

農廢再利用與低碳家具創新之市場潛力分析

MARKET POTENTIAL ANALYSIS OF AGRICULTURAL WASTE UTILIZATION AND LOW-CARBON FURNITURE INNOVATION

東海大學
化學工程與材料工程學系
助理教授

李冠廷*
Kuan-Ting Lee

東海大學
化學工程與材料工程學系
碩士生

韓佩家
Pei-Jia Han

東海大學
化學工程與材料工程學系
專題生

張庭瑜
Ting-Yu Zhang

東海大學
化學工程與材料工程學系
專題生

徐若庭
Jo-Ting Hsu

東海大學
化學工程與材料工程學系
專題生

蔡沅劭
Yuan-Shao Cai

東海大學
化學工程與材料工程學系
專題生

王冠勛
Guan-Xun Wang

摘要

有效降低農業廢棄物及農業剩餘資材對環境衝擊已成為當前重要議題之一，農廢再利用不僅是一種減碳策略，更是一種資源的永續利用之手段。本文針對農廢再利用和低碳家具創新的市場潛力進行討論。我們認為將農廢循環再利用並轉化為具經濟價值的資源，是促進環境永續發展的重要途徑之一。根據 web of science 資料庫，顯示目前全球農廢再利用至家具材料的相關研究，主要集中在複合板材之藍海領域，特別是纖維素提取和紙漿模塑技術，已成功應用於製備高強度、輕量化的板材，適用於家具製造。根據 SimaPro 生命週期評估軟體的分析結果，以咖啡渣為例，顯示生產每單位咖啡渣塑膠母粒會產生約 0.686 公斤的二氧化碳排放量。根據中華民國專利資訊檢索系統與全球 Innography 專利分析結果，農廢再利用專利佈局，主要集中在中國、美國和日本等國家，這意味著在國際市場上，臺灣農廢再利用技術正面臨來自全球的競爭壓力。

關鍵詞：農廢再利用、咖啡渣、低碳家具、環境永續、生命週期評估。

* 東海大學化學工程與材料工程學系助理教授

407224 台中市西屯區臺灣大道四段 1727 號 · ktleee@thu.edu.tw

MARKET POTENTIAL ANALYSIS OF AGRICULTURAL WASTE UTILIZATION AND LOW-CARBON FURNITURE INNOVATION

Kuan-Ting Lee*

Tunghai University Department
of Chemical and Materials
Engineering

Pei-Jia Han

Tunghai University Department
of Chemical and Materials
Engineering

Ting-Yu Zhang

Tunghai University Department
of Chemical and Materials
Engineering

Jo-Ting Hsu

Tunghai University Department
of Chemical and Materials
Engineering

Yuan-Shao Cai

Tunghai University Department
of Chemical and Materials
Engineering

Guan-Xun Wang

Tunghai University Department
of Chemical and Materials
Engineering

ABSTRACT

Effectively reducing the environmental impact of agricultural waste has become a key issue today. Reusing agricultural waste serves as both a carbon reduction strategy and a pathway to sustainable resource management. This study explores the market potential of agricultural waste reutilization and innovative low-carbon furniture. We posit that recycling agricultural waste and converting it into economically valuable resources is a vital pathway towards environmental sustainability. Current global research, as cataloged in the Web of Science database, focuses primarily on the blue ocean domain of composite boards, particularly in the extraction of cellulose and pulp molding technologies. These techniques have been successfully implemented in the production of high-strength, lightweight boards suitable for furniture manufacturing. According to life cycle assessment analyses conducted using SimaPro software, the production of each unit of plastic masterbatch from coffee grounds results in approximately 0.686 kilograms of CO₂ emissions. Additionally, patent analysis through Taiwan's patent information retrieval system and the global Innography database reveals that patents related to the reutilization of agricultural waste are predominantly concentrated in China, the United States, and Japan. This indicates that Taiwan faces significant international competition in the agricultural waste reutilization technology sector.

Keywords: Agricultural waste reutilization, Spent coffee grounds, Low-carbon furniture, Environmental sustainability, Life cycle assessment.

一、介紹

根據中華民國農業部農業廢棄物共同清除處理機構管理辦法定義，農業廢棄物是指農作、森林、水產、畜牧等動植物產銷所產出之廢棄物^[1]，而農業剩餘資材是指在上述過程，未被完全利用或因功能喪失而遺留的物質，例如農業生產未利用殘體、生產過程使用之剩餘資材、畜禽動物排遺物等^[2]。近年來由於咖啡渣富含脂質、氮、多酚、蛋白質等成分，並且具有特殊的孔洞結構，因此受到國內外廣泛關注，而且被視為是一種具發展潛力的生質物。咖啡渣目前已被廣泛研究並應用於能源、農業、建築及塑膠等多個領域。國內外正積極推動與農廢再利用相關的政策與法規，以貼近市場需求和技術創新。例如，臺灣的氣候變遷因應法^[3]、廢棄物清理法^[4]、再生能源發展條例^[5]等，將農廢妥善處理、回收和資源化利用，以實現溫室氣體長期減量目標為 139 年溫室氣體排放量降為 94 年溫室氣體排放量至少 50% 以下^[6]。歐盟的廢棄物框架指令 (2008/98/EC) 已明確規定了廢棄物處理的優先次序，強調預防、再利用及循環使用的重要性。歐盟也要求成員國逐步提升廢棄物的再利用和循環使用率，部分指標設定在 2025 年前達到適當減量水平。根據歐盟廢棄物框架指令要求 2025 年，成員國需將市政廢棄物的回收率提高到至少 55%，並在 2030 年和 2035 年分別提高到 60% 和 65%^[7]。根據 112 年臺灣的農業廢棄物排放量統計資料^[8]，農業廢棄物年產量已超過 5 百萬噸。農業廢棄物的再利用或去化，包含掩埋^[9]、作物栽培與覆蓋^[10]、焚燒^[11]、倉庫墊料^[12]、育苗栽培介質^[13]、堆肥^[14]、飼料^[15]及燃料^[16]，其中，以堆肥、掩埋和焚燒是目前主要的處理方式。堆肥雖有助於改善土壤肥力和生產力，但處理不當仍會對環境造成破壞，例如重金屬污染等^[17]。目前大多數農業廢棄物都可通過掩埋進行消耗處理，但含水量較高的農業廢棄物在掩埋場中容易生物降解，產生溫室效應遠強於二氧化碳之甲烷排放，此外，掩埋方式容易使農業廢棄物滋長黴菌，導致潛在環境污染^[18]。焚燒是指有機物在高溫與富氧環境中燃燒的一種熱化學過程^[19]。研究結果顯示，燃燒農業廢棄物容易排放許多有害氣體，如 CO、N₂O、NO₂、SO₂、CH₄、粒狀污染物和碳氫化合物^[20]。這些氣體除了會導致全球暖化與環境污染外，甚至可能會損害人體呼吸系統並引發呼吸道疾病^[21]。特別是當有機物進行不完全燃燒時，還可能會釋放戴奧辛、呋喃、汞和多氯聯苯等有毒氣體^[22]。戴奧辛是一種潛在且致命的有機污染物，會殘留在農

作物或是自來水中，最終進入食物鏈，導致癌症並破壞甲狀腺和呼吸系統^[23]。

為了降低農業廢棄物產量與不當去化所產生的環境危害，發展農業廢棄物再利用技術，已成為產學研很重要的一個研究與發展領域。農廢再利用技術是指將農業生產與使用過程中的副產品和廢棄物轉化為具有經濟價值的資源，從而直接或間接減少環境污染和資源浪費^[24]。過去有許多研究成果，已成功將農廢再利用的案例，例如肥料^[25]、土壤改良劑^[26]、飼料^[27]、能源^[28]、工業原料^[29]、建築材料^[30]、污染防治^[31]、家具應用^[32]。目前的農廢再利用技術例如通過酸或鹼處理提取纖維素，以製備由纖維素和樹脂等黏合劑組成的複合材料，經熱壓成型後製成高強度、輕量化的板材。纖維素的提取有助於增強複合材料的黏結性和強度^[33]。農業廢棄物也可直接與生物樹脂混合，製成生物複合材料。紙漿模塑技術是指將廢紙和農廢纖維素打漿後，透過模塑成型技術以製成具特定形狀和強度的零部件材料^[34]。熱解是透過熱化學反應將有機物轉質成生物炭的一種炭化技術^[35]，然後將所製備之生物炭進一步與黏合劑混合，製成具高強度和耐久性的複合材料，或是利用傳統發泡技術製成具輕質和隔熱性能的發泡材^[36]。酶解是一種利用酵素酶將農業廢棄物中的纖維素分解為低聚糖和單糖，再重新進行聚合和成型的生化技術^[37]。經酶解處理後的木質素和纖維素可以製成高強度的桌椅。而再生塑料技術則將再生塑料與農廢纖維混合，通過模塑成型製作複合材料，不僅減少了塑料廢棄物，還提高了資源再利用率和材料性能^[38]。

低碳家具是一種環保、可持續的家具，透過減少生產和使用過程中的碳排放量，降低對環境的影響，並促進廢棄物的循環利用^[39]。選擇適當的低碳家具材料對於其環保特性非常重要。一般會選擇可再生、可回收的材料，例如竹子、再生木材、再生塑料和生物基材料，如此一來可以大幅度地減少家具生產過程中的碳足跡^[39-41]。竹材因快速生長、生長周期短、高效碳吸收能力，因此近年被廣泛應用於低碳家具製造。再生木材和再生塑料的使用不僅減少了對新材料的需求，還有效利用了廢棄資源。低碳家具的生產過程強調能源的高效利用和廢棄物的減少^[39, 42]。自動化生產和智能化管理都可以有效提高生產效率，降低能源消耗^[43]。使用太陽能、風能等可再生能源替代傳統化石能源，是低碳家具生產中的重要措施^[39, 44]。此外，生產過程中的廢棄物需要透過回收再利用或無害化處理，以間接減少對環境的影響。設計低碳家具應該考慮其耐用性、可維修性和多功能性，以延長其使用壽

命，減少資源消耗^[45]。家具部件進行模組化設計可讓家具在損壞或磨損時進行更換和升級，而不需丟棄整體^[46]。多功能家具，例如可折疊桌椅、變形沙發等，可以在有限的空間內實現多種用途，提高資源利用效率^[47]。低碳家具在其使用壽命結束後，應進行合理的回收和再利用。家具製造商可以提供回收服務，將廢舊家具回收後進行分解和再加工，製作成新的產品^[48, 49]。這不僅有助於減少廢棄物的產生，還能促進資源的循環利用，實現可持續發展的目標。

本文章聚焦於分析農廢再利用，透過文獻分析、專利檢索以及生命週期評估，以深入討論低碳家具之市場發展潛力。在碳費和碳稅的壓力下，家具產業未來將面臨許多挑戰。發展創新材料技術和製造工藝以降低碳排放、提高環保性能和耐用性將是技術產業化的關鍵。低碳家具有助於減少碳排放和保護環境，通過優化各個環節，將在市場中扮演重要角色，助力全球可持續發展目標的實現。

二、分析方法

2.1 文獻分析

Web of Science (Clarivate) 是一個學術界常用的文獻檢索資料庫，涵蓋 256 個學術領域，包括 Science Citation Index Expanded (SCIE)、Social Sciences Citation Index (SSCI)、Arts & Humanities Citation Index (AHCI)、Conference Proceedings Citation Index (CPCI) 等^[50]。可充分提供學術研究所需之期刊、會議論文、書籍等資料，以瞭解並分析目前全球科學研究趨勢。VOSviewer 是由荷蘭萊頓大學 CWTS 研究中心所開發之免費軟件工具，用於構建和視覺化文獻資料。VOSviewer 可幫助學研單位視覺化和分析文獻之間的引用關係，進而幫助理解研究領域的發展趨勢和關聯。可從 Web of Science 將引用次數、參考文獻、作者資訊等數據導出，並利用這些數據在 VOSviewer 中構建各種文獻指標網絡，以分析特定研究領域之熱點主題和關鍵研究趨勢。

2.2 專利分析

Innography 是由 Clarivate 所提供之付費專利分析軟件，用於分析專利數據，識別市場趨勢、競爭對手和潛在風險。Innography 可處理和分析大量的專利資料，透過數據視覺化工具，如趨勢圖、熱圖、氣泡圖等，以更直觀地理解專利數據和市場趨勢。

2.3 生命週期評估

生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一種系統性方法，用於評估產品、過程或服務在其整個生命週期內對環境的影響^[51]。LCA 的方法建立在 ISO 14040 系列和 ISO 14044 標準框架下，這些標準確保了評估過程的統一性和透明性。LCA 分析的核心包括四個主要階段：確定目標和範圍、進行生命週期清單分析 (Life Cycle Inventory, LCI)、進行生命週期影響評估 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)，以及對結果的解釋和提出改進建議^[52, 53]。LCA 評估涵蓋從原材料獲取、製造、使用、維護直到最終廢棄處置的每一階段，旨在提供全面的環境影響數據，支持可持續發展與決策。執行 LCA 的關鍵步驟包括目標與範圍界定、生命週期清單分析、生命週期影響評估以及結果解釋與改進建議^[53-55]。SimaPro 是由 PRé Sustainability 公司開發的一款付費軟體，用於進行生命週期評估 (LCA)。該軟體有助於研究機構和學術單位評估從原材料獲取到最終處理的環境影響。SimaPro 使用包括 Ecoinvent 和 Agri-footprint 在內的多個數據庫，這些數據庫提供了各種原材料、能源、排放物和廢物的數據。通過定義每個階段的投入和產出，SimaPro 能夠進行生態足跡分析、生命週期評估、比較分析和報告生成。本研究所參考使用之資料庫包含 Agri-footprint-economic-system、Agri-footprint-economic-unit、Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification-system、Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification-unit、EU&DK Input Output Database、Industry data 2.0、Methods: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H、USLCI 等。

三、結果與討論

3.1 文獻分析

為了初步了解農業廢棄物再利用至家具市場的技術能量，選用涵蓋 256 個學術領域之 Web of Science (Clarivate) 檢索資料庫，作為期刊文章搜尋與分析使用。鍵入關鍵字「Agricultural waste」(檢索日期為 2024/11/11)，找到 29,962 篇文章，其中 Review Article 僅佔了總篇數的 12.7%，剩餘的都是 Research Article。檢索結果發現 Citation Topics Meso 超過 5% 以上的研究主題或領域包含 Soil Science、Water Treatment、Bioengineering、Paper & Wood Materials Science、

Paper & Wood Materials Science 是紙張與木材材料科學，這個主題領域直接涉及到製作家具的材料，如木材和木質複合材料。**Cellulose** 則是木材和其他植物材料中的主要成分，可用於製作許多家具材料。

The figure consists of two panels illustrating research trends from 2010 to 2025.

Top Panel: Network Graph

- A color scale at the top left indicates the year: 2010 (blue), 2015 (green), 2020 (yellow-green), and 2025 (yellow).
- The graph shows a dense network of interconnected nodes representing various research topics.
- Key clusters include:
 - Biomass/Wood Waste:** biomass, wood waste, agricultural waste, catalytic pyrolysis, fuel, polypropylene, mechanical-properties, polymer composites, performance, fungal mycelium, bioenergy, growth, composite, mycelium, bio-based materials, dimensional precision analysis.
 - Composites:** composites, particleboards, particleboard, physical and mechanical properties, raw material, panels, density, biomass production, modulus, biocomposite, behaviors, a hybrid, fibers, behavior, agricultural waste ensiled, mechanical properties, polymer composites, mechanical-properties, bioenergy, pyrolysis, agricultural farm, mycelium, composite.
 - Other Topics:** pretreatment, wastes, agent, flame-retardant, antibacterial, cellulose microfibrils, bond strength, fiber, cellulose, microfibers, activated coke, acid dye, activated carbon, components, size, binder-free plate, adhesives, physical and mechanical proper, raw-material, panels, density, biomass production, modulus, biocomposite, behaviors, a hybrid, fibers, behavior, agricultural waste ensiled, mechanical properties, polymer composites, mechanical-properties, bioenergy, pyrolysis, agricultural farm, mycelium, composite.

Bottom Panel: Word Cloud

- This panel displays a word cloud where the size of each word represents its frequency or importance.
- The words are arranged in a grid-like fashion, with larger words indicating higher frequency.
- Key terms visible include:
 - agricultural waste, biomass, wood waste, composites, particleboards, particleboard, physical and mechanical properties, raw material, panels, density, biomass production, modulus, biocomposite, behaviors, a hybrid, fibers, behavior, agricultural waste ensiled, mechanical properties, polymer composites, mechanical-properties, bioenergy, pyrolysis, agricultural farm, mycelium, composite.
 - Other terms: cane bagasse, pretreatment, wastes, agent, flame-retardant, antibacterial, cellulose microfibrils, bond strength, fiber, cellulose, microfibers, activated coke, acid dye, activated carbon, components, size, binder-free plate, adhesives, physical and mechanical proper, raw-material, panels, density, biomass production, modulus, biocomposite, behaviors, a hybrid, fibers, behavior, agricultural waste ensiled, mechanical properties, polymer composites, mechanical-properties, bioenergy, pyrolysis, agricultural farm, mycelium, composite.

圖 1 VOSviewer 分析圖 (上圖) 與關鍵字關聯強度 (下圖)。

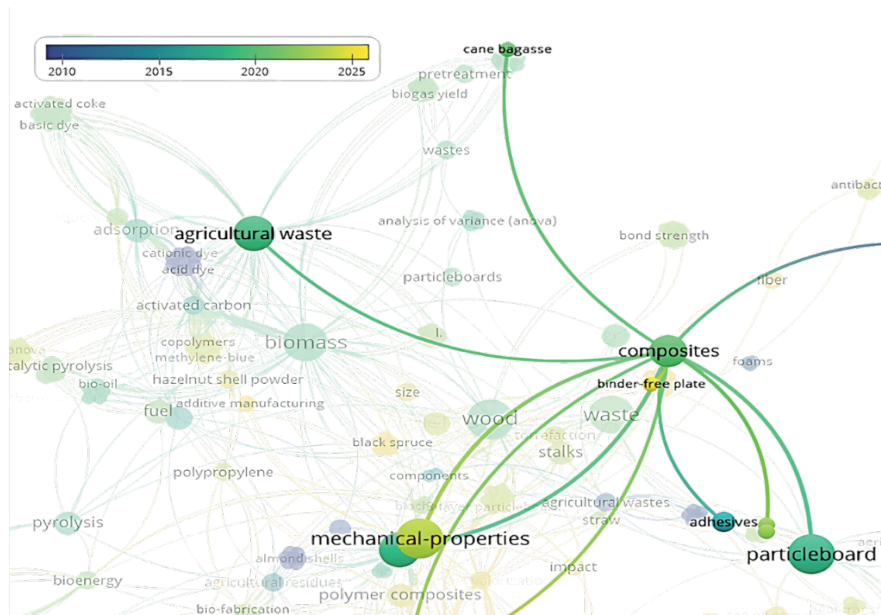


圖 2 鎖定 "Composites" 關鍵字之 VOSviewer 分析圖

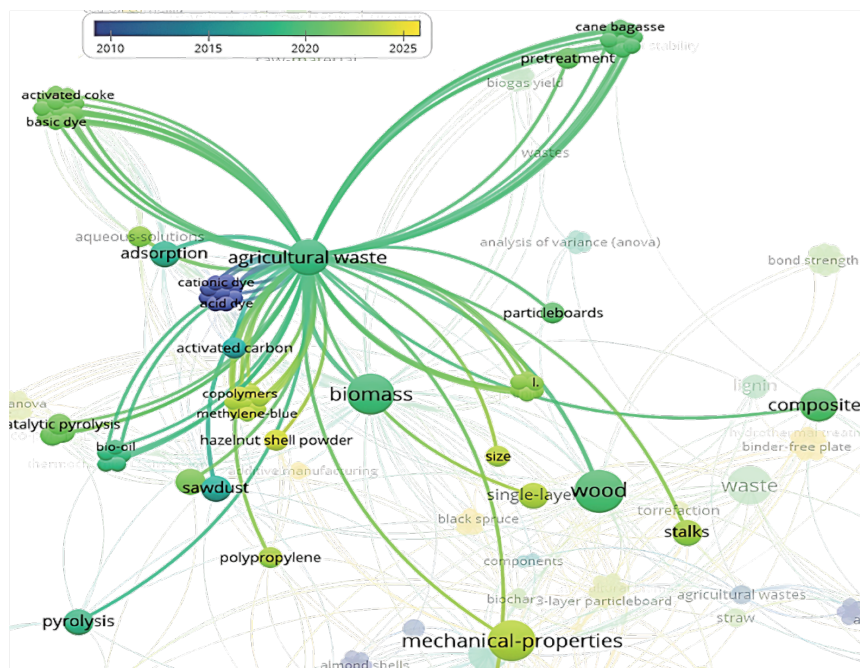


圖 3 鎖定 "Agricultural waste" 關鍵字之 VOSviewer 分析圖

為了探索農業廢棄物與家具的關聯性分析，聚焦「Composite」關鍵字，VOSviewer 分析結果顯示，與 Composite 相關聯之關鍵字包含 Mechanical properties、Biocomposites、Agricultural waste enset fiber、Particleboard、Binder-free plate、Adhesives、Agricultural waste、Cane bagasse、Cellulose microfibrils，其中以 Mechanical properties 和 Biocomposites 是近兩年 (2023 ~ 2025) 較新的技術發展，如圖 2 所示。

於 VOSviewer 分析圖中，鎖定「Agricultural waste」關鍵字，可以發現 VOSviewer 分析圖中與其相關聯的關鍵字包含 Biomass、Wood、Composites、Sawdust、Pyrolysis、Polypropylene、Catalytic pyrolysis、Copolymer、Activated Carbon、Methylene Blue、Particleboards、Adsorption、Pretreatment、Mechanical properties、Polymer composites，如圖 3 所示。顯示目前農廢再利用與家具等複合材料有關的研究主題外，還

包含廢水處理、生物炭或活性碳製備。

3.2 專利分析

根據中華民國專利資訊檢索系統，搜尋「農業廢棄物再利用」關鍵字，結果顯示，共有十件專利，七件為發明專利，另外三件是新型專利，如表一所示。這十件專利中有四件已失效，兩件仍在專利保護期，剩下三件在審查中，一件被核駁。所搜尋出的發明專利名稱分別是植物纖維環保餐具製程、改質米糠作為吸附劑以及使用其去除廢水中染料之方法、由花生莖萃取得之白藜蘆醇萃取物用於製造降低前列腺癌放射線抗性醫藥組合物之用途、植物纖維環保餐具製程、改質米糠作為吸附劑以及使用其去除廢水中染料之方法、由花生莖萃取得之白藜蘆醇萃取物用於製造降低前列腺癌放射線抗性醫藥組合物之用途、一種從火龍果莖萃取多醣物質、製備方法及其利用。三件新型專利分別是稻稈防火板材結構、環保餐具製造設備、白舞茸栽培裝置。針對新式樣/設計專利，則沒有相關專利。

在這十件專利中，僅有一件與家具材料相關，新

型專利名稱為稻稈防火板材結構，其公開公告號為M640456，公開公告日為2023 / 05 / 01。這項專利使用一種由稻稈條、防火膠和樹脂組成的防火板材結構。稻稈條被裁切成約3 ~ 5公分長，與防火膠和樹脂混合，製成重量輕、防火、保溫、隔熱且強度高的板材。此技術可解決建材強度和韌性的不足，透過結合農業廢棄物再利用，發展此環保防火建材。這種防火板材有機會在未來應用至家具，提升其防火性能。由於此類材料重量輕、強度高，也很適合製造各種家具，如書架、桌子和櫥櫃等。利用農業廢棄物製作家具，不僅減少了對新材料的需求，還推動了資源的循環利用，有助於減少環境污染和碳排放，還促進了可持續發展和環保理念的實現。

為了進一步分析農廢再利用於國際上的專利佈局，使用Clarivate所提供之Innography系統，來進行專利數據分析，以了解市場趨勢、競爭對手和潛在風險。鍵入關鍵字「Agricultural waste」（檢索日期為2024/11/11），找到136,323件專利，其中有90,118件專利失效，仍在專利保護期的專利佔33.89%。擁有專利數量最多的管轄權國家是中國，佔了59.88%，其次為美國（9.22%）、印度（5.34%）、日本（4.62%）、韓國

表 1 中華民國專利資訊檢索系統。

公開公告號	公開公告日	申請號	申請日	專利名稱	案件狀態
M640456	2023/05/01	111211609	2022/10/25	稻稈防火板材結構	核准
I670305	2019/09/01	107128271	2018/08/14	植物纖維環保餐具製程	消滅
M570788	2018/12/01	107211089	2018/08/14	環保餐具製造設備	消滅
I617515	2018/03/11	105136834	2016/11/11	改質米糠作為吸附劑以及使用其去除廢水中染料之方法	消滅
I547285	2016/09/01	104111582	2015/01/10	由花生莖萃取得之白藜蘆醇萃取物用於製造降低前列腺癌放射線抗性醫藥組合物之用途	核准
M495717	2015/02/21	103216696	2014/09/19	白舞茸栽培裝置	消滅
202009262	2020/03/01	107128271	2018/08/14	植物纖維環保餐具製程	未審查/公開
201817683	2018/05/16	105136834	2016/11/11	改質米糠作為吸附劑以及使用其去除廢水中染料之方法	未審查/公開
201636068	2016/10/16	104111582	2015/04/10	由花生莖萃取得之白藜蘆醇萃取物用於製造降低前列腺癌放射線抗性醫藥組合物之用途	未審查/公開
201313260	2013/04/01	100133541	2011/09/19	一種從火龍果莖萃取多醣物質、製備方法及其利用	核駁

(3.48%)，如圖 4 所示。圖 5 為關鍵字使用 Agricultural waste 之年成長專利數量分析，可以發現專利申請數也隨減碳發展正逐年上升中。

分析這 46,205 件專利，可發現其主流應用領域分布在 Fermentation、Bioenergy、Wastewater treatment。若進一步將關鍵字限縮在「Furniture」，則可找到 922 件專利，依照專利數目觀察其應用主要分布在將農廢提取有用成分的領域，例如 Lignocellulosic、Lignocellulosic materials、Texturizing、Cellulosic、Nanostructure、Biomass、Interpolymer。至於其他與 Wood-plastic、Waste containing、Composite material 相關的專利主題分類，估算其專利數佔比不到 5%。由此

可見，將農廢再利用至家具材料仍屬於「藍海」市場。根據專利管轄權國家分析，發現將農廢再利用至與家具相關應用之專利，仍以中國居冠，其次依序為美國、日本、世界知識產權組織、歐洲專利局，如圖 6 所示。

圖 7 (上)為擁有這 922 件專利之 Top 5 的公司，分別是 BASF SE (48 件)、Eastman Chemical Company (32 件)、Jinan Shengguan Group Shareholdings CO., Ltd (31 件)、Xyleco Inc (61 件)。圖 7 (下) 為擁有這 922 件專利之 Top 20 的公司分布圓餅圖。

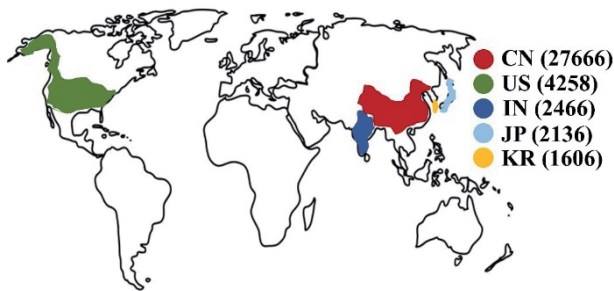


圖 4 鎖定 "Agricultural waste" 關鍵字之專利管轄權國家分析圖

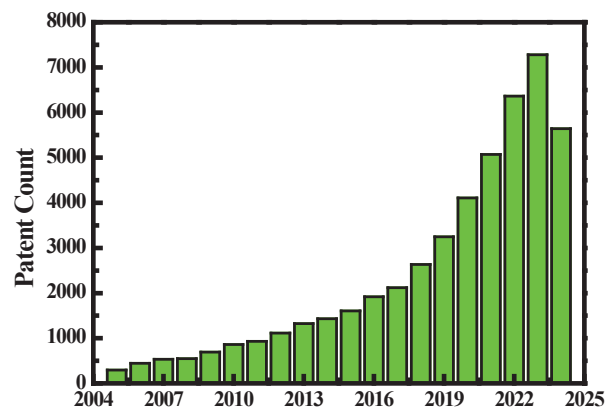


圖 5 年成長專利數量分析圖

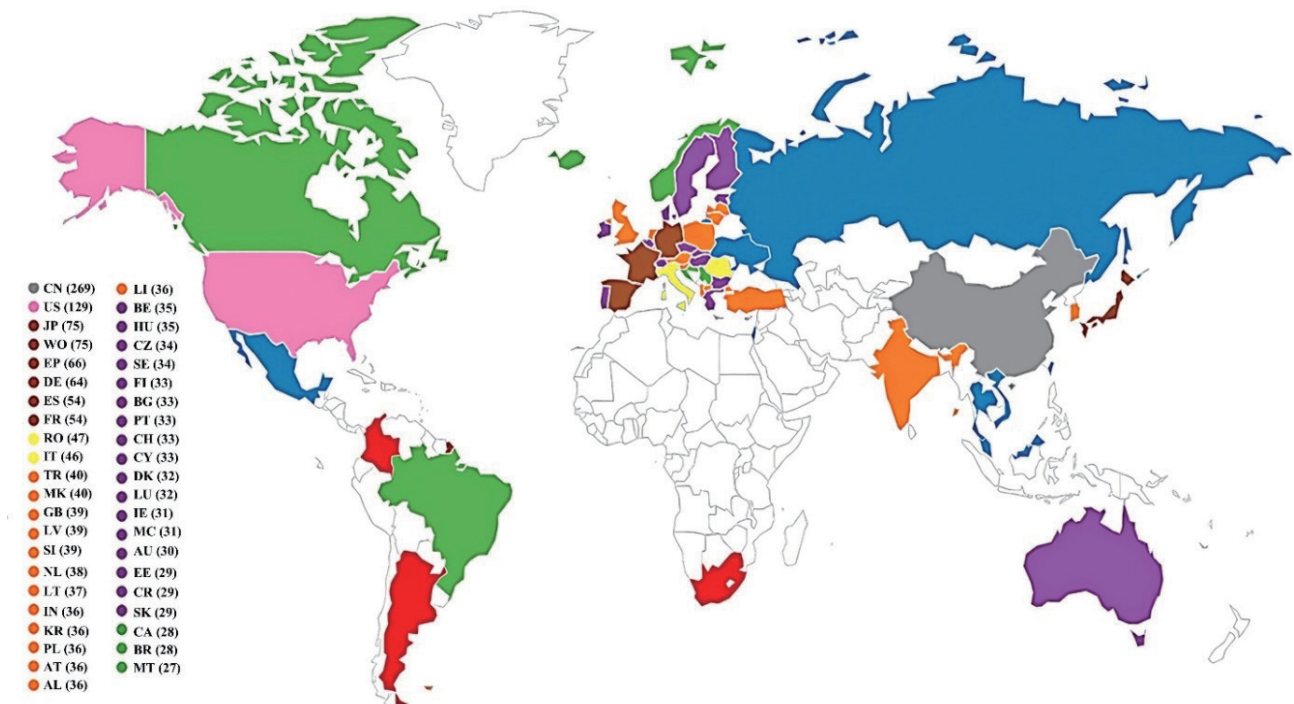


圖 6 農廢再利用至家具材料相關之專利管轄權國家分析

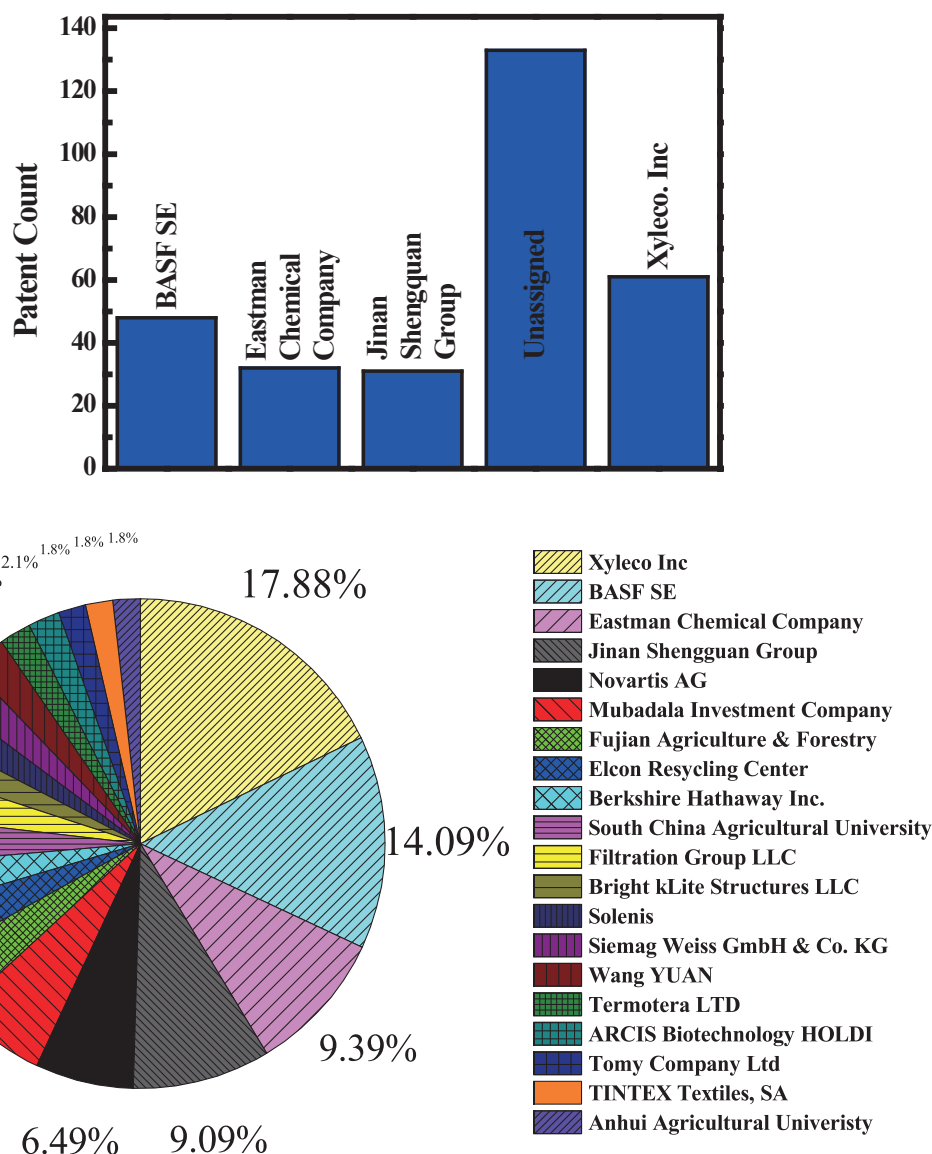


圖 7 農廢再利用至家具材料相關之專利擁有公司排名 Top 5 (上) · Top 20 (下)

圖 8 為目前 Top 5 公司擁有這 922 件專利之年成長數量分析圖。從分析圖可觀察到專利數占比最高的中國，在 2007 年至 2014 年間，每年大約以 3~10 件的專利數量穩定成長，自 2015 年開始，每年專利數量急速上升至 20~25 件，也突顯農業廢棄物再利用在商業發展的潛力。美國則是從 2020 年開始，專利數量才比較有大幅度的增長，每年專利數量大約 8~10 件，而日本的年專利數量平均都在 5 件以下。

3.3 生命週期評估

隨著綠建築與低碳家具風潮崛起，政府與產業積極推動循環經濟與再生材料的發展，特別是產值超過

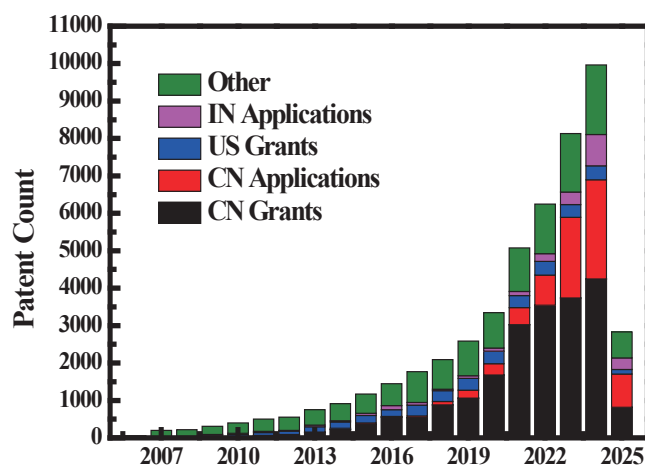


圖 8 專利擁有公司排名 Top 5 之年成長專利數量分析圖

數千億元的家具產業。為了客觀且量化直接或間接所降低的二氧化碳排放量，許多產業已開始使用生命週期評估 (LCA) 來評估與計算。LCA 在推動農業廢棄物再利用中扮演著至關重要的角色。LCA 能夠全面評估從農業廢棄物收集、處理、再利用到最終產品製造的整個過程之環境影響^[57]，如圖 9 所示。目前許多國際法規，例如 ISO 14040 系列標準，對生命週期評估已提供明確的指導和要求。這些規範有助於標準化 LCA 在評估農業廢棄物再利用過程中碳排放和環境影響的應用。此外，臺灣的碳足跡核算標準也為農廢再利用技術在實現減碳目標提供了重要的政策支持。如果沒有使用 LCA 來評估農業廢棄物再利用的影響，可能無法評估最佳之再利用方法，導致浪費資源，增加碳排放。也可能因未能有效評估和管理環境影響，會導致土壤、水質和空氣的潛在污染，甚至可能會導致不必要的成本和資源浪費。一般來說，農業廢棄物再利用至家具材料的製程，可分成收集和運輸、處理和分類、加工、製造、分銷和使用^[58]。根據文獻資料估算，收集和運輸是指從農場收集廢棄物並運輸到處理場所，每噸廢棄物約產生 0.5~1 噸 CO₂^[59]。處理和分類是指將廢棄物分類並處理，以備後續之進一步加工，每噸廢棄物約產生 2~3 噸 CO₂^[60]。加工是將處理後的廢棄物轉化為可用於家具製造的材料，每噸廢棄物約產生 0.1~0.2 噸 CO₂^[60]。製造是使用加工後的材料製造家具，每噸廢棄物約產生 4~5 噸 CO₂^[60]。最後則是將所產製的家具進行分銷與使用，每噸廢棄物約產生 0.8~1 噸 CO₂^[60]。

臺灣盛產的作物包含稻米、菱角、水果、蔬菜、茶葉等，其中稻米更是重要產量龐大的農產品，而稻草是稻米的延伸農業廢棄物。根據統計，稻草年產量已超過數百萬噸。若以稻草轉化為家具材料為例，第一步會收集農田中的稻草廢棄物，這一過程的碳排放量較低，主要是因為稻草通常不需要額外的運輸或複雜處理。假設每收集 1 噸稻草廢棄物，碳排放量約為 0.6 噸 CO₂^[61]。第二步則是將收集到的稻草粉碎成纖維顆粒，並與黏合劑混合。這一步涉及的能源消耗主

要來自於電力和化石燃料的使用，總碳排放量約為 0.4 噸 CO₂^[62]。第三步是將所製之混合物送入熱壓機進行高壓熱壓成型，製成中密度纖維板。這個熱壓過程需大量能源，碳排放量約為 0.5 噸 CO₂^[63]。第四步將將製成的 MDF 加工成各種家具零部件，如桌面、椅子座板等。這些零部件在使用過程中碳排放相對較低，但製造過程中會產生額外的碳排放，約為 0.7 噸 CO₂^[64]。第五步是將製成的家具被分銷到市場並開始使用。雖然在使用過程中的碳排放量較低，但在分銷過程中會有一定的碳排放，約為 0.2 噸 CO₂^[65]。最後是假設當使用壽命結束後，這些纖維板家具可能被丟棄、回收或再利用。回收過程中所需的能源和處理也會產生一些碳排放，約為 0.3 噸 CO₂^[66]。從在這個例子，可以了解 LCA 對於農廢再利用的角色和重要性，必須全面評估每個環節的碳排放量和環境影響，確保整個過程的可持續性。另外若能得到決策支持，可提供科學數據支持決策，選擇最佳的再利用方法。最後就是要盡量縮小環境影響，通過評估和改進每個環節，減少碳排放和其他環境影響。

圖 10 是使用 SimaPro 軟體估算每公斤咖啡渣經轉化再利用成塑膠母粒之生命週期評估模型。塑膠母粒是塑膠射出加工主要的原物料，也是目前塑膠家具製品的重要材料。此評估是以食品廠所產出之咖啡渣進行循環再利用為模擬場域。從圖中箭頭粗細可觀察咖啡渣於運輸、乾燥、熱解、生產與加工過程對於環境的影響程度大小。紅色箭頭越粗，表示該過程對環境的影響越大。乾燥與熱解所使用之熱源設定來自工廠中低溫廢熱。咖啡渣經過熱解會產生生物炭，透過生物炭與高分子材料複合，以製造塑膠母粒之生物複合材料並作為未來生產塑膠家具製品。生物炭可做為取代來自化石燃料的碳黑。碳黑是目前市售黑色塑膠母粒的主要染色添加劑。圖 10 的分析結果顯示，每生產單位咖啡渣塑膠母粒會產生約 0.686 公斤的二氧化碳排放量。咖啡渣的含水率以 70%計算，而在熱解產製生物炭時，其固態產率以 50%計算。從整個咖啡渣再利用過程，可以發現咖啡生產階段是主要的碳排放環節，這表明咖啡渣再利用的碳足跡主要受到咖啡生產過程中排碳量的影響。若排除咖啡生產階段的碳排放，則生產每單位咖啡渣塑膠母粒僅產生約 5.7×10^{-5} 公斤的二氧化碳排放量。相比之下，圖 11 中的碳黑塑膠母粒 LCA 分析顯示，若排除咖啡生產階段的碳排放，其每生產單位塑膠母粒的二氧化碳排放量是接近的。若加上使用碳黑所延伸的碳費或碳稅，這更加凸顯出將咖啡渣循環經濟再利用至塑膠母粒的可行性及其經濟價值。



圖 9 LCA 流程圖

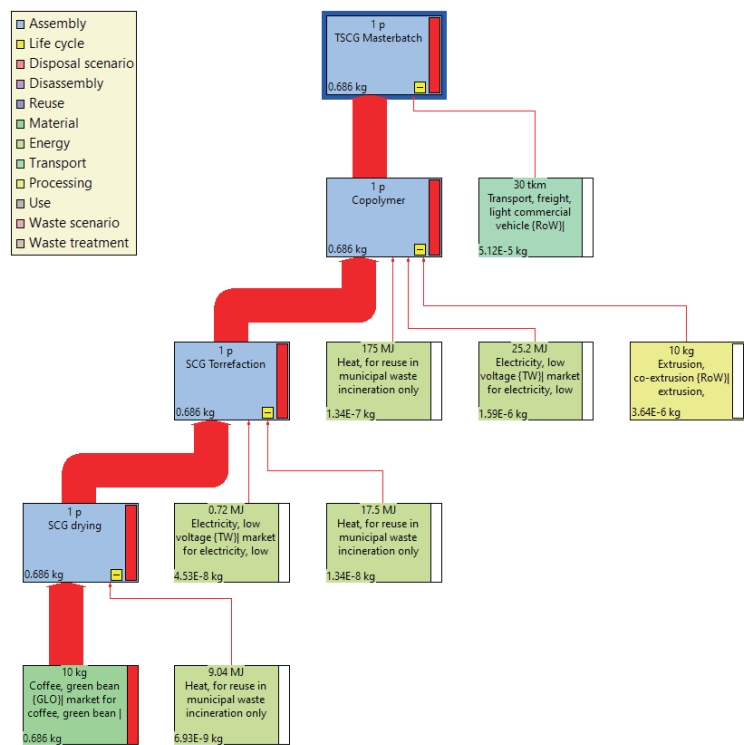


圖 10 咖啡渣再利用之 SimaPro 生命週期評估

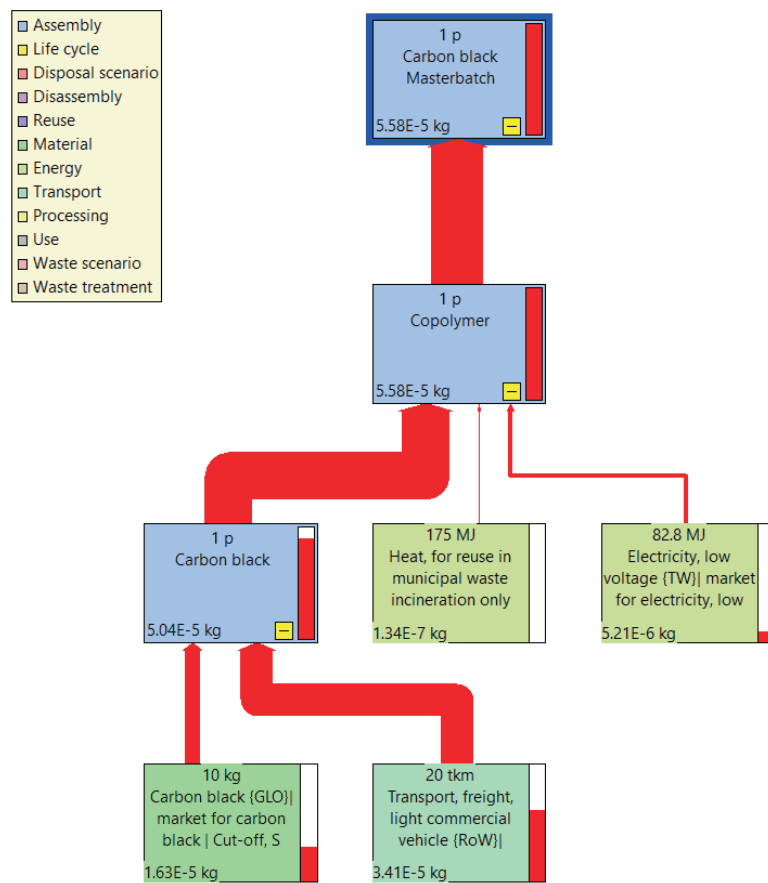


圖 11 碳黑塑膠母粒之 SimaPro 生命週期評估

生物複合材料是一種將農業廢棄物與生物基樹脂混合而成的材料^[67]。一開始必須收集農業廢棄物和獲取生物基樹脂，此過程之碳排放量取決於材料的運輸和處理方式^[68]。將這些廢棄物被粉碎並與生物基樹脂混合，此步驟的碳排放量大約在 400 至 800 公斤 CO₂之間^[69]。後續，將此混合物經擠壓成型處理，以製成生物複合材料板。此製造過程需大量電能，所以會產生部分的碳排。生物複合材料可以被應用於家具製作，例如桌面和椅子^[70,71]。家具在使用階段的碳排放量相對較低。預期當這些家具的使用壽命結束後，其回收過程需要專門技術來分離生物基樹脂和纖維，這個過程會產生部分碳排放。而紙漿模塑技術則是混合廢紙和農業廢棄物的纖維，經過打漿程序後，利用模塑成型技術以製作成具特定形狀和強度的家具零部件^[72]。在收集廢紙和農廢纖維的碳排放量較低。打漿程序的 CO₂碳排放量約 300 至 600 公斤^[73]。紙漿模塑家具通常輕便且具有良好的結構強度。

熱解炭化技術是一種將農業廢棄物轉化為生物炭的技術，能夠提高材料的穩定性、儲存性和機械性質，並提供染色功能。生物炭可與黏合劑混合製成高強度和耐久性的家具材料，如書架和櫥櫃。由於熱解炭化需要高溫製程，能源需求較大，估計會產生 600 至 1,200 公斤 CO₂的碳排放。

Iritani 團隊^[74]的研究資料提供了多種木製家具之生命週期評估，包括辦公桌和辦公椅、訪客椅、嬰兒床、書桌、床頭櫃、木椅、木桌和衣櫃等。團隊分析利用中密度刨花板所製作之衣櫃，估算其碳排放

量約 290.75 公斤 CO₂，而生產階段之碳排放量約為 125 公斤 CO₂。研究報告也指出，利用木材廢料作為原料生產刨花板是一種環境友善的替代方案。

Sara 團隊^[75]的研究則是針對總重為 173.9 公斤之床、書桌和床頭櫃，進行 LCA 分析。結果顯示其全球暖化潛勢值的碳排放量高達 164.9 公斤 CO₂，總環境影響之 49%來自木質材料的使用，21%來自電力生產，剩餘的 30%可歸屬於生產過程中的其他因素，包括生產過程中的輔助材料、廢料處理、材料運輸及包裝等流程。Sara 團隊^[76]的另一項研究曾指出兒童床的碳排放量主要來自刨花板的生產。櫥櫃於生產過程之電力消耗佔了大部分碳排放量。客廳家具之總碳排放量，其電能佔 41%，MDF 佔 22%。通風木牆所使用刨花板之碳排放量佔總碳排 21%。

3.4 國內案例分享

3.4.1 嘉義縣:

嘉義縣是一個以農業為主的地區，當地大量生產稻穀和竹子。部分企業和設計師利用稻穀和竹廢料製作各類家具。從稻田收集稻穀的過程中，碳排放量較低，平均每噸稻穀約產生 0.5 噸 CO₂。這些稻穀經過粉碎和壓縮處理，製成纖維板材，處理過程中的碳排放量約為 700 至 900 公斤 CO₂，然後這些板材被加工成桌椅等家具，製造過程中的碳排放量約為 400 至 600 公斤 CO₂。竹廢料則從竹林中收集，每噸竹廢料的碳排放量約為 0.4 噸 CO₂。竹廢料經過切割



圖 12 臺灣各縣市農廢再利用製作相關家具材料之案例

和打磨，製成竹板材，處理過程中的碳排放量約為 600 至 800 公斤 CO₂，這些竹板材被用於製作家具，如桌子和椅子，製造過程中的碳排放量約為 300 至 500 公斤 CO₂。這些家具具有天然環保的特性，稻殼和竹廢料的再利用不僅減少了廢棄物處理的碳排放，還提供了高強度和耐用的家具解決方案^[77]。

3.4.2 屏東縣:

屏東縣是臺灣農業生產的重要地區，特別是在畜牧業和水產業方面具有發達的產業結構。當地利用椰子殼和養殖業廢棄物進行再利用，將椰子殼加工成椰纖板後用於製作家具，如桌子和椅子。這一過程的碳排放量約為每噸 500 至 1,000 公斤 CO₂。此外，魚骨等養殖業廢料可轉化為膠合材料，用於製作具有特殊紋理的家具，如櫥櫃和書架。這些再利用技術不僅減少了廢棄物處理的環境負擔，還提供了高附加值的家具製品，有助於推動可持續發展^[78]。

3.4.3 花蓮縣:

花蓮縣以其豐富的自然資源而聞名，當地有效利用農業廢棄物進行家具製作。花蓮玉的石材廢料和木材加工過程中的邊角料是主要的再利用材料。石材廢料經過加工後，被製成獨特的石質家具，而木材廢料則被製成各類木製家具，這些家具既美觀又環保，展示了可持續利用自然資源的創新方法^[79]。

3.4.4 苗栗縣:

苗栗縣以其竹藝而聞名，當地廣泛利用竹廢料

製作竹家具。這些家具不僅具有優良的透氣性和彈性，還保留了竹子的天然香氣，深受市場歡迎。這種再利用方法不僅節約了資源，還促進了環保與可持續發展^[44]。

3.4.5 台南市:

台南市的農業廢棄物再利用主要集中在稻穀廢棄物和糖業副產品的應用。當地企業將稻穀和甘蔗渣轉化為可用於家具製作的板材，這些材料被用來製作書桌、椅子和櫥櫃等家具。這些材料不僅實用，還具有環保特性，有效減少了廢棄物的碳排放，促進了資源的可持續利用^[80]。

3.5 國外案例分享

3.5.1 印度:

印度是世界上最大的椰子生產國之一，傳統上椰殼多被丟棄或用作燃料。然而，近年來設計師和企業開始將椰殼加工成板材，用於製作椅子、桌子和燈具等家具。首先，從椰子加工廠收集椰殼，這一過程的碳排放量相對較低，約為每噸 0.3 噸 CO₂。然後，椰殼經過粉碎和壓縮製成纖維板材，這一過程的碳排放量約為每噸 800 至 1,200 公斤 CO₂。這些纖維板材進一步加工成家具，製造過程中的碳排放量約為每噸 500 至 800 公斤 CO₂。這些椰殼家具不僅環保，還具有獨特的質感和外觀，受到市場歡迎。通過再利用椰殼，不僅減少了廢棄物處理的碳排放，還創造了具有高附加值的家具產品^[81]。

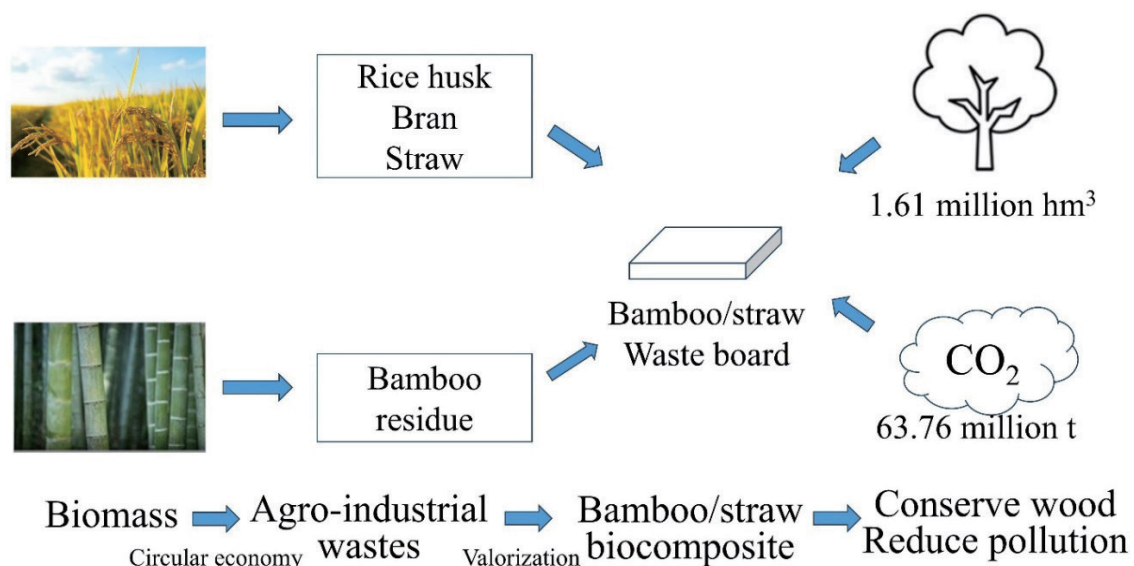


圖 13 農業廢棄物的循環經濟及優點^[80]

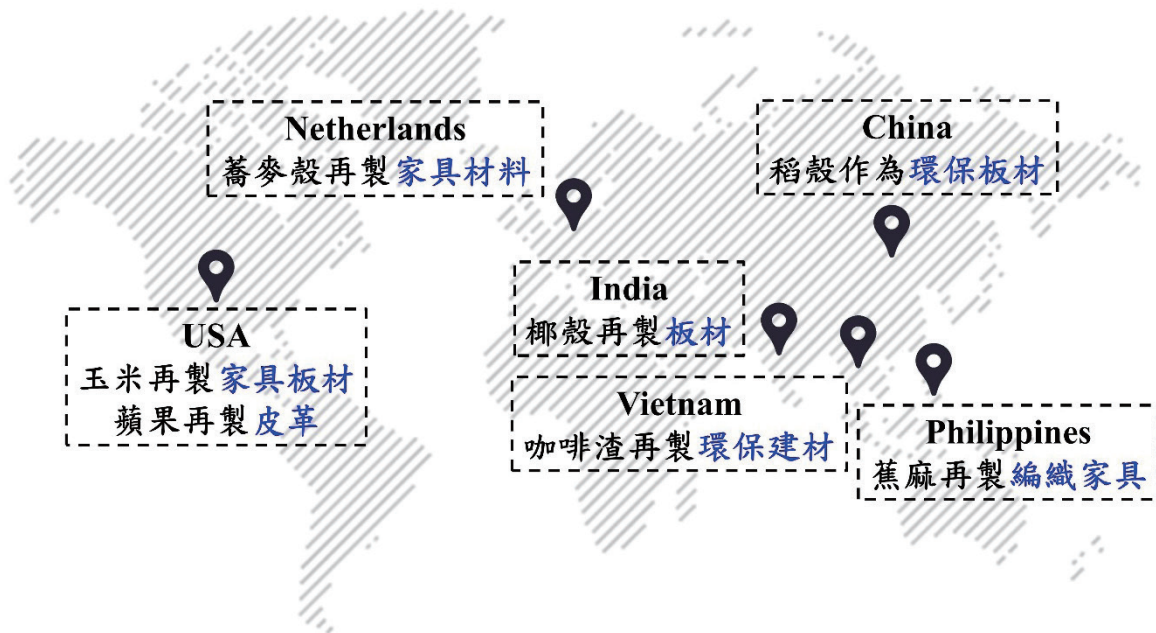


圖 14 全球農廢再利用製作相關家具材料之案例

3.5.2 美國:

美國有部分公司將玉米的廢棄物，如玉米殼和玉米梗，轉化為生物複合材料，用於製作家具。自玉米加工廠收集玉米廢棄物，這一過程的碳排放量約為每噸 0.4 噸 CO_2 。接著，玉米殼和玉米梗經過處理，轉化為生物複合材料，處理過程中的碳排放量約為每噸 600 至 900 公斤 CO_2 。這些生物複合材料被製成板材，用於製作桌子和櫥櫃等家具，製造過程中的碳排放量約為每噸 500 至 700 公斤 CO_2 。這種技術不僅減少了農業廢棄物，還提供了可替代木材的環保材料^[82]。此外，美國也有其他企業利用蘋果加工過程所產生之廢棄物，如蘋果皮，製作成替代皮革的材料。收集蘋果皮的過程碳排放量相對較低，每噸約為 0.3 噸 CO_2 。然後，蘋果皮經過處理，轉化為類似皮革的材料，處理過程中的碳排放量約為每噸 700 至 1,000 公斤 CO_2 。這種替代皮革材料被用於製作家具覆面和裝飾品，製造過程中的碳排放量約為每噸 400 至 600 公斤 CO_2 。這些創新技術推動了農業廢料的高附加值利用，並在環保和可持續發展方面取得了顯著成果^[83]。

3.5.3 荷蘭:

荷蘭的設計師和企業將蕎麥殼等農業廢棄物加工成環保家具材料，用於製作桌椅和其他家居用品。收集蕎麥殼的過程碳排放量較低，約為每噸 0.2 噸 CO_2 。經過粉碎和壓縮後，蕎麥殼被製成纖維板材，

這一過程的碳排放量約為每噸 500 至 700 公斤 CO_2 。這些板材進一步加工成家具，製造過程中的碳排放量約為每噸 300 至 500 公斤 CO_2 。這些家具具備良好的透氣性和獨特的外觀設計，符合荷蘭推崇的可持續發展理念^[84]。此外，荷蘭的一些企業利用農業廢棄物作為培養基來種植蘑菇，並將蘑菇的菌絲體材料製作成家具。收集和準備培養基的過程碳排放量約為每噸 0.3 噸 CO_2 。菌絲體生長和加工過程中的碳排放量約為每噸 600 至 900 公斤 CO_2 。這種家具材料具有可降解、耐用且輕質的特點，成為新型的環保家具選擇^[85]。

3.5.4 菲律賓:

菲律賓以其豐富的蕉麻資源聞名，當地企業將蕉麻纖維用於製作各類家具，如椅子和編織家具。收集蕉麻纖維的過程碳排放量較低，約為每噸 0.3 噸 CO_2 。這些纖維經過處理和加工，碳排放量約為每噸 400 至 700 公斤 CO_2 。製成的椅子和編織家具不僅環保，而且耐用、美觀，並且成為出口的重要產品，年出口量達到數百萬美元，展示了可持續利用當地自然資源的潛力^[86]。

3.5.5 中國:

中國是全球最大的稻米生產國之一，稻殼作為農業廢棄物被大量產生。近年來，一些企業將稻殼加工成環保板材，用於製作各種家具，如椅子、桌子和

櫥櫃。收集稻殼的過程碳排放量較低，約為每噸 0.4 噸 CO₂。接著，稻殼經過粉碎和壓縮處理，製成纖維板材，處理過程的碳排放量約為每噸 600 至 900 公斤 CO₂。這些纖維板材進一步加工成家具，製造過程中的碳排放量約為每噸 500 至 800 公斤 CO₂。稻殼家具不僅環保，還實現了農業廢棄物的高效再利用，有效降低了廢棄物處理對環境的影響^[87]。

3.5.6 越南：

竹子在越南被廣泛用作可持續室內設計中的環保材料。由於其具有快速生長、易於加工和高耐用性的特點，竹子被認為是替代硬木的理想材料。實際案例中，越南的室內設計將竹子應用於天花板、牆壁和地板，充分利用其環保特性與美觀效果。這些應用不僅推動了資源的可持續利用，還有助於減少對環境的負面影響^[88]。

四、瓶頸與挑戰

儘管目前低碳家具市場顯示優異的發展潛力，但在實際推動農廢再利用仍面臨著諸多挑戰。農業廢棄物的收集和運輸成本高昂，每噸農廢的收集和運輸會產生約 0.5 ~ 1 噸的二氧化碳排放量，間接增加環境負擔和經濟成本。此外，不同類型的農業廢棄物具有不同的化學成分和物理特性，使得其處理和分類變得複雜。這些廢棄物的處理過程中，每噸廢棄物會產生 2 ~ 3 噸的二氧化碳排放，這使得再利用技術需要針對不同材料進行優化。在製造過程中，農業廢棄物轉化為可用於家具製作的材料時，能量需求大且碳排放量高。例如，熱壓成型過程中，每噸廢棄物約產生 0.5 噸的二氧化碳排放。製造出的產品如果不能達到市場對家具耐用性和美觀性的需求，則難以競爭，進而影響市場接受度。市場競爭激烈，專利佈局複雜。根據專利數據分析，中國、美國、日本等國家的專利申請數量持續增長，這意味著在國際市場上，臺灣的農廢再利用技術面臨來自全球的競爭壓力。此外，生命週期評估顯示在循環經濟和可持續發展中存在的環境挑戰。例如，咖啡渣再利用至塑膠母粒的過程，若考慮咖啡生產階段的碳排，則其每單位咖啡渣塑膠母粒仍產生約 0.686 公斤的二氧化碳排放。考慮到整個生命週期的環境影響，包括乾燥、熱解和生產過程的碳排放，這些數據表明廢熱回收、運輸、生產製造與再利用技術都需要持續改進，以降低環境影響並提高資源利用效率，並強化市場推廣，

實現可持續的農廢再利用低碳家具創新發展。

參考文獻

1. 農業部，農業廢棄物共同清除處理機構管理辦法。2002; Available from: <https://law.moa.gov.tw/LawContent.aspx?id=FL014765>.
2. 李國基，農業資源循環利用，點廢成金產業創新。農業部-農政與農情，2021. 346: pp. 30-36.
3. 環境部，氣候變遷因應法。2023; Available from: <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=O0020098>.
4. 環境部，廢棄物清理法。2017; Available from: <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=O0050001>.
5. 環境部，再生能源發展條例。2023; Available from: <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=J0130032>.
6. 行政院環境保護署氣候變遷辦公室。環保署預告修正「溫室氣體減量及管理法」為「氣候變遷因應法」。2021; Available from: <https://enews.moenv.gov.tw/page/3b3c62c78849f32f/de5ace9a-814a-47cb-8273-342ec0664511>.
7. Davide Mancino, F.F. “Open Data to Track Progress in the EU’s Recycling Targets.” 2023; Available from: <https://data.europa.eu/en/publications/datastories/open-data-track-progress-eus-recycling-targets?form=MG0AV3&form=MG0AV3>.
8. 112 年事業廢棄物申報量統計報告-環境部。2023.
9. Renou, S., *et al.*, “Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity.” *Journal of Hazardous Materials*, 2008. 150(3): pp. 468-493.
10. Chakraborty, D., *et al.*, “Effect of Mulching on Soil and Plant Water Status, and the Growth and Yield of wheat (*Triticum Aestivum* L.) in a Semi-arid Environment.” *Agricultural Water Management*, 2008. 95(12): pp. 1323-1334.
11. Shyamsundar, P., *et al.*, “Fields on Fire: Alternatives to Crop Residue Burning in India.” *Science*, 2019. 365(6453): pp. 536-538.
12. Spiehs, M., B.L. Woodbury, and T.M. Brown-Brandl, “Chemical and Physical Properties of Organic Bedding Materials.” *Applied Engineering in Agriculture*, 2023. 39(6): pp. 595-604.

13. Sofiadou, E. and N.G. Tzortzakis, "Olive mill Waste as a Substitute Growing Medium Component in Tomato Seedling and Crop Production." *International Journal of Vegetable Science*, 2012. 18(3): pp. 272-283.
14. Füleky, G. and S. Benedek, "Composting to Recycle Biowaste." *Sociology, Organic Farming, Climate Change and Soil Science*, 2010: pp. 319-346.
15. Sarwar, M. and M.A. Khan, "Nutritive Value of Urea Treated Wheat Straw Ensiled with or Without Corn Steep Liquor for Lactating Nili-Ravi Buffaloes." *Asian-Australasian Journal of Animal sciences*, 2004. 17(6): pp. 825-829.
16. Cheng, B.-H., *et al.*, "Bio-coal: A Renewable and Massively Producing Fuel from Lignocellulosic Biomass." *Science Advances*, 2020. 6(1): pp. eaay0748.
17. Rosen, V. and Y. Chen, "Effects of Compost Application on Soil Vulnerability to Heavy Metal pollution." *Environmental Science and Pollution Research*, 2018. 25(35): pp. 35221-35231.
18. Akpeimeh, G., L. Fletcher, and B. Evans, "Exposure to Bioaerosols at Open Dumpsites: A Case Study of Bioaerosols Exposure from Activities at Olusosun Open Dumpsite, Lagos Nigeria." *Waste Management*, 2019. 89: pp. 37-47.
19. Liao, W., *et al.*, "Emission Characteristics of typical Gas Pollutants During Oxygen-enriched Waste Incineration Process." *Environmental Technology & Innovation*, 2023. 32: pp. 103358.
20. Lemieux, P.M., C.C. Lutes, and D.A. Santoianni, "Emissions of Organic Air Toxics from Open Burning: A Comprehensive Review." *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004. 30(1): pp. 1-32.
21. Kumar, P. and L. Joshi, "Pollution Caused by Agricultural Waste Burning and Possible Alternate Uses of Crop Stubble: A Case Study of Punjab, in Knowledge Systems of Societies for Adaptation and Mitigation of Impacts of Climate Change." 2013, *Springer*. pp. 367-385.
22. Kilgroe, J.D., "Control of Dioxin, Furan, and Mercury Emissions from Municipal Waste Combustors." *Journal of Hazardous Materials*, 1996. 47(1-3): pp. 163-194.
23. Szajner, J., *et al.*, "Dioxin-like Compounds (DLCs) in the Environment and their Impact on Human Health." *Journal of Elementology*, 2021. 26(2).
24. Sharma, B., *et al.*, "Recycling of Organic Wastes in Agriculture: An Environmental Perspective." *International Journal of Environmental Research*, 2019. 13: pp. 409-429.
25. Yong, Z.J., M.J. Bashir, and M.S. Hassan, "Biogas and Biofertilizer Production from Organic Fraction Municipal Solid Waste for Sustainable Circular Economy and Environmental Protection in Malaysia." *Science of the Total Environment*, 2021. 776: pp. 145961.
26. Medina, J., *et al.*, "Crop Residue Stabilization and Application to Agricultural and Degraded Soils: A Review." *Waste Management*, 2015. 42: pp. 41-54.
27. Babu, S., *et al.*, "Exploring Agricultural Waste Biomass for Energy, Food and Feed Production and Pollution Mitigation: A Review." *Bioresource Technology*, 2022. 360: pp. 127566.
28. Rani, G.M., *et al.*, "Agro-waste to Sustainable Energy: A Green Strategy of Converting Agricultural Waste to Nano-enabled Energy Applications." *Science of The Total Environment*, 2023. 875: pp. 162667.
29. Freitas, L.C., *et al.*, "From Waste to Sustainable Industry: How Can Agro-industrial Wastes Help in the Development of New Products?" *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. 169: pp. 105466.
30. Cantor, D.M. and D.L. Manea, "Innovative Building Materials Using Agricultural Waste." *Procedia Technology*, 2015. 19: pp. 456-462.
31. Dai, Y., *et al.*, "Utilizations of Agricultural Waste as Adsorbent for the Removal of Contaminants: A Review." *Chemosphere*, 2018. 211: pp. 235-253.
32. Nyemba, W.R., *et al.*, "Unlocking Economic Value and Sustainable Furniture Manufacturing Through Recycling and Reuse of Sawdust." *Procedia Manufacturing*, 2018. 21: pp. 510-517.
33. Ng, H.-M., *et al.*, "Extraction of Cellulose Nanocrystals from Plant Sources for Application as Reinforcing Agent in Polymers." *Composites Part B: Engineering*, 2015. 75: pp. 176-200.
34. González-Sánchez, C., *et al.*, "Use of Residual Agricultural Plastics and Cellulose Fibers for Obtaining Sustainable Eco-composites Prevents Waste Generation." *Journal of Cleaner Production*, 2014. 83: pp. 228-237.
35. Zhao, L., W. Zheng, and X. Cao, "Distribution and Evolution of Organic Matter Phases During Biochar

- Formation and Their Importance in Carbon Loss and Pore Structure.” *Chemical Engineering Journal*, 2014. 250: pp. 240-247.
36. Lohtander, T., *et al.*, “Lightweight Lignocellulosic Foams for Thermal Insulation.” *Cellulose*, 2022. 29(3): pp. 1855-1871.
 37. Álvarez, C., F.M. Reyes-Sosa, and B. Díez, “Enzymatic Hydrolysis of Biomass from Wood.” *Microbial Biotechnology*, 2016. 9(2): pp. 149-156.
 38. Yu, G., C.-Y. Hung, and H.-Y. Hsu, “An Agricultural Waste Based Composite to Replace or Reduce the Use of Plastics.” *International Journal of Environmental Science and Development*, 2018. 9(7): pp. 167-172.
 39. Wu, X., J. Zhu, and X.J.B. Wang, “A Review on Carbon Reduction Analysis During the Design and Manufacture of Solid Wood Furniture.” 2021. 16(3): pp. 6212.
 40. Zhang, J., *et al.* “Discuss on application and development of bamboo and rattan materials in low carbon furniture.” in *Energy and Environmental Engineering: Proceedings of the 2014 International Conference on Energy and Environmental Engineering (ICEEE 2014), September 21-22, 2014, Hong Kong*. 2015. CRC Press.
 41. Bergman, R., *et al.*, “The Carbon Impacts of Wood Products.” 2014. 64(7-8): pp. 220-231.
 42. Sakib, M.N., G. Kabir, and S.M.J.S.o.t.T.E. Ali, “A Life Cycle Analysis Approach to Evaluate Sustainable Strategies in the Furniture Manufacturing Industry.” 2024. 907: pp. 167611.
 43. Mohamed, N., J. Al-Jaroodi, and S.J.I.A. Lazarova-Molnar, “Leveraging the Capabilities of Industry 4.0 for Improving Energy Efficiency in Smart Factories.” 2019. 7: pp. 18008-18020.
 44. Chang, C.-T. and H.-C. Lee, “Taiwan's Renewable Energy Strategy and Energy-intensive Industrial Policy.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 64: pp. 456-465.
 45. Al Darwish, L., “Green Furniture: Sustainability, Consumer Choice, and Market Analysis in an Evolving Landscape.” 2023.
 46. Smardzewski, J., “Furniture Design.” Vol. 201510. 2015: Springer.
 47. Astonkar, D.V. and D.S.M.J.o.I. Kherde, “Development in Various Multipurpose Furniture's by Using Space Saving Approach.” 2015. 2(6): pp. 257-264.
 48. Gelbmann, U. and B.J.J.o.C.P. Hammerl, “Integrative re-Use Systems as Innovative Business Models for Devising Sustainable Product-service-systems.” 2015. 97: pp. 50-60.
 49. Simpson, D.J.I.J.o.P.R., “Use of Supply Relationships to Recycle Secondary Materials.” 2010. 48(1): pp. 227-249.
 50. Prancutė, R.J.P., “Web of Science (WoS) and Scopus: The Titans of Bibliographic Information in Today's Academic World.” 2021. 9(1): pp. 12.
 51. Nwodo, M.N., C.J.J.B. Anumba, and Environment, “A Review of Life Cycle Assessment of Buildings Using a Systematic Approach.” 2019. 162: pp. 106290.
 52. Laurent, A., *et al.*, “Methodological Review and Detailed Guidance for the Life Cycle Interpretation Phase.” 2020. 24(5): pp. 986-1003.
 53. Rosenbaum, R.K., *et al.*, “Life Cycle Impact Assessment.” 2018: pp. 167-270.
 54. Rebitzer, G., *et al.*, “Life Cycle Assessment: Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications.” 2004. 30(5): pp. 701-720.
 55. Curran, M.A., “Overview of Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment.” 2017: Springer.
 56. Agency, E.P. “Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Laws and Regulations.” 2025; Available from: <https://www.epa.gov/rcra>.
 57. Hauschild, M.Z., “Introduction to LCA Methodology.” *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, 2018: pp. 59-66.
 58. 黃育徵，循環經濟。Vol. 70. 2017: Common Wealth Magazine Ltd.
 59. Friedrich, E. and C. Trois, “GHG Emission Factors Developed for the Collection, Transport and Landfilling of Municipal Waste in South African Municipalities.” *Waste Management*, 2013. 33(4): pp. 1013-1026.
 60. 陳本源*、趙家民**、蔡博全***，廢木製家具回收之 CO₂ 排放當量估算與分析——以嘉義縣再生家具展示館為例。
 61. Singh, A. and P. Basak, “Economic and Environmental Evaluation of Rice Straw Processing Technologies for Energy Generation: A Case Study of Punjab, India.” *Journal of Cleaner Production*, 2019. 212: pp. 343-352.
 62. Dahy, H., “Agro-fibres Biocomposites' Applications

- and Design Potentials in Contemporary Architecture: Case Study: Rice Straw Biocomposites.” 2015, *Zugl.: Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss.*, 2014.
63. Oliaei, E., T. Lindström, and L.A. Berglund, “Sustainable Development of Hot-pressed All-lignocellulose Composites—comparing Wood Fibers and Nanofibers.” *Polymers*, 2021. 13(16): pp. 2747.
64. Rupp, M., *et al.*, “Additive Manufacturing of Steel for Digital Spare Parts—A Perspective on Carbon Emissions for Decentral Production.” 2022. 4: pp. 100069.
65. Lagoudis, I.N., A.R.J.R.i.t.b. Shakri, and management, “A Framework for Measuring Carbon Emissions for Inbound Transportation and Distribution Networks.” 2015. 17: pp. 53-64.
66. Linkosalmi, L., *et al.*, “Main Factors Influencing Greenhouse Gas Emissions of Wood-based Furniture Industry in Finland.” 2016. 113: pp. 596-605.
67. Rahman, M.M., K. Ho, and A.N.J.J.o.A.P.S. Netravali, “Bio-based Polymeric Resin from Agricultural Waste, Neem (A Zadirachta Indica) Seed Cake, for Green Composites.” 2015. 132(1).
68. Roth, A. and T.J.J.o.C.P. Kåberger, “Making Transport Systems Sustainable.” 2002. 10(4): pp. 361-371.
69. Shanmugam, V., *et al.*, “Circular Economy in Biocomposite Development: State-of-the-art, Challenges and Emerging Trends.” 2021. 5: pp. 100138.
70. Suhaily, S., *et al.*, “A Review of Oil Palm Biocomposites for Furniture Design and Applications: Potential and Challenges.” 2012. 7(3): pp. 4400-4423.
71. Suhaily, S.S., *et al.*, “Bamboo Based Biocomposites Material, Design and Applications, in Materials Science-advanced Topics.” 2013, IntechOpen.
72. Rattanawongkun, P., *et al.*, “Improving Agricultural Waste Pulps Via Self-blending Concept with Potential Use in Moulded Pulp Packaging.” 2020. 8(5): pp. 104320.
73. Bousios, S., E.J.R. Worrell, Conservation, and Recycling, “Towards a Multiple Input-Multiple Output Paper Mill: Opportunities for Alternative Raw Materials and Sidestream Valorisation in the Paper and Board Industry.” 2017. 125: pp. 218-232.
74. Iritani, D.R., *et al.*, “Sustainable Strategies Analysis Through Life Cycle Assessment: A Case Study in a Furniture Industry.” 2015. 96: pp. 308-318.
75. González-García, S., *et al.*, “Eco-innovation of a Wooden Childhood Furniture Set: An Example of Environmental Solutions in the Wood Sector.” 2012. 426: pp. 318-326.
76. González-García, S., *et al.*, “Assessing the Global Warming Potential of Wooden Products from the Furniture Sector To Improve Their Ecodesign.” 2011. 410: pp. 16-25.
77. Pang, B., *et al.*, “Performance and Environmental Implication Assessments of Green Bio-composite from Rice Straw and Bamboo.” *Journal of Cleaner Production*, 2022. 375: pp. 134037.
78. Vieira, F., *et al.*, “Coconut Waste: Discovering Sustainable Approaches to Advance a Circular Economy.” *Sustainability*, 2024. 16(7): pp. 3066.
79. Bekar, İ. and T. Cürgül, “The Use Of Natural Stone In Furniture Design Within The Context Of Limitations And Creativity.” *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 2024. 14(1): pp. 61-85.
80. Oliveira, S.L., *et al.*, “Particleboard Panels Made from Sugarcane Bagasse: Characterization for Use in the Furniture Industry.” *Materials Research*, 2016. 19(4): pp. 914-922.
81. Nadzri, S.N.I.H.A., *et al.*, “A Comprehensive Review of Coconut Shell Powder Composites: Preparation, Processing, and Characterization.” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2022. 35(12): pp. 2641-2664.
82. Chong, T.Y., M.C. Law, and Y.S. Chan, “The Potentials of Corn Waste Lignocellulosic Fibre as an Improved Reinforced Bioplastic Composites.” *Journal of Polymers and the Environment*, 2021. 29(2): pp. 363-381.
83. Khan, A., *et al.*, *Preparation and evaluation of olive apple blended leather*. International Journal Food Science Nutrition Dietetics, 2014. 3(7): pp. 134-137.
84. Joka Yildiz, M., P. Cwalina, and S. Obidziński, *A comprehensive study of buckwheat husk copelletization for utilization via combustion*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022: pp. 1-18.
85. Karana, E., *et al.*, “When the Material Grows: A Case Study on Designing (with) Mycelium-based Materials.” *International Journal of Design*, 2018. 12(2).
86. Waller, V. and A. Wilsby, “Tensile Strength of Single Abaca Fibers.” 2019.

87. Liu, J., *et al.*, “Decorative Materials from Rice Straw and Cornstarch Adhesives.” *Forest Products Journal*, 2012. 62(2): pp. 150-156.
88. Vân, N.T.B. “Bamboo-the Eco-friendly Material—one of the Material Solutions of the Sustainable Interior Design in Viet Nam. in MATEC Web of Conferences.” 2018. EDP Sciences.

收稿日期：民國 114 年 02 月 14 日

修改日期：民國 114 年 04 月 23 日

接受日期：民國 114 年 04 月 28 日