

研究一種創新的低溫熱技術以低木質素農業廢棄物（例如稻殼）製造類石墨化生物炭

An Innovative Low-Temperature Thermal Technology to Manufacture Graphitization-Like Biochar from Low-Lignin Agricultural Waste Exemplified by Rice Husk

朝陽科技大學應用化學系¹

朝陽科技大學環境工程與管理系²

張喬揚¹

Chiao-Yang Chang

章日行²

Jih-Hsing Chang

楊珮玉¹

Pei-Yu Yang

摘 要

本研究屬於一種創新的整合生物炭轉化技術，不僅可以有效地將稻殼轉化為類石墨化生物炭（Graphitization-like precursor, GLP），亦可提高產物的碳含量和產量。本項創新技術涉及兩項程序：1.鹼液前處理：原料於常溫下以 1M 氫氧化鉀浸泡攪拌 4 小時後，碳元素含量可提升 25%，並降低焦油生成，係為提升碳含量及產率的重要關鍵之一；2.多重熱裂解程序：本研究結合熱裂解及水熱法的優點，以慢速熱裂解加熱 5°C/min 上升至 300°C 停留 4 小時的條件，將木質素結構的有機鍵結打斷，再以 250°C 水熱法處理 4 小時，即可清除由熱裂解產生之斷裂分子，並強化產物中碳元素的晶格排列，促使其碳晶格排列更趨近石墨，當以相同條件進行第二次熱裂解，其結構經以 XRD、FTIR、TGA 各項儀器進行分析判定，可獲得無定形之(002)石墨晶格結構，其結構耐受溫度為 400°C 以上，經以上技術可將稻殼轉製成碳含量 70% 及產率 47% 的 GLP 材料，大幅提升稻殼的經濟價值。

關鍵詞：石墨，類石墨化前驅體物，農業廢棄物，稻殼，鹼

Abstract

This study integrates an innovative biochar conversion technology that significantly not only transforms rice husks into a graphitization-like biochar (GLB) but also increases its carbon content and yield. This innovative technology involves two series processes: 1. Alkaline pretreatment: Raw materials are soaked and agitated in 1M potassium hydroxide at room temperature for 4 hours, resulting in a 15% increase in carbon content and reduced tar formation, which is crucial for enhancing carbon content and yield. 2. Multi-stage thermal treatment: slow pyrolysis is first conducted at a heating rate of 5°C/min up to 300°C with a 4-hour hold, breaking organic bonds in the lignin structure. This is followed by hydrothermal treatment at 250°C for 4 hours, removing fragmented molecules from pyrolysis and enhancing carbon lattice alignment. A second pyrolysis under identical conditions produces a structure closer to graphite. Analysis of the GLB product by XRD, FTIR, and TGA confirms the formation of an amorphous (002) graphite lattice structure with thermal stability above 400°C. This technology with low energy consumption can effectively converts rice husks into GLB material of 70% carbon content and 47% yield, which is beneficial to further application.

Keywords: Graphite, Graphitization-like Precursor, Agricultural waste, Rice husk, Alkali

一、前言

廢棄物管理已成為一項重大的全球環境挑戰，根據聯合國環境規劃署（UNEP）的數據，2023 年全球垃圾產生量將達到 23 億噸，預計 2050 年又增加至 1.7 倍，而廢棄物的種類與佔比可分為，生活垃圾：50%~60%；工業廢棄物：約占 20%~30%；農業廢棄物：約占 15%~20%；建築垃圾：約占 5%~10%；其他(電子廢棄物、醫療廢棄物等)：約占 5%以內(Meena et al., 2023)。各類廢棄物皆有既定的管理機制，惟獨農業廢棄物由於其分散性和季節性，缺乏系統化的收集處理體系，農戶只能自行尋求處置途徑。傳統上，農民選擇就地露天燃燒的方式處理這些農作廢棄物(Lemieux et al., 2004)。然而，燃燒過程將產生大量溫室氣體和有害顆粒物等污染物，不僅加劇空氣質量惡化，也對土地和水資源造成嚴重威脅(Patel et al., 2023; Akagi et al., 2011)。即使其他種類廢棄物在產生和排放過程中同樣會帶來某程度之環境污染，但卻擁有較為規範的管控措施。相比之下，農業廢棄物的管理卻長期遭受忽視，亟需開發切實可行的處理技術路線。近年來雖然出現一些新興技術如生物質熱解(Jha et al., 2022)、氣化(Ghodke et al., 2023; Homchat and Ramphueiphad, 2022; Guo et al., 2022)、發酵(Chilakamarry et al., 2022; Haosagul et al., 2018)等，試圖實現農廢資源化再利用，但由於技術複雜、能耗高、低產量問題等因素，不利於廣泛使用。因此，尋求低耗能、高產量的農業廢棄物處理和資源化技術，極為重要。

近年來，許多研究致力於解決農業廢棄物處理的環境問題，而生物碳生產技術，是目前選項中最具發展潛力的技術，係因：

1. 生物碳生產過程可有效穩定農業廢棄物中的炭，並減少溫室氣體排放，炭在熱解溫度下可轉化為更穩定的固體生物碳，防止直接釋放到大氣中(Patel et al., 2023; Matsagar and Wu 2022; Mandal et al., 2016)。
2. 相較於技術成熟之生物質熱解液化、氣化、生物乙醇發酵等其他新興技術相比，生物碳生產流程相對簡單，操作條件溫和、耗能低，設備需求較低。
3. 生物碳的應用前景除了土壤改良之外，在水處理、空氣淨化、能源儲存等領域也展現出廣泛的應用潛力。可開發成各種高附加價值產品，如廢水處理、重金屬吸附、CO₂/VOC 捕獲等(Liu et al., 2022; Kan et al., 2016)。
4. 生物碳之原料多元化且易取得，如農作物秸稈、林業剩餘物、動物糞便等。

儘管如此，生物碳技術在實際推廣應用中仍需進一步提高生物碳產品品質、降低成本並朝向高價值應用，其中石墨或類石墨是生物質應用之頂峰，仍是未來突破的關鍵。

製備生物碳技術絕大部分是將生物質在高溫缺氧或低氧濃度條件下轉化為固體碳材料、液體產物和氣體產物的熱化學過程。熱解產物中的固體部分稱為生物質熱解固體或生物碳，主要由定形碳和非定形碳組成(Nan et al., 2019)。兩者之結構特徵差異，在理化性質上表現出明顯不同，對於潛在應用具有重要影響。因此，決定生物碳的理化性質和應用潛力與其製備程序密切相關(Boraah et al., 2023; Yargicoglu et al., 2015)。目前，主要的生物碳製備技術包括：(1)傳統熱解法(Pyrolysis) (Jha et al., 2022)、(2)水熱碳化法(Hydrothermal Carbonization) (Sebastian et al., 2011; Cao et al., 2014)、(3)微波輔助熱解法(Microwave Hydrothermal Assisted)(Potnuri et al., 2023; Zhang et al., 2022; Xiang et al., 2022)和(4)真空熱解法(Vacuum Pyrolysis)(Ullah et al., 2019; Postma et al., 2014; Uras et al., 2012)，由於不同熱裂解方法的反應條件和過程存在差異，因此所獲得的固體碳產率也

有所不同。

本研究發現生物炭的固體碳含量與原料之木質素是否純化有關，其因是生物質主要是由纖維素、半纖維素和木質素三大組分構成，在分解過程中纖維素於 250-400°C 快速熱解，生成一系列小分子揮發性產物，如醛、醇、酮等，並伴有少量固體碳殘渣生成，因此不利於固體碳積累；半纖維素在 200-350°C 區間釋放揮發分，主要釋放一氧化碳、二氧化碳、甲酸、乙酸等揮發性氣體產物，部分生成少量固體碳微粒；而木質素的熱解則發生在較寬的溫度範圍 200-700°C，低溫下主要生成酚類物質，高溫則傾向於形成縮合的芳香族分子結構，是生物質生成固體碳骨架的主要反應。而農業廢棄物中木質素含量一般僅在 10-20%，與其他回收物相比相對偏低，亦是熱解後固體碳產率不高的主因，若能有效性的彰顯木質素含量，將是影響生物炭產率的關鍵因素。

因此，本研究探討以低木質素農業廢棄稻殼為研究對象，整合造紙的工藝技術、傳統熱解法與水熱碳化法應用形成複合之新生物炭製備技術，作為提升生物炭產率的可能途徑。

二、材料與方法

本研究整體之處理步驟，如圖 1，整體流程可分為：1.生物炭前處理程序；2.生物炭轉製流程；3.儀器分析，分述如下：

2.1 生物炭前處理程序

本研究之稻殼原料來自台灣霧峰區地區，以去離子水將稻殼清洗乾淨，經 105°C 烘箱乾燥 24 小時後，再破碎至粒徑大小 $<0.025\text{ mm}$ 之樣品此樣品名稱為 RH。使用 1M 氫氧化鉀浸泡且攪拌 4 小時後，清洗至 pH7，此樣品名稱為 KOH，再使用 1M 鹽酸浸泡且攪拌 4 小時之後，清洗至 pH7，再置入 105°C 烘箱 24 小時乾燥後備用，此樣品名稱為 TRH。

2.2 生物炭轉製流程

生物炭之轉製可分為 3 個步驟：第 1 步驟-熱裂解程序：取 TRH 20 g 置入陶瓷坩堝內，使用管狀高溫爐進行加熱，加熱速度為 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；最終溫度為 300°C 並停留 4 小時；載流氣體為二氧化碳，再進行清洗步驟：將熱裂解後之產物以 0.5M HCl 浸泡 4 小時，再以前離子水將殘留之鹽酸去除，直至水溶液接近中性，以 105°C 烘箱乾燥至恆重，此樣品名稱為 Rice Biochar (RB)。第 2 步驟-水熱法：RB 樣品再以固液比為 1:20(w:w) 加入去離子水浸泡 30 分鐘，放入不鏽鋼高壓釜密閉系統於 250°C 加熱 4 小時，再以去離子水反覆沖洗 2 次，再放入 105°C 烘箱中乾燥 24 小時，此樣品名稱為 Rice Biochar Hydrothermal (RBH)。第 3 步驟-第二次熱裂解程序：取 RBH 樣品，重複第 1 步驟之熱裂解程序，此樣品名稱為 High Quality Rice Biochar Hydrothermal (HRBH)。

2.3 生物炭的理化性質

本研究以各種儀器量測理化性質，做為判斷及解釋數據的重要發現，本研究使用的儀器包含：1.利用 Thermo 傅立葉轉換紅外光譜儀 (FT-IR) 偵測產物官能基，於波數範圍 $550\text{ cm}^{-1}\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 下進行 ATR 方法的分析；2.利用 Rigaku X 光繞射儀 (XRD) 測量產物的內部結構，其條件為： $5^{\circ}\sim 90^{\circ}(2\theta)$ 、掃描速度 $5^{\circ}/\text{min}^{-1}$ ；3.利用 Elementar 元素分析儀 (EA) 測量產物之碳元素含量；4.利用 Mettler 熱重分析 (TGA) 量測產物重量損失，其條件為：載體氣體為氮氣、溫度範圍： $25^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ 。

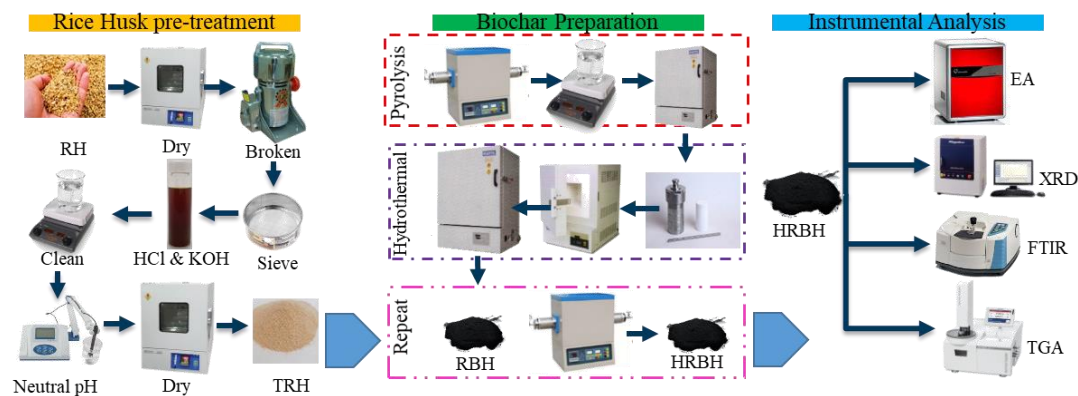


圖 1 HRBH 之實驗製程

三、結果與討論

以農業廢棄物轉製生物炭的過程，有幾個重要的關鍵參數，將影響生物炭的品質及應用範圍，在以往的文獻研究中，生物炭的產量與碳含量皆為反比，依據本研究結果顯示，前處理程序將影響生物炭中碳含量的多寡，而熱裂解程序則影響生物炭的產量，透過本研究的處理程序，可獲得高碳含量及高產率的產物，提高應用價值，並分段敘述其影響參數，如下：

3.1 前處理程序對木質素含量之重要性

本研究於 2.1 鹼液處理步驟時發現，浸泡 KOH 溶液之樣品，其溶液外觀呈混濁且濃稠的狀態，且外觀呈現膨脹現象，如圖 2 所示，以假體積計算發現，原料密度由 7.62 g/cm^3 變成 5.69 g/cm^3 ，其體積膨脹原始之 25%，是因為鹼液滲入原料內的纖維細縫，將稻殼結構撐開，水溶液滲入纖維結晶區，產生溶脹效應，使得纖維素溶解，促使木質素與其他結構分離，與造紙技術中化學製漿使用化學試劑(鹼、酸等)溶解纖維素和半纖維素提取木質纖維素過程相符(Bartos et al., 2020)，並且透過鹼液處理步驟後，生物炭可大幅降低焦油的產生，亦是本研究重要的發現，因為以往有關生物炭的前處理皆使用酸性為手段，本研究與以往的文獻方向不同，是本研究的一大特色。而 KOH 鹼性物質會滲入稻殼中的木質纖維素間隙，使分子結構中的酯鍵脫酯化，並透過皂化反應促進木質素和纖維素的分離(Kim et al., 2016; Shakeel et al., 2022)，並以 0.5M 鹽酸浸泡清洗，可將生物質內含之油脂成份清除，以避免熱解步驟產生的焦油阻塞生物炭之表面孔洞，以降低對後續之熱裂解反應產生干擾。使此作用機制可提升木質素的形成並降低焦油的干擾。另外，本研究以元素分析儀檢測各階段產物之碳含量，探討鹼液處理對於碳含量的影響，結果如圖 3 所示，其 RH 碳含量為 42%，經鹼處理(KOH)與酸處理(TRH)後，進行生物炭製備時，其碳量提升為 70%，證實鹼處理溶解纖維素和半纖維素有助於炭之形成，係因鹼處理步驟促使原結構形成鬆散狀，使後續無氧裂解之炭元素得以保留，因此本研究可證明透過鹼液處理時，確實可將木質素有效分離，進而提升碳元素的含量，並與 Rangabhashiyam, Eude, Cagnon 文獻研究理論相同(Rangabhashiyam and Balasubramanian, 2019; Eudes et al., 2014; Cagnon et al., 2009)，相對之下，酸處理則對於碳元素含量的提升效果並不明顯。

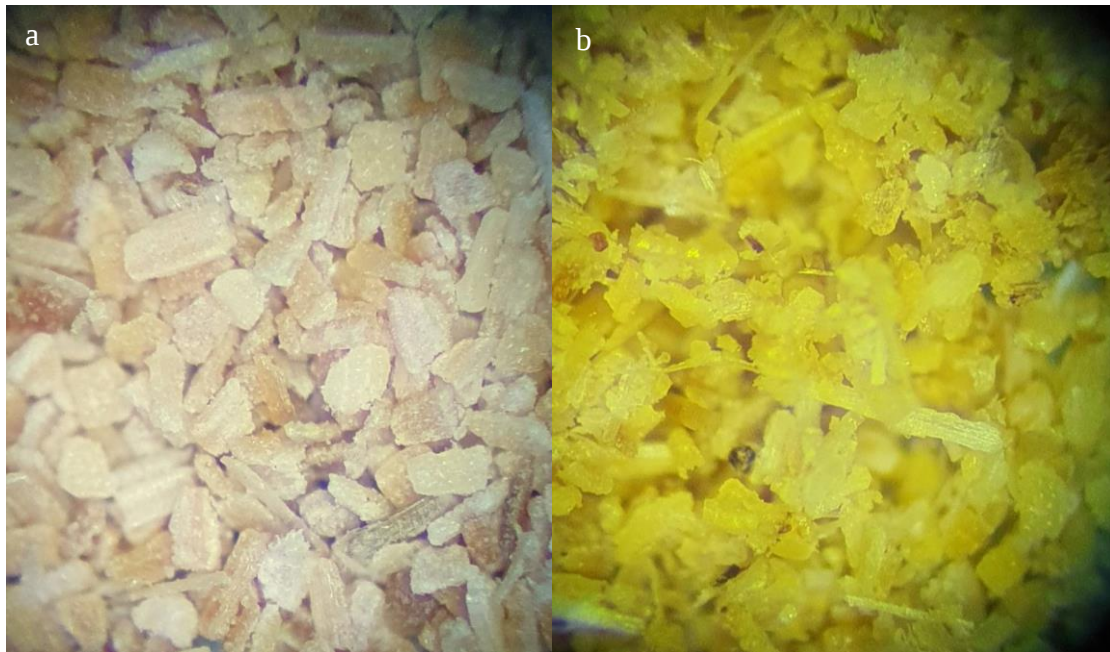


圖 2 稻殼原料前處理之情形(a) RH (b) KOH (放大 300 倍率)

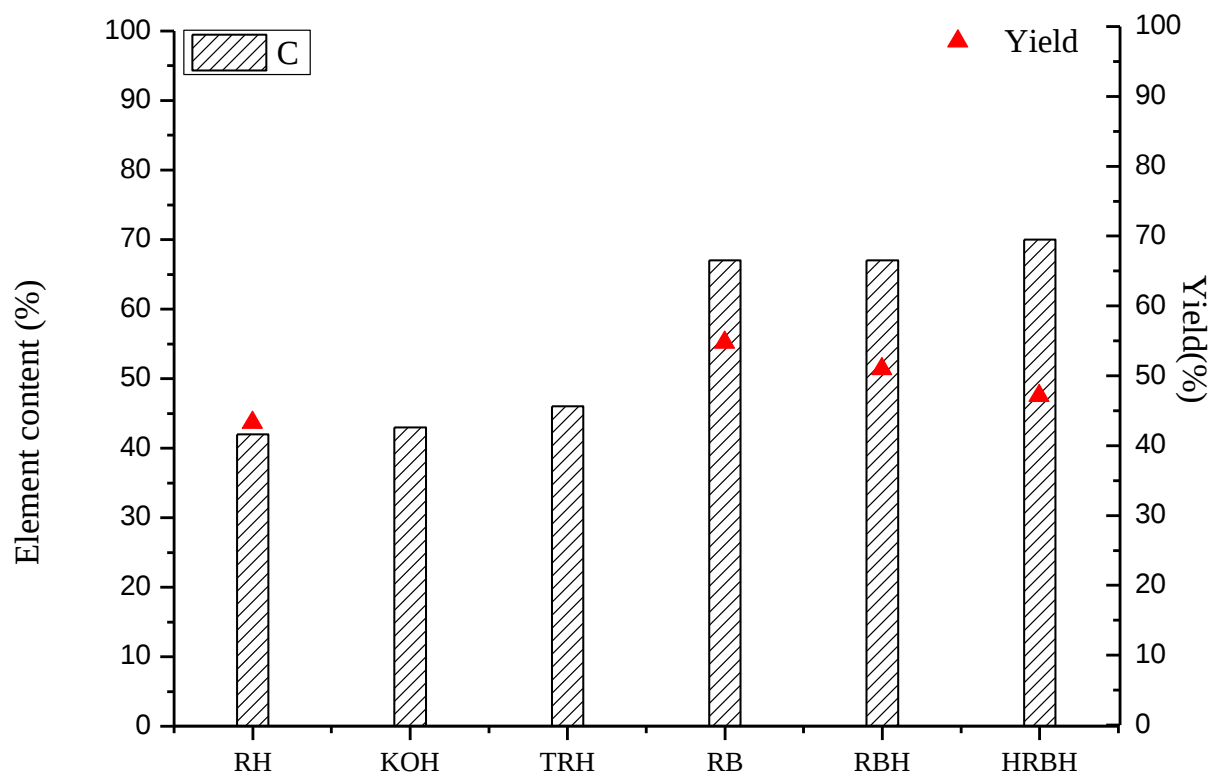


圖 3 碳元素分析結果

3.2. 生物炭轉製流程之影響分析

3.2.1 熱裂解對於生物炭產率之影響

稻殼透過鹼處理後，以低溫熱裂解方式進行生物炭製備，各階段之熱裂解產率如圖

3 所示，RB 樣品生物炭產率為 54.76%，相較於 RH 未經鹼處理之生物炭產率 43.29%，鹼處理後生物炭產率提升為原本的 1.3 倍。此外，於熱裂解相關研究中生物炭產率，其平均產率為 35%(Shackley et al., 2011)，而本研究之 RB 樣品比一般研究中生物炭產率高出 1.5 倍。其造成生物炭固成分較高的原因，係為裂解過程中木質素轉化為碳結晶時，將產生二氧化碳、一氧化碳、甲烷和有機物，二氧化碳載流氣體可有效將產出之氣體送出，可避免與生物炭於裂解過程中產生二次反應，為此產生更多的木炭固形物(Angin, 2012)。並且本研究提供的低溫熱量無法破壞鍵結，使固體物不會瞬間崩解，因此保留更多的固形物，除此之外，本研究除了提高產率之外，欲提升碳元素之物理特性，因此將 RB 樣品再以水熱法及熱裂解程序繼續加工，使得 RBH 及 HRBH 產物之生物炭產率分別為 50.97%及 47.13%。歷經複合熱解程序後，其最終產物(HRBH)亦比一般生物炭產率高出 1.3 倍，證實稻殼經鹼液前處理後，配合複合式低溫熱裂解技術是提高生物炭產率之處理方式。

3.3 生物炭之物理特性分析

本研究為提升生物炭之利用價值，因此經過多道加工程序，並利用 FTIR、XRD 及 TGA 進行儀器分析，判斷生物炭之應用範圍，分述如下：

3.3.1 FTIR 分析結果

各階段之熱裂解產物使用 FTIR 分析結果如圖 4 及圖 5 所示，3300 cm^{-1} 處表現為炔類之 C-H 連結官能基振動，隨著複合式的熱解處理程序，炔類振動逐漸減少，此因代表鍵結受到熱裂解影響，雖然提供的能量不足以將炔類鍵結一次破壞，但逐漸使炔類轉化成烯類，由烯類波數 1664 cm^{-1} 附近逐漸增強可見。然而，圖譜中 1100-1300 cm^{-1} 附近具有兩個吸收峰，此為代表酯類的波峰位置，酯類的振動逐漸減弱，表示透過鹼液前處理及水熱法可逐漸清除生物炭產生的酯類，如：焦油。除此之外，800-600 cm^{-1} 波段為 Si-O-Si 對稱伸縮振動(Liu et al., 2012)，該處的表現逐漸增強，代表產物最終會保留矽成分，但從本研究結果得知，最終產物結構中，烯類的碳含量逐漸增多，其中也包含矽元素，此結果顯示 HRBH 已具備晶體結構。

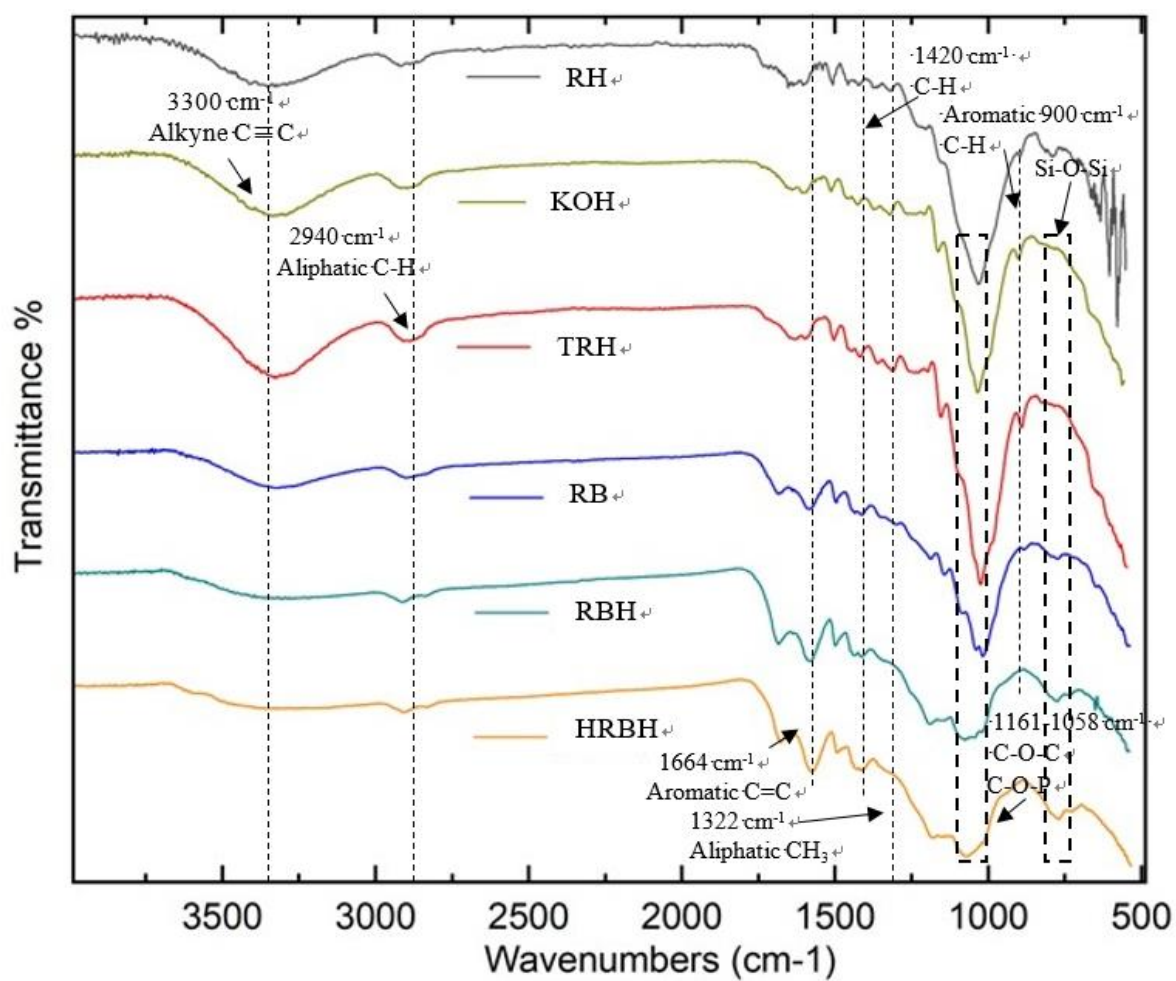


圖 4 稻殼熱解後 FTIR 分析結果

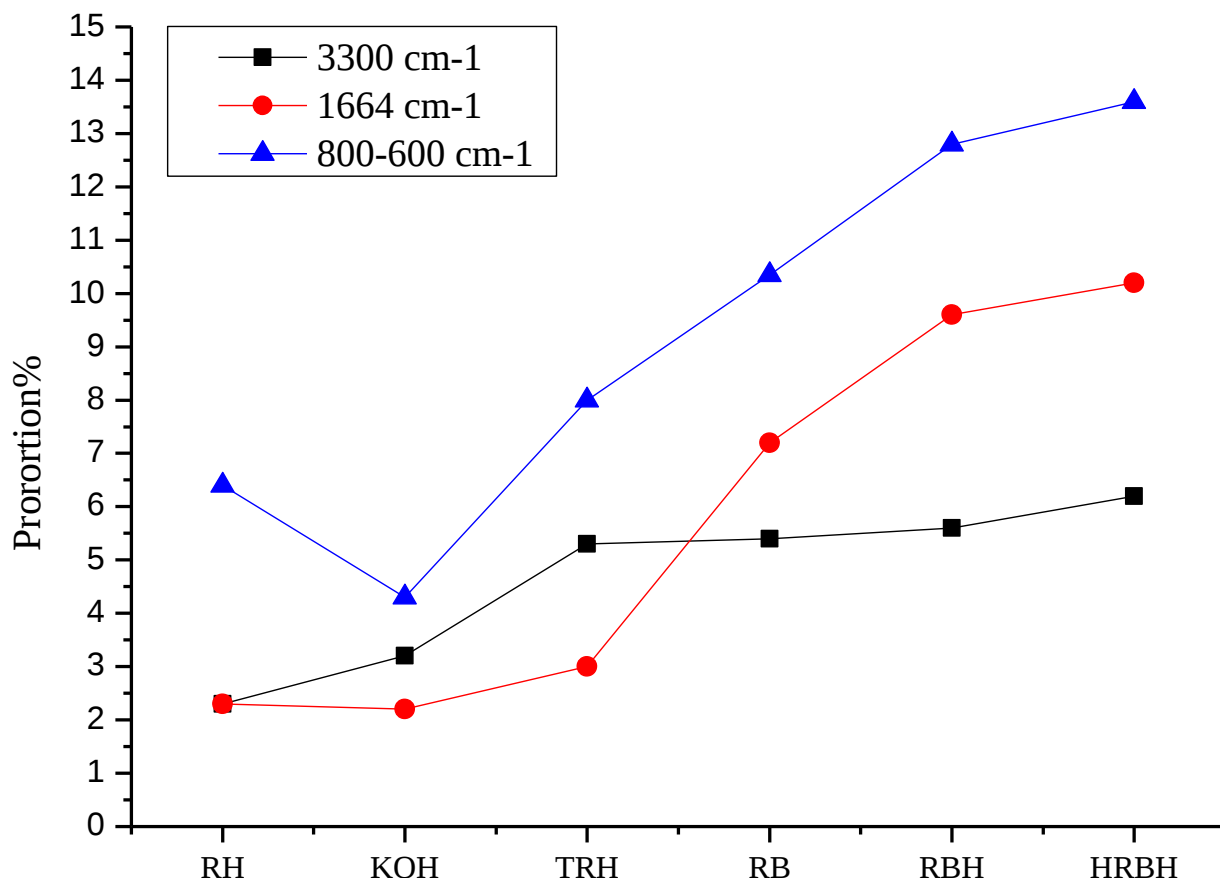


圖 5 不同處理後化學鍵含量分布

3.2.2 XRD 分析結果

XRD 應用於分析生物炭樣品表面特徵的晶體結構，自 FTIR 圖譜可得知，矽元素及碳元素之含量隨著複合式熱裂解程序而增加，因此檢測其生物炭之晶體結構之變化，可了解其對材料結晶度的影響。本研究為避免顆粒尺寸影響衍射圖譜之判斷，將生物炭研磨後以 360 mesh 過篩，以確保顆粒大小變化不會影響繞射圖譜，可降低樣品檢測結果的誤差 (Yaushi Zongheng, 2020)，各階段 XRD 分析結果如圖 6。分析結果顯示樣品圖譜主要呈現非晶態特徵，缺乏明確晶格結構的特定峰型，其中以 HRBH 樣品更顯示無任何明顯晶格峰值，此表明材料內部結構發生了完全重新排。然而，在各熱解程序之 XRD 圖譜中顯示尖銳繞射峰經複合式程序中逐漸缺失，此證實了本研究複合熱解程序，可去除熱裂解所生產之雜質結晶，尤其是 HRBH 樣品。這種非晶態特性意味著所採用的熱處理和加工方法顯著的改變了生物炭的內部結構，導致原有的晶態消失，表示該生物炭可能作為進一步石墨化過程的前驅物。並且本研究將 HRBH 生物炭添加催化劑經 1000°C 石墨化，成功使其產生類石墨晶格之特定峰(002)如圖 7 所示，為農業廢棄物再利用於先進材料（如石墨）開闢新的方向。

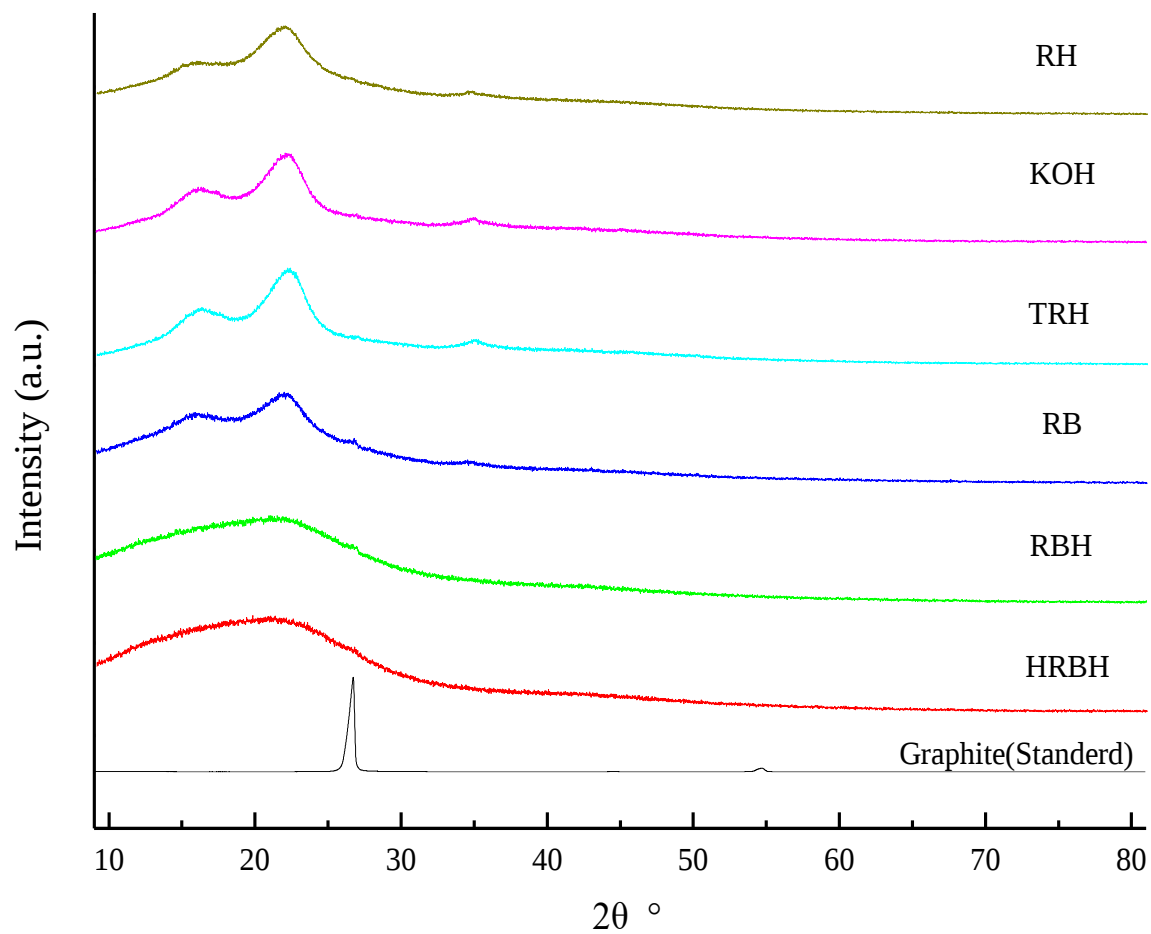


圖 6 稻殼熱裂解後 XRD 分析結果

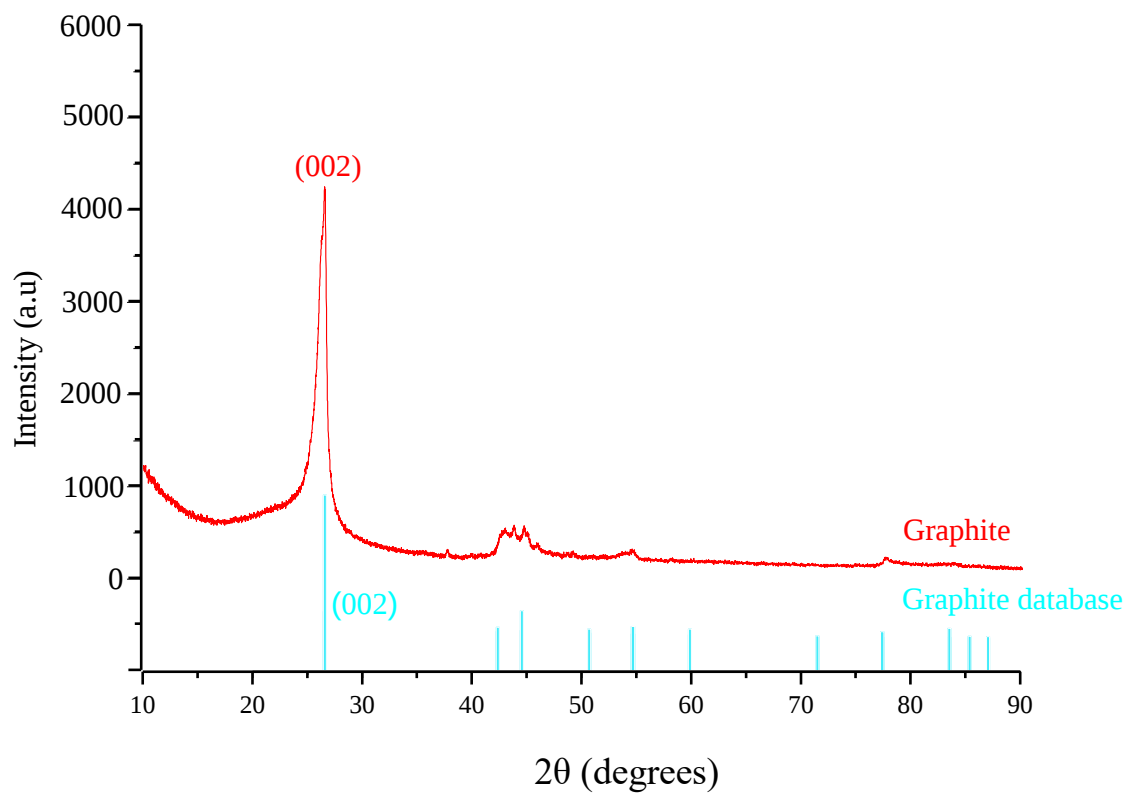


圖 7 石墨化後 XRD 分析結果

3.2.3 TGA 分析結果

本研究對稻殼與處理程序熱重分析結果如表 1 所示，在 25°C~900 °C 的溫度變化下，原料經鹼液前處理後，提高固成分含量，其可燃分含量亦隨之升高，其中與碳元素含量與產率有關；而在稻殼與生物炭的燒失比較趨勢下，其失重的比例如圖 8 所示，原料耐受溫度約在 300°C-350°C，經多道處理後，其耐受溫度可被明顯提升的趨勢，且耐受溫度也逐漸提高至 400°C，從 TGA 結果得知，稻殼經過鹼液前處理及複合式熱裂解程序後，可提升生物炭之耐受溫度，具有轉化石墨之前趨物潛質，石墨化需經高溫處理，該結果有利於提高石墨的產率，並於轉化為石墨時獲得高濃度的碳，以達到更廣泛的應用。

表 1 各項處理程序之耐受溫度與可燃分比較

處理程序	耐受溫度 °C	可燃分 %
RH	324	67
KOH	331	84
HCl	348	80
RB	361	60
RBH	470	72
HRBH	450	55

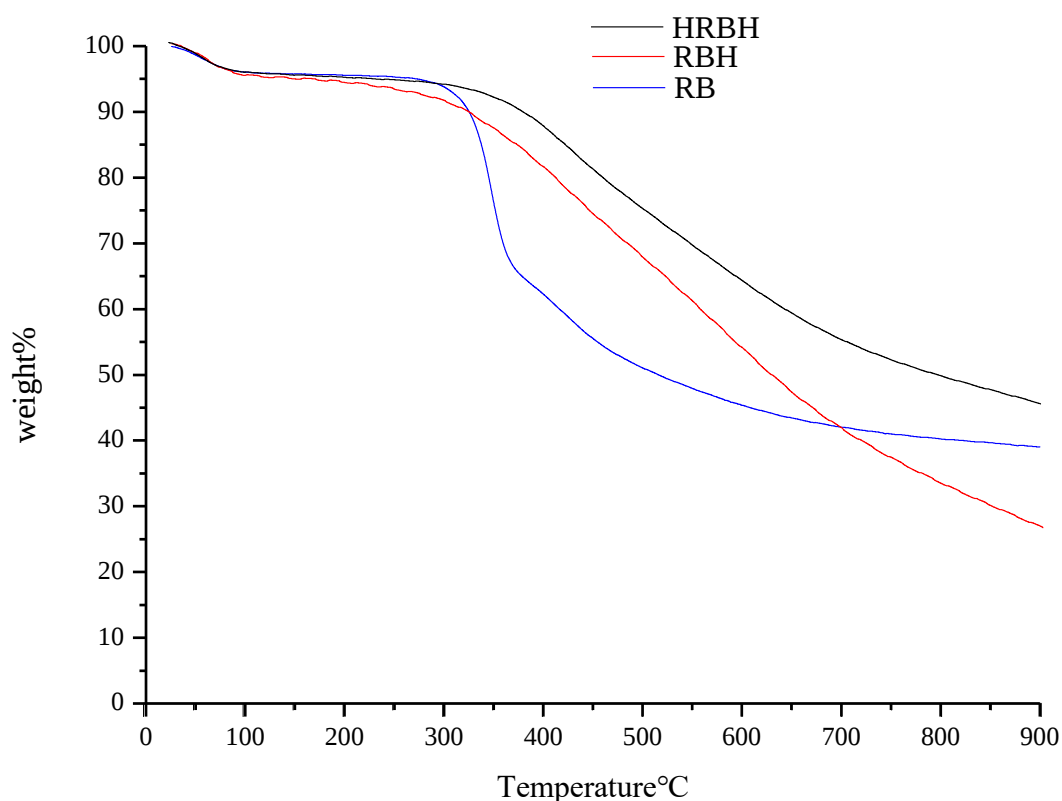


圖 8 熱重分析儀熱重損失

四、 結論

本研究在生物炭和石墨生產領域取得了兩項重要發現，具體如下：

1. 鹼溶液預處理：鹼溶液預處理的應用有效破壞了複雜的木質纖維素結構，促進木質素的分離和提取。此過程不僅富集所得材料中的碳含量，還為後續的熱轉化過程準備了生物質原料。
2. 多重熱裂解程序：採用連續熱解步驟提升生物炭的生產量，透過多種儀器分析方法對生物炭的結構做了完整的精確表徵，證實材料碳含量的提高和穩定性的增強。

為獲得最佳結果，整合兩大過程時應當按序實施。此方法確保了所生產的生物炭既具有高產量又具有高碳含量，使其成為進一步加工成石墨的優良前驅物。本研究的發現對推進石墨材料的開發和應用尤為相關，為工業用生物炭生產的效率和可行性的程序增添一項貢獻。

五、参考文献

- M.D. Meena , M.L. Dotaniya a, B.L. Meena a, P.K. Rai a, R.S. Antil b, H.S. Meena a, L.K. Meena a, C.K. Dotaniya a, Vijay Singh Meena c d, Avijit Ghosh e, K.N. Meena a, Amit K Singh e, V.D. Meena a, P.C. Moharana f, Sunita Kumari Meena g, Ch. Srinivasarao i, A.L. Meena k, Sumanta Chatterjee h, D.K. Meena j, M. Prajapat j, R.B. Meena l, Municipal solid waste: Opportunities, challenges and management policies in India: A review, Waste Management Bulletin Volume 1, Issue 1, June 2023, Pages 4-18, <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.04.001>
- Paul M Lemieux , Christopher C Lutes , Dawn A Santoianni, Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 30, Issue 1, 2004, Pages 1-32, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.08.001>
- Maga Ram Patel, Narayan Lal Panwar, Biochar from agricultural crop residues: Environmental, production, and life cycle assessment overview, Resources, Conservation & Recycling Advances, Volume 19, November 2023, 200173, <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200173>
- S. K. Akagi, R. J. Yokelson, C. Wiedinmyer, M. J. Alvarado, J. S. Reid, T. Karl, J. D. Crounse, and P. O. Wennberg, Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, EGU vision & strategy, ACP, 11, 4039–4072, 2011, <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- S. Jha, J.A. Okolie, S. Nanda, A.K. Dalai, A review of biomass resources and thermochemical conversion technologies, Chem. Eng. Technol., 45 (2022), pp. 791-799, <https://doi.org/10.1002/ceat.202100503>
- Praveen Kumar Ghodke , Amit Kumar Sharma , Arun Jayaseelan , K.P. Gopinath, Hydrogen-rich syngas production from the lignocellulosic biomass by catalytic gasification: A state of art review on advance technologies, economic challenges, and future prospectus, Fuel, Volume 342, 15 June 2023, 127800, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127800>
- Karan Homchat , Sanchai Ramphueiphad, The continuous carbonisation of rice husk on the gasifier for high yield charcoal production, Results in Engineering, Volume 15, September 2022, 100495, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100495>
- Zhenkun Guo , Fanhui Guo , Yang Guo , Zekai Miao , Yonghui Feng , Jianjun Wu , Yixin Zhang , Preparation of barbecue charcoal using residue produced after biomass gasification and pollutant emission test during combustion, Journal of Environmental Chemical

Engineering, Volume 10, Issue 1, February 2022, 107074,
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107074>

Chaitanya Reddy Chilakamarry , A.M. Mimi Sakinah , A.W. Zularisam , Ranjna Sirohi ,
Irshad Ahamad Khilji , Noormazlinah Ahmad , Ashok Pandey, Advances in solid-state
fermentation for bioconversion of agricultural wastes to value-added products: Opportunities
and challenges, Advances in solid-state fermentation for bioconversion of agricultural wastes
to value-added products: Opportunities and challenges, Volume 343, January 2022, 126065,
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126065>

Babasaheb M. Matsagar, Kevin C.-W. Wu, Chapter 1 - Agricultural waste-derived biochar for
environmental management, Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development
Goals, 2022, Pages 3-13, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85343-9.00026-4>

S. Mandal , A. Kunhikrishnan , N.S. Bolan , H. Wijesekara , R. Naidu, Chapter 4 -
Application of Biochar Produced From Biowaste Materials for Environmental Protection and
Sustainable Agriculture Production, Environmental Materials and Waste, Resource Recovery
and Pollution Prevention, 2016, Pages 73-89,
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00004-4>

Chang Liu , Yan Wu , Guoxin Lan , Xiaopeng Ji , Yaping Xia , Chuan Fu , Jia Shen , Jiacheng
Gui , Yuting Liu , Yuanying Qu , Hanyu Peng, CO₂ capture performance of biochar prepared
from sewage sludge after conditioning with different dewatering agents, Journal of
Environmental Chemical Engineering, Volume 10, Issue 5, October 2022, 108318,
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108318>

Tao Kan, Vladimir Strezov, Tim J. Evans, Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of
product properties and effects of pyrolysis parameters, Renewable and Sustainable Energy
Reviews, Volume 57, May 2016, Pages 1126-1140, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>

Hongyan Nan, Fan Yang, Ling Zhao, Ondřej Mašek, Xinde Cao, and Ziyue Xiao, Interaction
of Inherent Minerals with Carbon during Biomass Pyrolysis Weakens Biochar Carbon
Sequestration Potential, ACS Sustainable Chem. Eng. 2019, 7, 1, 1591–1599,
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05364>

Nekita Boraah , Sumedha Chakma , Priyanka Kaushal, Optimum features of wood-based
biochars: A characterization study, Optimum features of wood-based biochars: A
characterization study, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 11, Issue 3,
June 2023, 109976, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109976>

Erin N. Yargicoglu , Bala Yamini Sadasivam , Krishna R. Reddy , Kurt Spokas, Physical and
chemical characterization of waste wood derived biochars, Waste Management, Volume 36,

February 2015, Pages 256-268, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.029>

S. Jha, J.A. Okolie, S. Nanda, A.K. Dalai, A review of biomass resources and thermochemical conversion technologies, *Chem. Eng. Technol.*, 45 (2022), pp. 791-799, <https://doi.org/10.1002/ceat.202100503>

Sebastian Meyer, Bruno Glaser, Peter Quicker, Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: a literature review, *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 22, 9473–9483, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es201792c>

Xuefei Cao , Linxin Zhong , Xinwen Peng , Shaoni Sun , Shouming Li , Shijie Liu , Runcang Sun, Comparative study of the pyrolysis of lignocellulose and its major components: characterization and overall distribution of their biochars and volatiles, *Bioresource Technology*, Volume 155, March 2014, Pages 21-27, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.006>

Ramesh Potnuri , Dadi Venkata Surya , Chinta Sankar Rao , Abhishek Yadav , Veluru Sridevi , Neelancherry Remya, A review on analysis of biochar produced from microwave-assisted pyrolysis of agricultural waste biomass, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 173, August 2023, 106094, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106094>

Yaning Zhang, Sichen Fan, Tao Liu, Wenming Fu, Bingxi Li, A review of biochar prepared by microwave-assisted pyrolysis of organic wastes, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 50, March 2022, 101873, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101873>

Wei Xiang , Xueyang Zhang , Chengcheng Cao , Guixiang Quan , Min Wang , Andrew R. Zimmerman , Bin Gao, Microwave-assisted pyrolysis derived biochar for volatile organic compounds treatment: Characteristics and adsorption performance, *Bioresource Technology*, Volume 355, July 2022, 127274, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127274>

Habib Ullah , Qumber Abbas , Muhammad Ubaid Ali , Amina , Ayesha Imtiyaz Cheema , Balal Yousaf , Jörg Rinklebe, Synergistic effects of low-/medium-vacuum carbonization on physico-chemical properties and stability characteristics of biochars, *Chemical Engineering Journal*, Volume 373, 1 October 2019, Pages 44-57, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.025>

Ümit Uras-Postma , Marion Carrier , Johannes (Hansie) Knoetze, Vacuum pyrolysis of agricultural wastes and adsorptive criteria description of biochars governed by the presence of oxides, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 107, May 2014, Pages 123-132, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.02.012>

Ümit Uras , Marion Carrier , Ailsa G. Hardie , Johannes H. Knoetze, Physico-chemical characterization of biochars from vacuum pyrolysis of South African agricultural wastes for application as soil amendments, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 98,

November 2012, Pages 207-213, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.08.007>

András Bartos, Juliana Anggono, Ágnes Elvira Farkas , Dávid Kun , Felycia Edi Soetaredjo , János Móczó, Antoni , Hariyati Purwaningsih, Béla Pukánszky, Alkali treatment of lignocellulosic fibers extracted from sugarcane bagasse: Composition, structure, properties, Polymer Testing Volume 88, August 2020, 106549, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106549>

Jun Seok Kim , Y.Y. Lee , Tae Hyun Kim, A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass, Bioresource Technology, Volume 199, January 2016, Pages 42-48, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>

Usama Shakeel , Xinlong Li , Biao Wang , Fanhui Geng , Quan Zhang , Kai Zhang , Xia Xu , Jian Xu, Structure and integrity of sequentially extracted lignin during poplar (alkaline) pretreatment, Process Biochemistry, Volume 117, June 2022, Pages 198-208, <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.03.026>

Rangabhashiyam. S, Balasubramanian, The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: Performance, mechanism and wastewater application—A review, Industrial Crops and Products, Volume 128, February 2019, Pages 405-423, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.041>

Aymerick Eudes , Yan Liang , Prajakta Mitra , Dominique Loqué, Lignin bioengineering, Current Opinion in Biotechnology, Volume 26, April 2014, Pages 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.01.002>

Cagnon, X. Py, A. Guillot, F. Stoeckli, G. Chambat, Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors, Bioresource Technology, Volume 100, Issue 1, January 2009, Pages 292-298, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.009>

S. Shackley, S. Carter, T. Knowles, E. Middelink, S. Haeefe, S. Haszeldine, Sustainable gasification-biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part II: Field trial results, carbon abatement, economic assessment and conclusions, Energy Policy, Vol. 41, pp. 618-623 (2011), <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.026>

Dilek Angın, Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake, Bioresource Technology, Volume 128, January 2013, Pages 593-597, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.150>

P. Liu, W.-J. Liu, H. Jiang, J.-J. Chen, W.-W. Li, H.-Q. Yu, Modification of bio-char derived from fast pyrolysis of biomass and its application in removal of tetracycline from aqueous solution, Bioresour. Technol., 121 (2012), pp. 235-240,

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.085>

XRD pattern analysis of drug crystal powder, Pharmaceutical Affairs, 202012, Issue 15,

<https://ppfocus.com/0/he73414dc.html>