{q_w H / k_f}, Nu_{fs} = \frac{h_{fs} a_{fs} H^2}{k_f} \quad (14)$$

其中  $K$  是 穿透率、 $a_{fs}$  是多孔性介質單位體積內展延出的熱交換面積、 $h_{fs}$  是流體與多孔性介質之固體之間的熱傳遞係數、 $q_w$  是多孔性介質吸收的熱通量。渦度( $\omega$ )與流線函數( $\Psi$ )則表示為：

$$\omega = -\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X}, U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X} \quad (15)$$

統御方程式可寫成下列型式：

$$-\omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} \quad (16)$$

$$U \frac{\partial \omega}{\partial X} + V \frac{\partial \omega}{\partial Y} = -\frac{\varepsilon^2}{\text{Re} \cdot Da} \omega - \frac{\varepsilon^2 F U_M}{\sqrt{Da}} \omega + \frac{\varepsilon^2 F}{\sqrt{Da}} (U \frac{\partial U_M}{\partial Y} - V \frac{\partial U_M}{\partial X}) + \frac{\varepsilon}{\text{Re}} (\frac{\partial^2 \omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial Y^2}) \quad (17)$$

$$U \frac{\partial \theta_f}{\partial X} + V \frac{\partial \theta_f}{\partial Y} = \frac{Nu_{fs}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} (\theta_s - \theta_f) + \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \frac{k_f^*}{k_f} (\frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial Y^2}) \quad (18)$$

$$0 = Nu_{fs}(\theta_f - \theta_s) + \frac{k_s^*}{k_f} \left( \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} \right) + \delta \quad (19)$$

其中  $F$  是慣性係數、 $\varepsilon$  是孔隙率、 $k_s^*$  是多孔性介質中固體的等效熱傳導係數、 $k_f^*$  是多孔性介質中流體的等效熱傳導係數。當計算域為純流體區域時，達西數  $Da$  設成極大，而  $\varepsilon$  設成 1，同時  $Nu_{fs}=k_s^*=0$  及  $k_f^*=k_f$ ； $\delta$  代表在多孔性介質中所吸收的熱，在多孔性介質計算域中設成 -1，而在其他的計算域中均為 0。模擬時將多孔性木料前方與後方之純粹流體區域也納入計算，可使邊界條件之假設更為合理。考慮入口效應，因此在方程式(17)之等號左邊保留了對流項，等號右邊的第一與二、三項分別代表達西法則與慣性效應，在低速時慣性效應表現並不明顯，隨著流速增大則變得不可忽略，至於等號右邊的第四項則是考慮近壁面處之黏滯剪力，也是滿足非滑動條件。能量方程式採用雙方程式模式， $\theta_f$  與  $\theta_s$  分別代表流體部份與固體部份的無因次溫度，等效熱傳導係數( $k_s^*$ ,  $k_f^*$ )與多孔性木料的構型、木料熱傳導係數與流體熱傳導係數有關，橫向熱散逸熱傳導係數( $k_d$ )則係基於多孔性木料結構所造成之流體曲繞流動而增加的額外熱傳能力。從統御方程式可看出，要進行數值計算模擬前須先決定多孔性木料結構相對應之穿透率值( $K$ )、慣性係數值( $F$ )、等效熱傳導係數( $k_s^*$ ,  $k_f^*$ )與橫向熱散逸熱傳導係數( $k_d$ ，本計算中設為 0)、以及多孔性木料與流體間之熱傳係數( $h_{fs}$ )，本計畫將自行以實驗測定，得出完整可信之熱傳經驗公式進行運用，並利用將數值計算結果與實驗量測結果比對來進行修正。本計畫預計採用著名的 Power-Law 法則來離散統御方程式，應可獲得準確且穩定的數值計算。計算時採用疊代程序解連續方程式與動量方程式，俟獲得速度場之收斂解後，以疊代程序同時求解流體與固體部份之能量方程式，則可獲得固體部份與流體部份的溫度場之收斂解。所有的離散式均採用 Lee 發展的 SIS 計算法求解。

### 三、 結果與討論

#### A. 多孔性木料通風與熱性質之測定

圖 8 為線性迴歸決定  $K$  與  $F$  值，是利用前節 A(2) 之設備方法量測壓降數據，並配合方程式(2)、(3)做數據整理，繪圖如圖 10 獲得多孔性木料綠建材之穿透率( $K$ )與慣性係數( $F$ )。圖 9 是表示空氣通過多孔性木料綠建材後其摩擦因子( $C_f$ )與雷諾數( $Re$ )之關係，其中  $C_f$  與  $Re$  分別定義為  $Re = \frac{\rho_f U H}{\mu}$  與  $C_f = \frac{\Delta P}{0.5 \rho_f u^2} \frac{H}{L}$ ，從圖中

可發現摩擦因子( $C_f$ )會先隨雷諾數( $Re$ )增加而下降，然後逐漸趨向一定值，這是因為摩擦因子( $C_f$ )為壓力降與動壓力(比例於空氣流速的 2 次方)得比值，而空氣通過多孔性木料綠建材的壓力降為表面摩擦力與形狀阻力的線性相加，其中表面摩擦力與空氣流速成正比、形狀阻力與空氣流速的 2 次方成正比，因此，會有摩擦因子( $C_f$ )先隨雷諾數( $Re$ )下降然後趨向一定值得結果。從圖 9 又可看出在雷諾數較小時，Model 2(纖維木削)會有較大壓降，顯示其穿透率( $K$ )較小，而雷諾數增大時，Model 1(堆疊木珠)反而會有較大壓降，顯示其慣性係數值( $F$ )較大。圖 10 是測試段入口與出口處空氣溫度隨時間變化之量測數據與理論計算結果，發現熱傳性能( $h_{fs} a_{fs}$ )愈好，則出口處空氣溫度上升較快，反之則較慢，結果也顯示雷諾數愈大則( $h_{fs} a_{fs}$ )愈大，符合強制熱對流特徵；在相同風速下，Model 1 的堆疊木珠比 Model 2 的纖維木削有較佳的熱傳性能( $h_{fs} a_{fs}$ )，這是值得注意的地方。圖 11 為測試段內部熱傳紐塞數( $Nu_d$ )與修正雷諾數( $Red$ )之關係，其中  $Nu_d$  與  $Red$  分別定義為  $Re_d = \frac{\rho_f U d}{\mu \cdot \varepsilon}$  與  $Nu_d = \frac{h_{sf} \cdot a_{sf} \cdot d^2}{k_f}$ ，我們將其整理成經驗公式，方便後續進行數值計算時

運用。表 1 為原木性質一覽表，為本計畫採用之木珠與木削其原木的密度、熱傳導係數與比熱值，表 2

為多孔性木料性質一覽表，係多孔性木料測試塊Model 1與Model 2的多孔性性質，例如孔隙率( $\epsilon$ )、穿透率(K)、慣性係數(F)、等效熱傳導係數( $k_{eff}$ )與內部總熱傳係數( $afshfs$ )，由於Model 2的孔隙率( $\epsilon$ )遠大於Model 1，因此Model 2的等效熱傳導係數( $k_{eff}$ )與內部總熱傳係數( $afshfs$ )則顯著較Model 1為小。

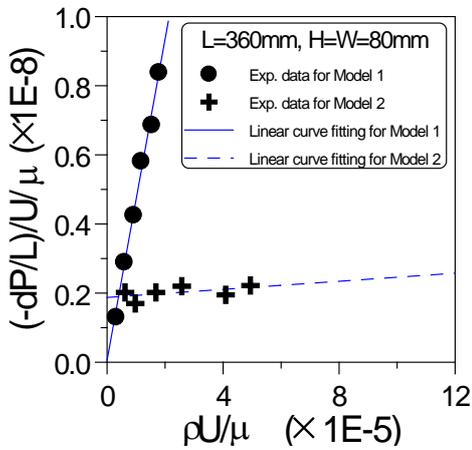


圖 8 線性迴歸決定 K 與 F 值

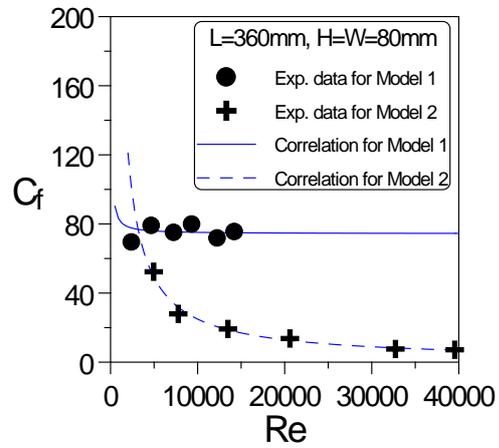


圖 9 摩擦因子與雷諾數之關係

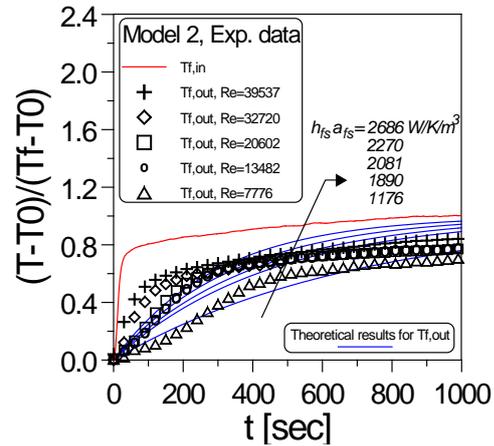
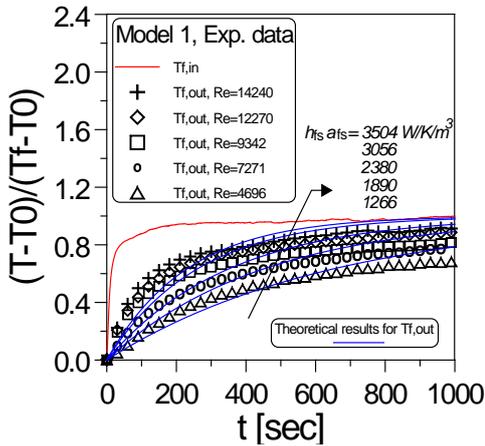


圖 10 測試段入口與出口處空氣溫度隨時間變化之量測數據與理論計算結果(左:Model 1、右: Model 2)

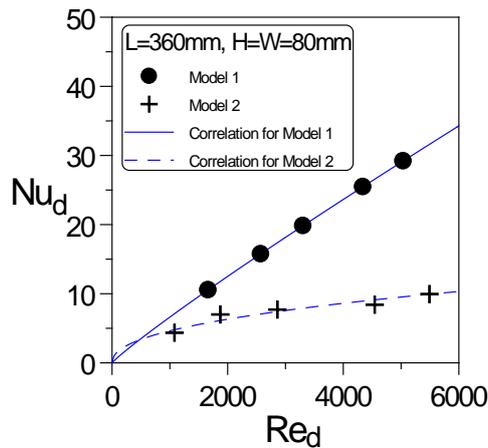


圖 11 測試段內部熱傳紐塞數與修正雷諾數之關係

表 1 原木性質一覽表

	密度[kg/m <sup>3</sup> ]	熱傳導係數 [W/m <sup>2</sup> °C]	比熱 [J/kg/°C]	黏滯係數[pa · s]
空氣	1.15	0.026	1005	1.86E-5
原木	418	0.166	1720	—

表 2 多孔性木料性質一覽表

	Model 1 (堆疊木珠)	Model 2 (纖維木削)
木珠平均粒徑(d)或 木削平均寬度(w) [m]	0.015	0.010
孔隙率(ε)	0.53	0.90
穿透率(K) [m <sup>2</sup> ]	161E-8	5.33E-8
慣性係數(F)	0.59	0.0013
等效熱傳導係數 (keff) [W/m <sup>2</sup> °C]	0.060	0.030
內部總熱傳係數 (afshfs) [W/m <sup>3</sup> /K]	$Nu_d = 0.0117 Re_c$	$Nu_d = 0.209 Re_c$

## B. 數值模擬熱流分析

數值模擬採用前節所述之數學模式與數值方法進行，空氣流過高度 60mm、寬度 120mm 的多孔性木料測試段，其類別分成堆疊木珠(Model 1)與纖維木削(Model 2)等兩種，長度 L 則有 50、100 與 150mm 等三種，圖 12 呈現風速 U 與測試段長度 L 對 Model 1 的空氣與多孔性木料溫度的影響，可以清楚觀察到當風速 U 較小或測試段長度 L 較長時，空氣通過多孔性木料測試段後產生的溫降較大，這是因為測試段長度 L 較長時，熱交換面積較多，能吸走較多的空氣熱量，而風速 U 較小時，雖然強制熱對流能力下降，但因空氣的質量流率也較小，所以雖然被吸走較少熱量，但溫度降會較大。圖 13-15 分別顯示不同測試段長度 L 與不同種類多孔性木料時之溫降指標(Λ)、風阻指標(Π)與香芬指標(Φ)對應風速 U 的變化，溫降指標(Λ)愈大代表多孔性木料測試塊的降溫效果愈佳；風阻指標(Π)愈大則代表多孔性木料測試塊的通風效果愈差；而香芬指標(Φ)愈大則代表多孔性木料測試塊的木材香芬送出能力愈強。基本上，風速 U 增大時溫降指標(Λ)會下降、風阻指標(Π)與香芬指標(Φ)則都會增大，而在相同風速 U 時，圖 13-15 也同時指出當測試段長度 L 較長時，溫降指標(Λ)、風阻指標(Π)與香芬指標(Φ)都會較大，顯示測試段長度 L 較長時，熱交換面積較多，能吸走較多的空氣熱量，也會有較大的質傳率，但同時也會有較大的風阻；而圖 13 也指出 Model 2 纖維木削多孔性木料測試段比 Model 1 堆疊木珠能有較大的溫降指標(Λ)，尤其是較低

風速  $U$  時，圖 14 與圖 15 則顯示在風速較小時( $U < 0.5\text{m/s}$ )，Model 2 纖維木削多孔性木料測試段比 Model 1 堆疊木珠能有較大風阻指標( $\Pi$ )與香芬指標( $\Phi$ )，但當風速較大時( $U > 0.5\text{m/s}$ )，Model 2 纖維木削多孔性木料測試段則比 Model 1 堆疊木珠能有較小風阻指標( $\Pi$ )與香芬指標( $\Phi$ )。

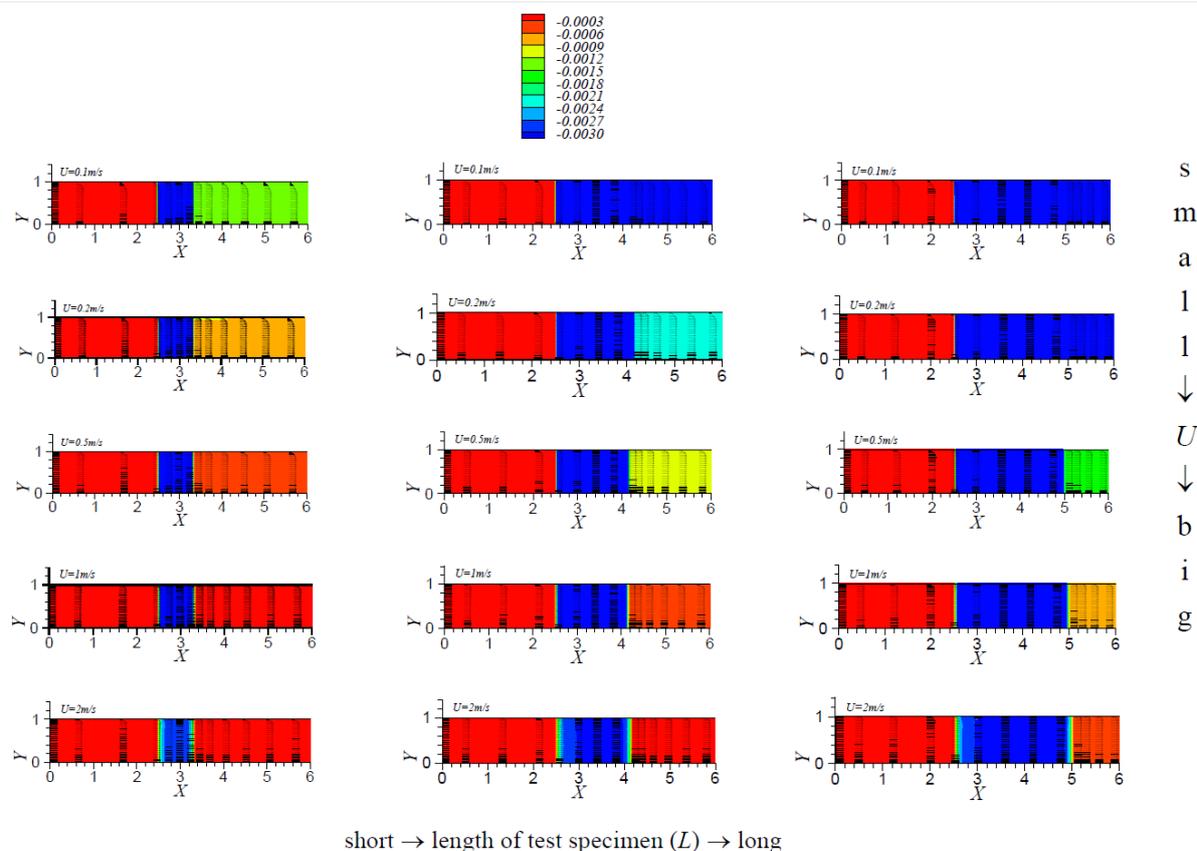


圖 12 風速  $U$  與測試段長度  $L$  對 Model 1 的空氣與多孔性木料溫度的影響

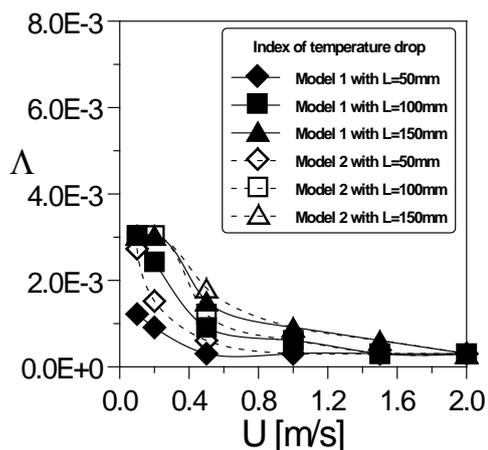


圖 13 溫降指標( $\Lambda$ )對應風速  $U$  的變化

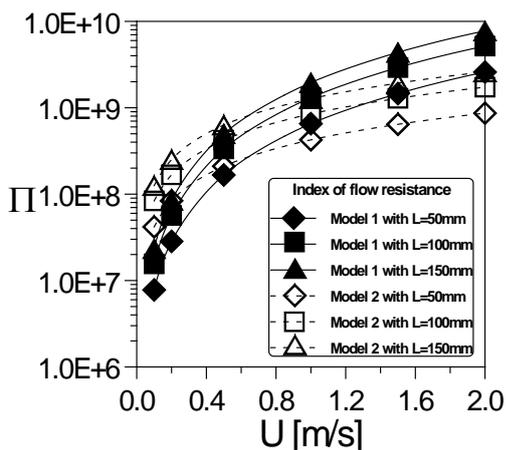


圖 14 風阻指標( $\Pi$ )對應風速  $U$  的變化

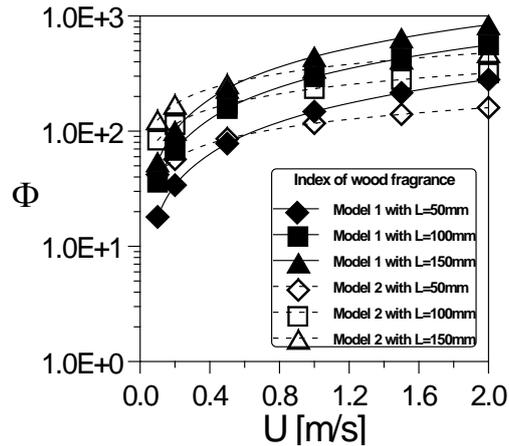


圖 15 香芬指標( $\Phi$ )對應風速  $U$  的變化

## 六、 結論

本研究針對多孔性木料綠建材之設計與熱傳特性做有系統的研究探討，定義出溫降( $\Lambda$ )、風阻( $\Pi$ )與香芬( $\Phi$ )等功能指標，溫降指標( $\Lambda$ )愈大代表多孔性木料的降溫效果愈佳；風阻指標( $\Pi$ )愈大則代表多孔性木料的通風效果愈差；而香芬指標( $\Phi$ )愈大則代表多孔性木料的木材香芬送出能力愈強。重要結論摘述如后：

- (1) 風速  $U$  增大時溫降指標( $\Lambda$ )會下降、風阻指標( $\Pi$ )與香芬指標( $\Phi$ )則都會增大。
- (2) 測試段長度  $L$  較長時，溫降指標( $\Lambda$ )、風阻指標( $\Pi$ )與香芬指標( $\Phi$ )都會較大。
- (3) 在較低風速下( $U < 0.5 \text{ m/s}$ )，Model 2(纖維木削)比 Model 1(堆疊木珠)能有較大的溫降指標( $\Lambda$ )與香芬指標( $\Phi$ )；而風速較大時( $U > 0.5 \text{ m/s}$ )，Model 2 比 Model 1 能有較小風阻指標( $\Pi$ )與香芬指標( $\Phi$ )。

## 誌謝

本研究感謝國科會經費補助(計畫編號 NSC 100-2622-E-270-003-CC3)，謹此致謝。

## 參考文獻

- [1] 薛品予，商業週刊「3年後，產值上看18兆」，2010年4月
- [2] 綠建材標章官方網站：<http://www.cabc.org.tw/gbm/HTML/website/index.asp>
- [3] Sean Penrith，Top Ten Green Building Trends To Watch In 2010，2010年
- [4] Forchheimer, P., "Wasserbewegung durch boden," Z. Ver. Deutsch Ing., Vol. 45, pp. 1782-1788, 1901.
- [5] Kaviany, M., "Principle of Heat Transfer in Porous Media," Springer-Verlag New York, Inc. Second Edition, pp. 52-53, 1995.
- [6] Jones, D. P., Krier, H., "Gas Flow Resistance Measurements Though Packed Beds at High Reynolds Numbers," ASME J. Heat Transfer, Vol. 105, pp. 168-173, 1983.
- [7] Beavers, G.S., and Sparrow, E.M., 1969, "Non-Darcy Flow Through Fibrous Porous Media," J. Applied Mechanics, pp. 711-714.
- [8] Du Plessis, J.P., Montillet, A., Comiti, J., and Legrand, J., 1994, "Pressure Drop Prediction for Flow Through High Porosity Metallic Foams," Chemical Engineering Science, Vol. 49, No. 21, pp. 3545-3553.

- [9] Golombok, M., Jariwala, H., and Shirvill L. C., 1990, "Gas-Solid heat exchange in a fibrous metallic material measured by a heat regenerator technique," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 33, pp. 243-252.
- [10] Hunt, M. L., and Tien, C. L., 1988, "Effects of Thermal Dispersion on Forced Convection in Fibrous Media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 301-309.
- [11] Yeh, R. H., 1996, "Heat Transfer Measurement inside Porous Aluminum Material by Single-Blow Transient Technique," Master Thesis, Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University, Taiwan, R.O.C.
- [12] Ichimiya, K., 1999, "A New Method for Evaluation of Heat Transfer Between Solid Material and Fluid in a Porous Medium," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 978-983.
- [13] J.J. Hwang, G.J. Hwang, R.H. Yeh, C.H. Chao, Measurement of Interstitial Convection Heat Transfer and Frictional Drag for Flow Across Metal Foams, *ASME J. Heat Transfer* 124 (2002) 120-129.
- [14] V.V. Calmidi, R.L. Mahajan, Forced Convection in High Porosity Metal Foams, *ASME J. Heat Transfer* 122 (2000) 557-565. [15] Chen, P. H., and Chang, Z. C, 1997, "Measurements of Thermal Performance of Cryocooler Regenerators Using an Improved Single-Blow Method," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2341-2349.
- [15] Shonnard, R., and Whitaker, S., 1989, "The effective thermal conductivity for point contact porous medium: an experimental study," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 503-512.
- [16] Tavman, I. H., 1996, "Effective thermal conductivity of granular porous materials," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 169-176. [18] V.V. Calmidi, R.L. Mahajan, Forced Convection in High Porosity Metal Foams, *ASME J. Heat Transfer* 122 (2000) 557-565.
- [17] P. Zehner, E. U. Schlunder, Thermal conductivity of granular materials at moderate temperatures (in German), *Chemie Ingenieur Technik* 42 (1970) 933-941. [21] P. Zehner, E. U. Schlunder, Thermal conductivity of granular materials at moderate temperatures (in German), *Chemie Ingenieur Technik* 42 (1970) 933-941.

# Determination of thermal properties and numerical analysis of heat transfer characteristics for the novel wooden porous green building material

Sheng-Chung Tzeng<sup>1,\*</sup>, Tzer-Ming Jeng<sup>1</sup>, Wei-Ting Hsu<sup>1</sup>, Hsu-Chieh Chou<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Chienkuo Technology University

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Chienkuo Technology University

\*tsc@ctu.edu.tw

## Abstract

The green building receives more and more attentions, and will grow continuously in amount with 10% rate per year. Among the different kinds of green building materials, the wooden green building material is very friendly towards the environment. Therefore, the demand of the wooden green building material will increase sharply. This paper proposes a kind of wooden porous material packed by wooden beads or piece fibers with open cell porosities. The outer layers of this wooden porous material are the perforation wooden plates and the inner layer is the wooden porous medium. Coupling with fans, this wooden porous material can insulate the heat, provide the wood fragrance, absorb the moisture and deodorize. Consequently, the competitive advantage and added value of the product will be promoted much more. This work investigates the design of the wooden porous green building material, as well as the corresponding fluid flow and heat transfer characteristics. Firstly, the effects of the structure and ingredient on the properties of the wooden porous material are explored experimentally. The relevant empirical formulas are also built. Hence, the measured properties of the wooden porous material can be substituted into the numerical model and then the numerical simulation can be performance. This work numerically investigates the flow-resistance, temperature-drop and wood Fragrance-providing performances. The results indicate that the kinds and lengths of the wooden porous materials influence the relevant performances strongly. Finally, the research finds can be the important base of design for the relevant products.

**Keywords:** Green building material, wooden porous material, flow resistance, temperature drop, wood fragrance.