Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj

การใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุพาหะสำหรับพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้า

Utilization of biochar as a carrier material for developing slow-release nitrogen fertilizer

เสาวคนธ์ เหมวงษ์[1]* และ ชนพิชา กาลสุข[2]

Saowakon Hemwong[1]* and Chonphicha Kalasuk[2]

[1]คณะเกษตรและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยนครพนม, จังหวัดนครพนม 48000, ประเทศไทย
[1]Department of Agriculture and Technology, Nakhon Phanom University, Khon Phanom 48000, Thailand
[2]ศูนย์วิจัยและพัฒนาเกษตรจันทบุรี, จังหวัดจันทบุรี 22150, ประเทศไทย
[2]Chanthaburi Agricultural Research and Development Center, Chanthaburi Province 22150, Thailand

บทคัดย่อ: การสูญเสียไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรียในดินผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การชะล้าง การระเหิด และการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ เป็นปัจจัยที่ลดประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านแกลบ ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ ในการดูดซับและปลดปล่อยไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรียภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ การทดลองประกอบด้วยสองปัจจัย ได้แก่ ชนิดของถ่านชีวภาพ (3 ชนิด) และระยะเวลาในการเขย่า (1, 2, 6 และ 24 ชั่วโมง) ผลการวิจัยพบว่า ถ่านแกลบมีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุดในชั่วโมงแรก แต่ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากนั้น ส่วนถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่มีการดูดซับในอัตราที่คงที่และช้ากว่า โดยถ่านใบลิ้นจี่ปลดปล่อยไนโตรเจนได้เร็วที่สุดในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรก แสดงให้เห็นว่าการดูดยึดด้วยแรงที่อ่อน ขณะที่ถ่านไม้ไผ่สามารถปลดปล่อยได้เร็วในช่วงแรกแต่สามารถรักษาไนโตรเจนไว้ได้ดีกว่าในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ถ่านแกลบมีการดูดซับได้รวดเร็วแต่ปลดปล่อยไนโตรเจนได้ช้ากว่า ปัจจัยด้านระยะเวลาเขย่า พบว่า การเขย่า 1 ชั่วโมง มีผลทำให้การดูดซับไนโตรเจนสูงสุด และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีการปลดปล่อยไนโตรเจนมากที่สุด งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ถ่านแกลบมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนและเหมาะในการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยของพืช ลดการสูญเสียไนโตรเจน และส่งเสริมการเกษตรอย่างยั่งยืน
คำสำคัญ: การดูดซับไนโตรเจน; การปลดปล่อยไนโตรเจน; วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร; ปุ๋ยยูเรีย; ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

ABSTRACT: Nitrogen loss from urea fertilizers through processes such as leaching, volatilization, and microbial transformation significantly reduces fertilizer use efficiency and causes environmental concerns. This study aimed to evaluate the performance of three types of biochar derived from agricultural residues (rice husk, lychee leaves, and bamboo) in terms of nitrogen sorption and desorption from urea under controlled laboratory conditions. A factorial experiment was conducted in a completely randomized design (CRD) with four replications, considering two factors: biochar type (3 types) and shaking time (1, 2, 6, and 24 hours). The results revealed that rice husk biochar exhibited the highest nitrogen sorption at 1 hour but declined rapidly thereafter. In contrast, lychee and bamboo biochars showed slower but more stable sorption rates. Lychee biochar released nitrogen the fastest within the first 1–2 hours, indicating weak adsorption strength, while bamboo biochar released nitrogen rapidly at first but retained it more effectively over time. Rice husk biochar, although it showed quick adsorption, exhibited the slowest

* Corresponding author: saowakon@hotmail.com

Received: date; July 29, 2025 Revised: date; April 19, 2026

Accepted: date; April 23, 2026 Published: date; August 24, 2026

nitrogen release, making it the most suitable for controlled-release applications. Regarding shaking time, 1 hour resulted in the highest nitrogen sorption, while 6 hours resulted in the highest nitrogen desorption. In conclusion, rice husk biochar demonstrates the most favorable characteristics for developing slow-release nitrogen fertilizers, contributing to enhanced nitrogen use efficiency, reduced environmental loss, and more sustainable agricultural practices.

Keywords: nitrogen sorption; nitrogen desorption; agricultural waste; urea fertilizer; controlled-release fertilizer

บทนำ

ไนโตรเจน (Nitrogen, N) เป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณสูง เนื่องจากเป็นองค์ประกอบสำคัญของกรดอะมิโน โปรตีน คลอโรฟิลล์ และกรดนิวคลีอิก ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตของพืช (Hofman and Cleemput, 2004; Marschner, 2012) นอกจากบทบาททางสรีรวิทยาแล้ว ไนโตรเจนยังเป็นปัจจัยกำหนดศักยภาพการให้ผลผลิตของพืชในระบบการเกษตรทั่วโลก โดยเฉพาะในระบบการผลิตพืชเชิงเข้มข้นที่ต้องอาศัยการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการอาหารของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจนของพืช (nitrogen use efficiency, NUE) มักอยู่ในระดับที่ต่ำ ประกอบกับปุ๋ยไนโตรเจนที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ ปุ๋ยยูเรีย (urea) มักสูญเสียไปจากระบบดินอย่างรวดเร็วผ่านกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การชะล้าง (leaching) การระเหิด (volatilization) และการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ (nitrification-denitrification) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยของพืชต่ำลง และเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น การเพิ่มขึ้นของไนเตรทในแหล่งน้ำ และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Shaviv and Mikkelsen, 1993; Zhang et al., 2013) เป็นต้น จากรายงานของ กิตจเมธ และคณะ (2558) พบว่า ปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนียออกมามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต และปุ๋ยเชิงประกอบที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของปุ๋ย อย่างไรก็ตามมีการคิดค้นวิธีการเพื่อให้ลดการสูญเสียไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรียหลายวิธี Klimczyk et al. (2021) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ตัวยับยั้งเอนไซม์ urease ซึ่งพบว่าสามารถลดการปลดปล่อยแอมโมเนียจากปุ๋ยยูเรียได้ถึง 30-70% ทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในแปลงทดลอง นอกจากนี้ยังมีการแนะนำให้แบ่งใส่ปุ๋ยไนโตรเจนหลายๆ ครั้ง อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนการผลิตและความสะดวกในการใช้งานของเกษตรกร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาวัสดุทางเลือกที่เหมาะสมกับวิถีชีวิตของเกษตรกรที่จะลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวเพื่อให้เกิดการแก้ไขปัญหาได้อย่างยั่งยืน

แนวทางหนึ่งในการลดการสูญเสียไนโตรเจนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยคือการพัฒนาปุ๋ยละลายช้า (Slow-Release Fertilizer: SRF) หรือปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารให้เหมาะสมกับความต้องการของพืชในแต่ละช่วงอายุ (Azeem et al., 2014) รวมทั้งลดอาการไหม้ของต้นกล้า (fertilizer burn) ซึ่งมักเกิดจากความเข้มข้นของเกลือหรือไนโตรเจนในดินที่สูงเกินไปในช่วงเวลาสั้นๆ โดยเฉพาะในระยะงอกและระยะต้นกล้าที่มีความไวต่อความเค็มสูง (Havlin et al., 2014) การลดค่าใช้จ่ายในด้านของแรงงานและยังช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้เป็นตัวพาหะ (carrier) หรือสารเคลือบปุ๋ย เช่น พอลิเมอร์หรือกำมะถัน อาจมีต้นทุนสูง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว จึงเกิดแนวคิดในการใช้วัสดุทางเลือกที่ยั่งยืน เช่น ถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจน (pyrolysis) และมีคุณสมบัติในการดูดซับธาตุอาหาร กักเก็บความชื้น และมีพื้นที่ผิวสูง (Lehmann and Joseph, 2015)

ถ่านชีวภาพมีความพรุน (porosity) และพื้นที่สัมผัส (surface area) สูง มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูง และสามารถกักเก็บธาตุอาหารไว้ได้นาน ซึ่งช่วยควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนในดินให้สอดคล้องกับความต้องการของพืช (Liang et al., 2006; Laird et al., 2010) รวมทั้งลดความหนาแน่นของดิน (Lehmann and Joseph, 2015; Blanco-Canqui, 2017) งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนสามารถลดการชะล้างไนโตรเจนและเพิ่มการใช้ประโยชน์ของพืช เช่น Manikandan and Subramanian (2013) รายงานว่าการผสมถ่านชีวภาพจากไม้กระถินหางกระรอกกับยูเรียช่วยควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสูญเสียในรูปของแอมโมเนียและไนเตรท ในขณะที่ Inyang et al. (2010) พบว่าถ่านจาก bagasse เพิ่มทั้งความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, CEC) และความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (anion exchange capacity, AEC) ของดินส่งผลให้ปุ๋ยไนโตรเจนมีความคงอยู่ในดินนานขึ้น นอกจากนี้ถ่านชีวภาพมีค่า pH ที่สูงจึง

ช่วยในการปรับปรุงดินให้มีความเหมาะสมต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะเพิ่มระดับของความสามารถในการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียม (K) และแมกนีเซียม (Mg) (FFTC, 2001) Dey and Mavi (2021) ได้นำถ่านชีวภาพจากฟางข้าวและมูลไก่ใส่ร่วมกับปุ๋ยยูเรีย พบว่าการเกิดกระบวนการ mineralization ของไนโตรเจนลดลงต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยยูเรียอย่างเดียวถึง 38-45% และ 19-28% ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจาก 1) การเพิ่มขึ้นของค่า C/N ratio เมื่อมีการเพิ่มถ่านชีวภาพลงไปในดิน 2) ถ่านชีวภาพมีการดูดซับแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ไว้ 3) เกิดกระบวนการ immobilization ของไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ดินเมื่อใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดิน และ 4) ถ่านชีวภาพทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ urease ลดลง

การดูดซับ (sorption) และการปลดปล่อย (desorption) ไนโตรเจนของถ่านชีวภาพเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในดิน ถ่านชีวภาพสามารถดูดซับไนโตรเจนได้ทั้งในรูปของ NH_4^+, ไนเตรต (NO_3^-) และยูเรียโดยผ่านกลไกต่างๆ ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ, การแลกเปลี่ยนไอออน, การเกิดพันธะเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่าน และปฏิสัมพันธ์ทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุบวกของไนโตรเจนกับผิวของถ่าน (Cai et al., 2016; Zhao et al., 2022) นอกจากนี้ กลไกการดูดซับและปลดปล่อยไนโตรเจนมีความซับซ้อน และได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุต้นกำเนิดถ่าน อุณหภูมิในการไพโรไลซิส และลักษณะทางเคมีของผิวถ่าน โดยทั่วไปถ่านที่ผลิตจากวัสดุอินทรีย์ที่มีธาตุอาหารสูง เช่น มูลสัตว์ มักมี CEC และความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนมากกว่าถ่านจากไม้เนื้อแข็ง (Liu et al., 2016; Biederman and Harple, 2013) การศึกษาโดย He et al. (2022) แสดงให้เห็นว่าการลดขนาดของถ่านชีวภาพสามารถเพิ่มอัตราการดูดซับและปลดปล่อยไนโตรเจนได้เร็วขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มากขึ้นและการเข้าถึงรูพรุนได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการพัฒนานำถ่านชีวภาพไปเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยยูเรียเพื่อควบคุมการสูญเสียไนโตรเจน และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจนของพืชโดย Jia et al. (2021) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพเคลือบปุ๋ยยูเรียทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจนได้ 20% เมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยยูเรียทำให้ลดการสูญเสียไนโตรเจน เช่นเดียวกันกับ Bakshi et al. (2021) ได้ทำการพัฒนาปุ๋ยละลายช้าโดยใช้ถ่านชีวภาพผสมกับยูเรียในอัตราส่วนต่างๆ (1:2 ถึง 1:6) และใช้สารเคลือบ เช่น H_3PO_4 activated เพื่อควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน พบว่าถ่านชีวภาพทำให้ระยะการปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยยูเรียช้าโดยที่เวลา 4,320 นาที มีไนโตรเจนที่ยังไม่ได้ปลดปล่อยมากถึง 61-91% เปรียบเทียบกับปุ๋ยยูเรียปกติใช้อยู่ที่ 12 นาที รวมทั้งยังลดปริมาณการสูญเสียไนโตรเจนจากกระบวนการ NH_3-volatilization ได้มากกว่าปุ๋ยยูเรียปกติ

ในบริบทของประเทศไทย การใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ ใบไม้ และไม้ไผ่ ซึ่งมีต้นทุนต่ำและมีปริมาณมาก เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นปุ๋ยละลายช้าเพื่อลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม ยังขาดข้อมูลเชิงเปรียบเทียบภายใต้สภาวะควบคุมที่ชัดเจนระหว่างวัสดุอินทรีย์ทั่วไปกับถ่านชีวภาพ โดยเฉพาะในด้านพฤติกรรมการดูดซับและการปลดปล่อยธาตุอาหารในดิน ซึ่งโดยทั่วไป วัสดุอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมัก มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มอินทรียวัตถุในดินและเป็นแหล่งสะสมธาตุอาหาร แต่การปลดปล่อยธาตุอาหารมักขึ้นอยู่กับกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ซึ่งมีความแปรผันสูงและอาจนำไปสู่การสูญเสียไนโตรเจนในรูปของการชะล้างหรือการระเหยได้ง่าย ในทางตรงกันข้าม ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างที่เสถียร มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับ (absorption) ธาตุอาหาร เช่น NH4+ และ NO3- และช่วยยืดระยะเวลาการคงอยู่ของไนโตรเจนในดิน (Lehmann and Joseph, 2015; He et al., 2023) ด้านประสิทธิภาพของถ่านแต่ละชนิดต่อความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรีย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของถ่านชีวภาพจากวัสดุ 3 ชนิด ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย และมีปริมาณมากในไร่นาของเกษตรกร ได้แก่ ถ่านแกลบ ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ต่อความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยไนโตรเจนในรูปแบบปุ๋ยละลายช้าภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุพาหะจากชีวมวลเพื่อการผลิตปุ๋ยละลายช้าในอนาคต

วิธีการศึกษา

งานทดลองนี้จัดการศึกษาแบบ 3 x 4 แฟกทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (factorial in completely randomized design, CRD) จำนวน 4 ซ้ำ แบ่งการทดลองเป็น 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 ชนิดของถ่าน จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ถ่าน

แกลบ ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ และปัจจัยที่ 2 ระยะเวลาในการเขย่า จำนวน 4 ระยะ ได้แก่ 1 2 6 และ 24 ชั่วโมง รวมหลอดทดลองทั้งสิ้น 48 หลอดทดลอง โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

การเตรียมถ่านชีวภาพ

ถ่านแกลบ ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ เผาโดยใช้เตาแบบ 2 ชั้น มีถังด้านนอกเป็นถังที่เปิดทั้งด้านบนและด้านล่าง ขนาด 200 ลิตร ถังด้านใน ขนาด 100 ลิตร เปิดด้านบน ใส่วัตถุดิบ (แกลบ ใบลิ้นจี่ และไม้ไผ่) ลงในถังขนาดเล็กด้านใน ในกรณีไม้ไผ่นำมาตากให้แห้งประมาณ 7 วัน และตัดเป็นท่อนขนาด 50 เซนติเมตร ใส่ให้เต็มถังขนาด 100 ลิตร และปิดฝาใส่ไม้เชื้อเพลิงลงไปรอบๆ ถังและด้านบนของถังด้านในจนเต็ม จุดไฟให้เชื้อเพลิง **(Figure 1)** ปล่อยให้เกิดการเผาไหม้จนไฟดับใช้เวลาประมาณ 2-4 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ทำการวัดอุณหภูมิระหว่างการเผาด้วยเครื่องอินฟาเรดเทอร์โมมิเตอร์ (infrared thermometer) FT3700-29 ยี่ห้อ HIOKI โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผาถ่านแกลบ ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ เท่ากับ 285 350 และ 480 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นำถ่านที่ได้มาทุบและบดให้ละเอียด นำผงถ่านที่บดแล้วผสมกับกาวใสในอัตราส่วน 5:1 เพื่อให้ผงถ่านคงรูปโดยกาวที่ใช้มีผลต่อการดูดซับและการปลดปล่อยไนโตรเจนชั่วคราวแต่ไม่สามารถควบคุมในระยะยาวเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเคลือบพอลิเมอร์ (Cidreira et al., 2024) และนำเข้าเครื่องบดเพื่อทำเป็นเม็ดขนาดเล็กประมาณ 0.5 เซนติเมตร แล้วนำไปผึ่งให้แห้งเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป **(Figure 2)** ทำการสุ่มตัวอย่างถ่านชีวภาพที่เตรียมเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิว (surface area) โดยวิธี Langmuir surface area และปริมาตรรูพรุน (pore volume) ด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer คุณสมบัติทางเคมีบางประการ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน (organic carbon, O.C.) โดยวิธี Walkley and Black ตามวิธีของ กรมพัฒนาที่ดิน (2553) วัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี micro Kjeldahl วัดค่า pH ด้วย pH meter (Model: pH-033) โดยใช้น้ำกลั่นสัดส่วน ถ่านต่อน้ำ เท่ากับ 1:10 และ EC สัดส่วน 1:20 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที



Figure 1 Biochar kiln consists of: (a) Inner drum (100 liters) and (b) Outer drum (200 liters)

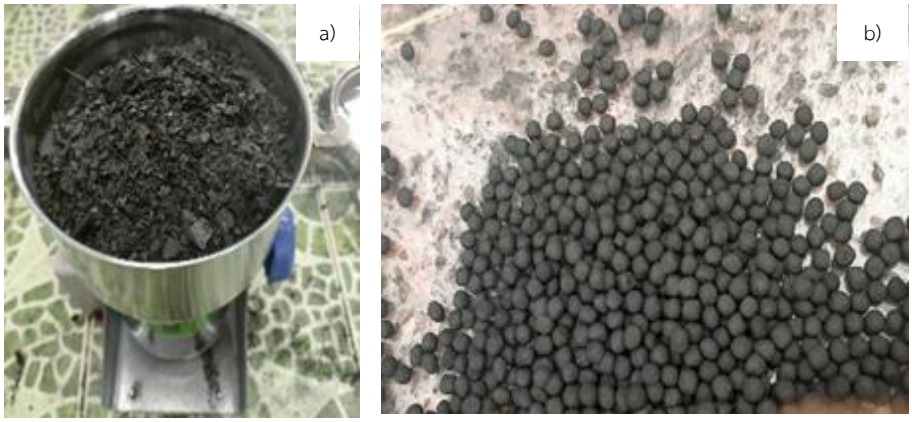


Figure 2 Biochar preparation for use as a slow-release fertilizer carries: (a) grind the biochar into a fine powder and (b) biochar as a slow-release fertilizer carries

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ และการปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนของถ่าน

เตรียมสารละลายปุ๋ยยูเรียโดยผสมปุ๋ยกับน้ำกลั่นในอัตรา 1:10 ให้ความร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีการของ Manikandan และ Subramanian (2013) เพื่อระเหยความชื้นออกจากระบบทำให้ความเข้มข้นของสารละลายคงที่ และยูเรียละลายอย่างสมบูรณ์โดยไม่มีผลต่อการสลายตัวของยูเรีย เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของยูเรีย (ประมาณ 132-135 องศาเซลเซียส) ซึ่งยูเรียจะยังคงอยู่ในรูปโมเลกุลที่ละลายในน้ำ ($(NH_2)_2CO$ (aq)) เป็นหลัก โดยมี NH_4^+ และ NH_3 ร่วมอยู่ด้วย และมีความเสถียรในระดับหนึ่ง (Lehmann and Joseph, 2015) ในระหว่างการให้ความร้อนทำการกวนผสมด้วยเครื่อง Hot plate stirrer จนละลายเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนในสารละลายปุ๋ยยูเรียที่เตรียมได้โดยวิธีการกลั่น

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยการนำเม็ดถ่านที่ผสมกับกาวขึ้นรูปที่เตรียมไว้ได้แต่ละชนิดใส่ลงไปในหลอด centrifuge จำนวน 0.5 กรัม/หลอด เติมสารละลายปุ๋ยยูเรียที่เตรียมไว้จำนวน 10 มิลลิลิตร นำตัวอย่างที่ผสมระหว่างเม็ดถ่านและสารละลายปุ๋ยยูเรียที่ได้ไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าในแนวราบเพื่อให้สารละลายปุ๋ยยูเรียสัมผัสกับเม็ดถ่านได้ดี โดยใช้ช่วงเวลาในการเขย่า 4 ช่วงเวลาตามกรรมวิธี คือ 1 2 6 และ 24 ชั่วโมง เมื่อเขย่าครบระยะเวลาในแต่ละช่วงที่กำหนด นำของผสมที่ได้ไปเข้าเครื่อง centrifuge โดยใช้ความเร็ว 4,000 rpm (รอบ/นาที) เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แยกสารละลายออกจากเม็ดถ่านด้วยการกรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 4 เพื่อนำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธี micro Kjeldahl ส่วนตะกอนถ่านที่เหลือนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้น

การทดสอบประสิทธิภาพการปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจน นำตะกอนถ่านแต่ละชนิดที่อบไว้แล้วในขั้นตอนที่ผ่านมาใส่ในหลอด centrifuge จำนวน 0.5 กรัม/หลอด และเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 2 6 และ 24 ชั่วโมง เมื่อเขย่าครบระยะเวลาในแต่ละช่วงที่กำหนด นำของผสมที่ได้ไปเข้าเครื่อง centrifuge โดยใช้ความเร็ว 4,000 rpm (รอบ/นาที) เป็นเวลา 20 นาที แยกสารละลายออกจากเม็ดถ่านด้วยการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 เพื่อนำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/g) ด้วยวิธี micro Kjeldahl เช่นเดียวกันกับขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของไนโตรเจนในสารละลายปุ๋ยยูเรีย จากการคำนวณตามสูตร

ปริมาณไนโตรเจนที่ดูดซับ = ปริมาณ N ในสารละลายปุ๋ยยูเรียเริ่มต้น – ปริมาณ N ในสารละลายปุ๋ยยูเรียหลังดูดซับด้วยถ่าน
ปริมาณไนโตรเจนที่ปลดปล่อย = ปริมาณไนโตรเจนที่วัดได้จากถ่านปลดปล่อยออกมาในน้ำกลั่น

นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least significant difference (LSD) ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรม Statistix 8 (Analytical Software, USA)

ผลการศึกษา

คุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพแต่ละชนิด

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพแต่ละชนิด พบว่า ถ่านไม้ไผ่มีพื้นที่ผิว (15.43 m^2/g) สูงกว่าถ่านแกลบ (0.80 m^2/g) และถ่านใบลิ้นจี่ (5.16 m^2/g) อย่างไรก็ตามถ่านใบลิ้นจี่มีปริมาตรรูพรุนสูงกว่าถ่านแกลบ และถ่านไม้ไผ่ **(Table 1)** คุณสมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพ พบว่า ถ่านใบลิ้นจี่มีค่า pH (8.62) สูงที่สุดเมื่อเทียบกับถ่านแกลบ (7.47) และถ่านไม้ไผ่ (7.64) แต่อย่างไรก็ตามถ่านแกลบมีค่า EC (0.63 µS) สูงกว่าถ่านใบลิ้นจี่ (0.32) และถ่านไม้ไผ่ (0.38) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ของถ่านแกลบ (12.69) ถ่านใบลิ้นจี่ (12.60) และถ่านไม้ไผ่ (12.53) มีค่าสูงไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด พบว่า ถ่านใบลิ้นจี่มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (4.66%) สูงกว่าถ่านแกลบ และถ่านไม้ไผ่ โดยถ่านแกลบมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดต่ำสุด (0.65%)

Table 1 Physical and chemical properties of biochar

Properties	Rice husk biochar	Lychee biochar	Bamboo biochar
Surface area (m^2/g)	0.80	5.16	15.43
Pore volume (cc/g)	0.008	0.016	0.009
pH (1:10 H_2O)	7.47	8.62	7.64
EC (1:20 H_2O) (µS)	0.63	0.32	0.38
Organic carbon (%)	12.69	12.60	12.53
Total N (mg/g)	6.5	46.6	28.9

ปริมาณการดูดซับและการปลดปล่อยของไนโตรเจนทั้งหมดที่อยู่ในถ่านชีวภาพ

การดูดซับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด พบว่า ถ่านแกลบ ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่พบว่าปริมาณการดูดซับไนโตรเจนของถ่านใบลิ้นจี่ (0.35%) และถ่านไม้ไผ่ (0.31%) มีแนวโน้มสูงกว่าถ่านแกลบ (0.22 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน) อย่างไรก็ตาม ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนทั้งหมดของถ่านไม้ไผ่ (0.31 เปอร์เซ็นต์) มีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $P \leq 0.05$ ในขณะที่ถ่านแกลบมีปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนมีค่าต่ำสุด (0.26 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน) ดังแสดงใน **Table 2**

ปัจจัยด้านระยะเวลาการเขย่า พบว่า การเขย่าสารละลายปุ๋ยยูเรียกับเม็ดถ่านชีวภาพเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีการดูดซับไนโตรเจนสูงสุด (0.47 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการเขย่าเป็นเวลา 2 6 และ 24 ชั่วโมง (0.27 0.22 และ 0.20 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ตามลำดับ) ในขณะที่ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนจากถ่านชีวภาพ พบว่าการเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ถ่านชีวภาพสามารถปลดปล่อยไนโตรเจนได้สูงสุด (0.35 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน) เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาอื่น **(Table 2)**

ปริมาณการดูดซับไนโตรเจนในถ่านชีวภาพเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป พบว่า ถ่านแกลบมีปริมาณการดูดซับไนโตรเจนได้สูงกว่าเมื่อผ่านไป 1 ชั่วโมง และลดลงมากอย่างต่อเนื่อง **(Figure 2)** ในขณะที่ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่มีปริมาณการดูดซับไนโตรเจนมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลง และมีการดูดซับไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในถ่านใบลิ้นจี่เมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมง ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนที่ปลดปล่อย พบว่า ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ มีปริมาณการปลดปล่อยได้รวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านแกลบโดยเฉพาะในชั่วโมงที่ 1 และ 2 **(Figure 3)**

Table 2 Total nitrogen sorption and desorption capacities of each type of biochar at different shaking intervals

Factor	Total nitrogen content (%)	
	Sorption[1]	Desorption
Biochar type (A)		
Rice husk biochar	0.22	0.26
Lychee biochar	0.35	0.27
Bamboo biochar	0.31	0.31
Shanking time (B)		
1 hours	0.47 a	0.23 b
2 hours	0.27 b	0.27 b
6 hours	0.22 b	0.35 a
24 hours	0.20 b	0.27 b
$LSD_{.05}$ A	0.07^{*}	0.07^{ns}
$LSD_{.05}$ B	0.08^{*}	0.02^{**}
$LSD_{.05}$ A*B	0.03^{ns}	0.07^{ns}
C.V. (%)	5.83	8.70

** = Different letter indicate statistically significant difference at P≤0.01 and ^{ns} = not significant difference at P>0.05

[1] Sorption values were determined by subtracting the nitrogen concentration in the biochar solution from that in the original urea solution (3.95%)

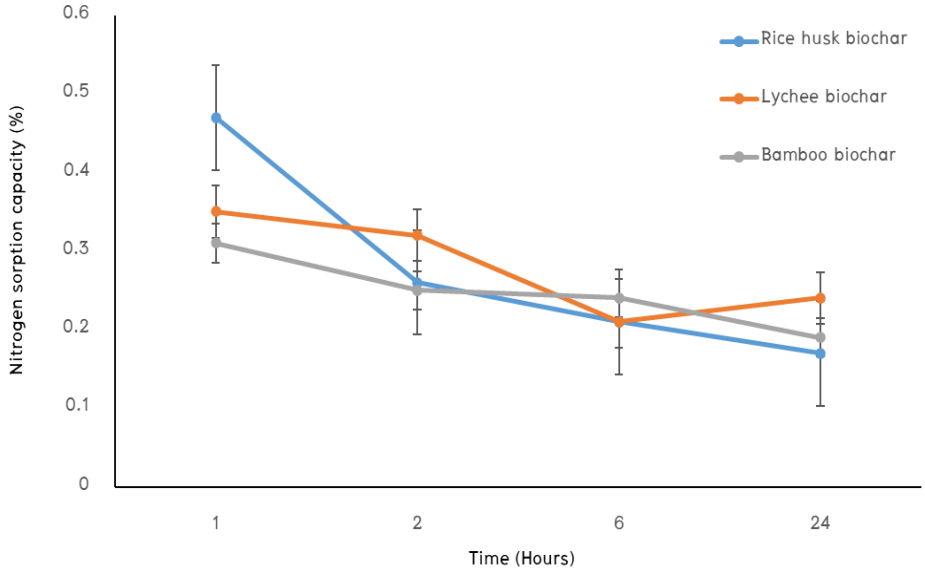


Figure 2 Nitrogen sorption capacity of each type of biochar at different time intervals

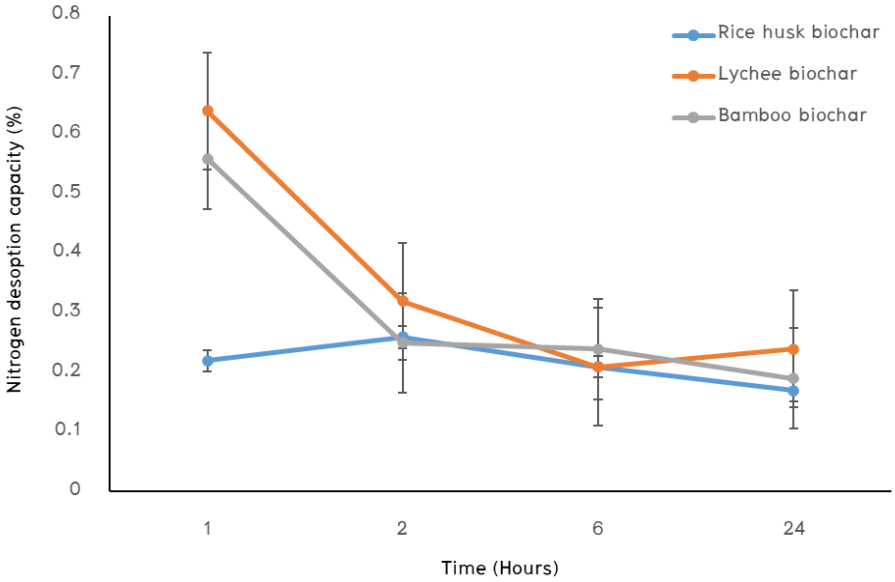


Figure 3 Nitrogen desorption capacity of each type of biochar at different time intervals

วิจารณ์

การใช้ถ่านชีวภาพเป็นพาหะในการทำปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้า พบว่าถ่านแกลบมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับลดลงอย่างรวดเร็ว ชี้ให้เห็นว่าถ่านแกลบอาจมีหมู่ฟังก์ชันหรือพื้นที่ผิวที่ทำปฏิกิริยากับ NH_4^+ ion (ยูเรีย) เร็วกว่าถ่านใบลิ้นจี่และถ่านไม้ไผ่ แต่ถ่านแกลบมีโครงสร้างรูพรุนที่สามารถเก็บไนโตรเจนได้ไม่นานอาจเนื่องจากการผลิตถ่านแกลบเผาด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (285 °C) ทำให้โครงสร้างมีปริมาณรูพรุน และพื้นที่ผิวสัมผัสที่ต่ำกว่าการเผาถ่านชีวภาพที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (Lehmann and Joseph, 2015) ซึ่งการเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งเสริมการระเหยของสารระเหย (volatile matter) และการสลายตัวของโครงสร้างอินทรีย์สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนทั้งในระดับ micropores และ mesopores (Leng et al., 2021; Zhang et al., 2024) โดย Leng et al. (2021) รายงานว่าเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ต่ำกว่า 400 °C จะมีผลทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยการเผาที่อุณหภูมิที่ต่ำจะไม่สามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่อยู่ภายในวัสดุได้สมบูรณ์รวมทั้งการทำลายโครงสร้างภายในให้เกิดรูพรุน อย่างไรก็ตามถ่านใบลิ้นจี่มีความสามารถในการดูดซับอัตราที่คงที่ และความสามารถในการดูดซับระดับปานกลาง ในขณะที่ถ่านไม้ไผ่มีการดูดซับช้าแต่อัตราที่คงที่แสดงให้เห็นว่าถ่านไม้ไผ่เผาด้วยอุณหภูมิ (มากกว่า 400 °C) สูงกว่าถ่านแกลบและถ่านใบลิ้นจี่น่าจะทำให้มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยดูดซับได้เป็นเวลานาน อย่างไรก็ตาม ผลของพื้นที่ผิวและรูพรุนต่อการดูดซับไนโตรเจน จากผลการทดลอง พบว่าถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด (15.43 m^2/g) แต่กลับมีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนเริ่มต้นต่ำกว่าถ่านแกลบและถ่านใบลิ้นจี่ แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดซับไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวหรือโครงสร้างของถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียว แต่อาจขึ้นอยู่กับกลุ่มฟังก์ชันและประจุพื้นผิว รวมถึงระยะเวลาของการดูดซับด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao et al. (2013) ที่รายงานว่า การดูดซับแอมโมเนียมและไนเตรตในถ่านชีวภาพไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับกลุ่มฟังก์ชันที่ผิว (functional groups) และประจุพื้นผิว (surface charge) จากการทดลองครั้งนี้จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิในการเผา (pyrolysis temperature) เป็นปัจจัยเชิงกระบวนการที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ โดยเฉพาะโครงสร้างรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับไนโตรเจน (Lehmann and Joseph, 2015; Batista et al., 2018) นอกจากนี้ ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น (raw materials) ที่แตกต่างกันในด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของเซลล์และองค์ประกอบทางเคมี เช่น สัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ยังส่งผลต่อกลไกการเกิดรูพรุนและการพัฒนาโครงสร้างภายในของถ่านชีวภาพซึ่งมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและประสิทธิภาพในการดูดซับ (Lehmann and Joseph, 2015) อย่างไรก็ตาม การใช้

เตาเผาถ่านชีวภาพที่ต้นทุนต่ำไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของการเผาได้มีผลต่อคุณภาพของถ่านชีวภาพที่ไม่สม่ำเสมอในการเผาในแต่ละรอบจึงเป็นข้อจำกัดของการผลิตถ่านชีวภาพของเกษตรกร

การปลดปล่อยไนโตรเจนของถ่านใบลิ้นจี่ พบว่ามีปริมาณที่สูงที่สุดในระยะเวลาการเขย่า 1 ชั่วโมง ตามมาด้วยถ่านไม้ไผ่ และมีปริมาณต่ำสุด คือ ถ่านแกลบ โดยอัตราการปลดปล่อยลดลงอย่างรวดเร็วในถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ในช่วงการเขย่า 1 – 2 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าถ่านใบลิ้นจี่และถ่านไม้ไผ่มีความแข็งแรงในการยึดเหนี่ยวต่ำ (low retention strength) โดยถ่านใบลิ้นจี่อาจจะมีการดูดซับไนโตรเจนอยู่บนผิวหน้าในลักษณะหลวมทำให้สามารถปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับน้ำ ในขณะที่ถ่านไม้ไผ่ปลดปล่อยไนโตรเจนได้มากกว่าถ่านแกลบในช่วงระยะเริ่มต้นแต่สามารถรักษาการยึดเหนี่ยวไนโตรเจนไว้ได้ดีกว่าเมื่อเวลาผ่านไป อาจเนื่องจากมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางถึงขนาดเล็ก และกลไกการกับเก็บทางกายภาพที่แข็งแรงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านแกลบซึ่งการปลดปล่อยไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 1 – 2 ชั่วโมงของการเขย่า ชี้ให้เห็นว่าถ่านแกลบมีรูปแบบการปลดปล่อยไนโตรเจนได้ช้าลง อาจเนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนไว้ในตำแหน่งเฉพาะหรือภายในโครงสร้างของถ่านแกลบทำให้ถ่านแกลบเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุพาหะในการผลิตปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารช้า ดังนั้นโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่และกลุ่มฟังก์ชันผิวไม่ยึดไนโตรเจนไว้อย่างแน่นหนา ทำให้สามารถปล่อยออกมาได้อย่างรวดเร็ว Yao et al. (2012) สนับสนุนประเด็นนี้ว่า ถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) และค่า pH สูงมีแนวโน้มปลดปล่อยสารดูดซับได้เร็วกว่าชนิดอื่น

การเขย่าในช่วงเวลา 1 2 6 และ 24 ชั่วโมง พบว่า ระยะเวลา 1 ชั่วโมง มีการดูดซับและปลดปล่อยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีแนวโน้มสูงกว่าระยะเวลาอื่นๆ อาจเนื่องมาจากระยะเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาของสารที่ถูกดูดซับกับอะตอมที่พื้นที่ผิวของสารดูดซับที่เป็นของแข็งซึ่งนำไปสู่รูปแบบของการดูดซับแบบกายภาพที่มาจากแรงวันเดอร์วาลส หรือการดูดซับแบบเคมีด้วยการเกิดพันธะโควาเลนต์ (ศรัณยพงศ์ และคณะ, 2565) ดังนั้น เมื่อถ่านชีวภาพผสมกับยูเรียที่ละลายแล้ว NH_4^+ ion จะถูกยึดเกาะบนพื้นผิวและติดอยู่ภายใน mesopores และ micropores ของถ่านชีวภาพ อาจเนื่องจากการดูดซับทางเคมีของสารประกอบที่มีขั้วและไม่มีขั้ว รวมถึงพันธะที่ไม่ชอบน้ำ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ให้และตัวรับอิเล็กตรอนเป็นผลมาจากอะโรมาติก (aromatic) ผสมโครงสร้างคาร์บอน และพันธะ H ที่กระจายอยู่หลังจากที่สารละลายถูกทำให้แห้งเป็นผงอนุภาคของถ่านชีวภาพจะสามารถจับ NH_4^+ ได้โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้ยังมีตำแหน่งที่สามารถจับไอออนได้หลายจุดทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์กับแคตไอออนในรูปแบบต่างๆ กลไกสำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ ปฏิกิริยากรด-เบสที่เกิดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ เช่น COOH, C-OH, CO และ CN โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถเกิดการคายโปรตอน (deprotonation) เช่น หมู่ OH หรือ COOH ทำให้พื้นผิวมีประจุลบ และเพิ่มความสามารถในการจับแคตไอออน นอกจากนี้ยังมีการปฏิสัมพันธ์กับไอออนต่างๆบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพของกลุ่มที่มี O (Lee et al., 2017) ดังนั้นการเขย่าในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ก็เพียงพอต่อการดูดซับของถ่านแกลบ และถ่านไม้ไผ่ ส่วนถ่านใบลิ้นจี่ประสิทธิภาพการดูดซับยังสามารถดูดซับไนโตรเจนได้สูงอยู่ถึงระยะเวลา 2 ชั่วโมง

ประสิทธิภาพการดูดซับ และการปลดปล่อยของถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และสภาพแวดล้อมของการเผา เนื่องจากโครงสร้างภายในเซลล์ของพืชแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิที่ทำการเผามีผลต่อขนาด และปริมาณของรูพรุนของถ่านชีวภาพ จากงานทดลองจะเห็นได้ว่า ถ่านแกลบมีประสิทธิภาพการดูดซับได้รวดเร็ว และสูงกว่าถ่านใบลิ้นจี่และถ่านไม้ไผ่ แต่ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาช้ากว่า ถ่านแกลบอาจมีการดูดยึดไนโตรเจนไว้อย่างไม่เสถียร และไม่สามารถปล่อยคืนได้ง่ายสอดคล้องกับ Lehmann and Joseph (2015) ชี้ว่าถ่านชีวภาพจากวัสดุที่มีซิลิกาสูง เช่น แกลบ มีโครงสร้างที่แข็งและไม่เอื้อต่อการกักเก็บธาตุอาหารในระยะยาว อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติของการใช้พัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าถ่านแกลบจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากกว่าถ่านใบลิ้นจี่และถ่านไม้ไผ่ **(Figure 2 และ 3)** เนื่องจากมีความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยได้ดีกว่าถ่านใบลิ้นจี่และถ่านไม้ไผ่ Cai et al. (2016) ได้ทำการศึกษาถ่านชีวภาพที่เผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 200 – 500 องศาเซลเซียส ในการดูดซับแอมโมเนียซัลเฟต พบว่า ถ่านชีวภาพที่เผาด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับ NH_4^+ ได้มากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 21 วัน เนื่องจากถ่านชีวภาพมีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน เช่น กลุ่มคาร์บอกซิล และกลุ่มคีโต เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ใช้ถ่านชีวภาพที่บดละเอียดซึ่งมีขนาดเล็กอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการใช้ถ่านชีวภาพที่มีขนาดใหญ่ รวมถึงการเขย่าสารละลายปุ๋ยกับเม็ดถ่านทำให้เพิ่มอัตราการปลดปล่อยเร็วขึ้น ซึ่ง He et al. (2022) ได้รายงานว่า การลดขนาดของถ่านชีวภาพทำให้

ความจุและประสิทธิภาพในการดูดซับและการปลดปล่อยเกิดขึ้นได้ทันที 24 ชั่วโมง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถ่านชีวภาพขนาดใหญ่มีความเหมาะสมมากกว่าในการพัฒนาปุ๋ยละลายช้าได้ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณไนโตรเจนถ่านใบลิ้นจี่ก่อนการทดลองมีค่าสูงไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ควบคุมความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของถ่านชีวภาพ แต่มีบทบาทสำคัญต่อการปลดปล่อยไนโตรเจนสูงที่สุดในทุกช่วงเวลา สะท้อนให้เห็นว่าไนโตรเจนในโครงสร้างของถ่านชีวภาพทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมและปลดปล่อยธาตุอาหารทั้งในรูปของไนโตรเจนอินทรีย์ และแอมโมเนียมที่ถูกยึดไว้ แต่ในขณะที่การดูดซับขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและเคมีของพื้นผิวเป็นหลัก (Clough et al., 2013) แต่จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของถ่านชีวภาพก่อนนำมาทดลองดังนั้นจะเห็นได้ว่า นอกจากชนิดของวัสดุ และอุณหภูมิของการเผาที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านชีวภาพในการดูดซับแล้ว ยังมีหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บริเวณผิวของถ่านชีวภาพ และปริมาณของเถ้าที่เป็นปัจจัยสำคัญถึงประสิทธิภาพของการดูดซับไนโตรเจน (Biederman and Harpole, 2013) ในขณะที่ความสามารถในการปลดปล่อยของถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างถ่านชีวภาพกับแอมโมเนียม และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น pH ของดิน, ความชื้น, อุณหภูมิ และกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน

กลไกการดูดซับ (sorption) ของถ่านชีวภาพจะมีทั้งการดูดซับที่ผิวหน้า (adsorption) และการดูดซึมเข้าไปสู่โครงสร้างภายใน (absorption) ซึ่งการดูดซับไนโตรเจนเกิดขึ้นได้จากการดูดซับทางกายภาพโดยการเติมเต็มของรูพรุนภายในโครงสร้าง (He et al., 2022) ซึ่งปริมาณรูพรุนและผิวสัมผัสขึ้นอยู่กับปริมาณลิกนิก เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสในโครงสร้างของซากพืชด้วย (Li et al., 2014; Zhao et al., 2014) รวมถึงแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของถ่านชีวภาพที่มีประจุกับไอออนของไนโตรเจน (เช่น NH_4^+) (Cai et al., 2016) ปฏิสัมพันธ์แบบ cation-**π** ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุบวกของไนโตรเจนไอออนกับวงแหวนอะโรมาติกของถ่านชีวภาพ (Cai et al., 2016) และการเกิดพันธะเคมีระหว่างไนโตรเจนกับหมู่ฟังก์ชันบริเวณผิวของถ่านชีวภาพ (surface complexation) (Kakaei Lafdani et al., 2021) ด้วย ในขณะที่การปลดปล่อย (release) ของถ่านชีวภาพมีกลไกโดยผ่านกระบวนการคายตัว (desorption) ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างภายในถ่านชีวภาพและภายนอกหรือความสามารถในการควบคุมสมดุล (buffering capacity) ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิด desorption ของไนโตรเจนจากถ่านชีวภาพ (He et al., 2022) นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลของสภาพแวดล้อม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของ pH อุณหภูมิ และความชื้นที่มีผลต่อความแข็งแรงของพันธะระหว่างไนโตรเจนกับถ่านชีวภาพ และส่งผลต่อการ desorption เช่น อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) หากสูงอาจทำให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการกักเก็บไนโตรเจนได้ต่ำลง และเกิด desorption ได้เร็วขึ้น (Cai et al., 2016) นอกจากนี้ความชื้นมีผลต่อ desorption เช่นกัน เนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปแย่งตำแหน่งการจับของไนโตรเจนบนผิวของถ่านชีวภาพ (Masebinu et al., 2019)

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองระดับห้องปฏิบัติการนี้ชี้ให้เห็นว่า พื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ทั้งหมด แต่ต้องพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะรูพรุนและสมบัติทางเคมีของผิวถ่านชีวภาพ ดังนั้น พฤติกรรม sorption-desorption ที่พบจึงสะท้อนสมดุลระหว่าง จำนวนตำแหน่งดูดซับ (surface area) ความสามารถในการเข้าถึงและกักเก็บ (pore structure) และความแรงของการยึดจับ (functional groups) ซึ่งร่วมกันกำหนดประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยไนโตรเจนของถ่านชีวภาพ

สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทั้งด้านสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและการปลดปล่อยไนโตรเจน การเลือกใช้ถ่านชีวภาพควรพิจารณาจากคุณลักษณะเฉพาะของถ่านแต่ละชนิดให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ทางการเกษตร เช่น ถ่านไม้ไผ่เหมาะสำหรับใช้เพื่อดูดซับธาตุอาหารหรือความชื้นในดิน ถ่านใบลิ้นจี่เหมาะสำหรับการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในช่วงเร่งการเจริญเติบโตของพืช ในขณะที่ถ่านแกลบเหมาะสำหรับการดูดซับไนโตรเจนระยะสั้น เช่น หลังการใส่ปุ๋ย ช่วงฝนตกหนักตก และการใช้ปุ๋ยในดินทราย หรือสภาพแวดล้อมที่ต้องการลดการสูญเสียไนโตรเจนอย่างเฉียบพลันก่อนที่ไนโตรเจนจะถูกปลดปล่อยกลับให้พืชได้ใช้ประโยชน์ ดังนั้นการใช้ถ่านแกลบ ถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ในการนำมาทำเป็นพาหะชะลอ

การปลดปล่อยของปุ๋ยยูเรียสามารถช่วยให้มีการดูดซับและปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนได้ อย่างไรก็ตาม ถ่านแกลบเป็นถ่านชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นพาหะในการพัฒนาเป็นปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้า (slow-release nitrogen fertilizer) มากกว่าถ่านใบลิ้นจี่ และถ่านไม้ไผ่ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาถ่านชีวภาพชนิดพิเศษที่ออกแบบให้เหมาะสมกับชนิดพืชหรือระบบการเพาะปลูกที่แตกต่างกันในอนาคต เช่น ถ่านชีวภาพที่ดูดซับไนโตรเจนได้ดีและปลดปล่อยช้าสำหรับใช้ในการเพาะปลูกพืชไร่ซึ่งเป็นพืชที่มีอายุหลายเดือนมีโอกาสในการสูญเสียไนโตรเจนไปจากระบบการปลูกพืชได้มาก หรือถ่านชีวภาพที่ปลดปล่อยไนโตรเจนได้รวดเร็วในผักกินใบซึ่งมีอัตราความต้องการใช้ไนโตรเจนสูงกว่าพืชไร่ การใช้ถ่านชีวภาพช่วยดูดซับและชะลอการปลดปล่อยไนโตรเจนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนของพืชเพิ่มขึ้นและยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตให้แก่เกษตรกรและผู้ประกอบการโดยใช้เตาเผาถ่านแบบง่ายที่ใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในท้องถิ่นได้ การประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมนี้จะช่วยเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุนการใช้ปุ๋ยเคมี และส่งเสริมเกษตรยั่งยืนในระดับไร่นา การศึกษานี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในแปลงทดลองในพืชแต่ละชนิดเพื่อประเมินผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ผลผลิต และความเปลี่ยนแปลงของสมบัติดินในระยะยาว ควบคู่กับการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการนำเทคโนโลยีไปใช้ได้อย่างยั่งยืนในภาคการเกษตร

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากแผนงานวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม พ.ศ. 2568 ขอขอบคุณสาขาวิชาพืชศาสตร์ คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม ในการอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. แหล่งข้อมูล: https://www.ldd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-03.pdf. ค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2566.

กิตจเมธ แจ้งศิริกุล, ศุฤภาญจน์ ล้วนมณี, รมิดา ขันตรีกรม, ณัฐพงศ์ ศรีสมบัติ, แวดตา พลกุล และอนันต์ ทองภู. 2558. ศึกษาประเมินการสูญเสียของไนโตรเจนชนิดต่างๆ โดยการระเหิดจากดินโดยการบ่มดินในห้องปฏิบัติการ. แหล่งข้อมูล: http://www.doa.go.th/plan/wp-content/uploads/2021/04/2311.1ศึกษาการประเมินการสูญหายของปุ๋ยไนโตรเจนชนิดต่างๆโดยการระเหิดจากดินโดยการบ่มดิน.pdf. ค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2568.

ศรัณยพงศ์ กรินทร์ไตรทิพย์, คณิต ตังคณานุรักษ์, ฐิติมา รุ่งรัตนาอุบล และวัชรพงษ์ วาระรัมย์. 2565. การดูดซับและการปลดปล่อยแอมโมเนียมและออร์โธฟอสเฟตด้วยฟางข้าวและแกลบข้าวเพื่อใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา). 22: 133-144.

Azeem, B., K. KuShaari, Z. B. Man, A. Basit, and T. H. Thanh. 2014. Review on materials and methods to produce controlled release coated urea fertilizer. Journal of Controlled Release. 181: 11–21.

Bakshi, S., C. Bakshi, D. A. Laird, R. Smith, and R. C. Brown. 2021. Enhancing biochar as scaffolding for slow release of nitrogen fertilizer. ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 9: 8222-8231.

Batista, E. M. C. C., J. Shultz, T. T. S. Matos, M. R. Fornari, T. M. Ferreira, B. Szpoganicz, R. A. de Freitas, and A. S. Mangrich. 2018. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. Scientific Reports. 8: 1-9.

Biederman, L. A., and W. S. Harpole. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. GCB Bioenergy. 5: 202–214.

Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. Soil Science Society of America Journal. 81: 687-711.

Cai, Y., H. Qi, Y. Liu, and X. He. 2016. Sorption/desorption behavior and mechanism of NH4+ by biochar as a nitrogen fertilizer sustained-release material. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 64: 4958-4964.

Clough, T. J., L. M. Condron, C. Kammann, and C. Müller. 2013. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. Agronomy. 3: 275–293.

Cidreira, A. C. M., L. Wei, A. Aldekhail, and R. I. Rubel. 2024. Controlled-release nitrogen fertilizers: A review on bio-based and smart coating materials. Journal of Applied Polymer Science. 142: 3-20.

Dey, D., and M. S. Mavi. 2021. Biochar and urea co-application regulates nitrogen availability in soil. Environmental Monitoring and Assessment. 193: 326.

FFTC. 2001. Application of Rice Husk Charcoal, No. (4). FFTC Leaflet for Agriculture, Taipei.

Havlin, J. L., S. L. Tisdale, W. L. Nelson, and J. D. Beaton. 2014. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 8th Edition. Pearson, CA.

He, Z., H. Cao, J. Liang, Q. Hu, Y. Zhang, X. Nan, and Z. Li. 2022. Effects of biochar particle size on sorption and desorption behavior of NH4+-N. Industrial Crops and Products. 189: 115837.

He, X., Y. Zhang, M. Shen, Y. Zong, and D. Zhang. 2023. Biochar effects on nitrogen retention and release dynamics in soil: A review. Agronomy. 13: 2440.

Hofman, G., and O. V. Cleemput. 2004. Soil and Plant Nitrogen. International Fertilizer Industry Association, Paris.

Inyang, M., B. Gao, P. Pullammanappallil, W. Ding, and A. R. Zimmerman. 2010. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. Bioresource Technology. 101: 8868-8872.

Jia, Y., Z. Hu, Y. Ba, and W. Qi. 2021. Application of biochar-coated urea controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 8: 1-11.

Kakaei, L. E., A. Laurén, J. Cvetkovin, J. Pumpanen, T. Saarela, and M. Palviainnen. 2021. Nitrogen recovery from clear-cut forest runoff using biochar: adsorption-desorption dynamics affected by water nitrogen concentration. Water, Air, and Soil Pollution. 232: 432.

Klimczyk, M., A. Siczek, and L. Schimmelpfenning. 2021. Improving the efficiency of urea-based fertilization leading to reduction in ammonia emissions. Science of The Total Environment. 771: 145483.

Laird, D. A., P. Fleming, D. Davis, R. Horton, B. Wang, and D. L. Karlen. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. Geoderma. 158: 443–449.

Lee, J., K. H. Kim, and E. E. Kwon. 2017. Biochar as a catalyst. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 77: 70–79.

Lehmann, J., and S. Joseph. 2015. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd Edition. Routledge, London.

Leng, L., Q. Xiong, L. Yang, H. Li, Y. Zhou, W. Zhang, S. Jiang, H. Li, and H. Huang. 2021. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. Science of The Total Environment. 763: 144204.

Li, J., Y. Li, Y. Wu, and M. Zheng. 2014. A comparison of biochars from lignin, cellulose and wood as the sorbent to an aromatic pollutant. Journal of Hazardous Materials. 280C: 450-457.

Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, and J. Kinyangi. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Science Society of America Journal. 70: 1719–1730.

Liu, Z., F. S. Zhang, and J. Wu. 2016. Effects of biochar on nitrogen transformation and loss in a Chinese paddy soil. Soil Use and Management. 33: 449-456.

Manikandan, A., and K. S. Subramanian. 2013. Urea intercalated biochar: A slow release fertilizer. Carbon Science and Technology. 5: 1–8.

Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, San Diego.

Masebinu, M. O., E. T. Akinlabi, E. Muzenda, and A. O. Aboyade. 2019. A review of biochar properties and their roles in mitigating challenges with anaerobic digestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 103: 291-307.

Shaviv, A., and R. L. Mikkelsen. 1993. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation–A review. Fertilizer Research. 35: 1–12.

Yao, Y., B. Gao, M. Zhang, M. Inyang, and A. R. Zimmerman. 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. Chemosphere. 83: 1192-1197.

Zhang, A., Y. Liu, G. Pan, Q. Hussain, L. Li, J. Zheng, and X. Zhang. 2013. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil fertilized with urea and straw in a Chinese agricultural soil. Soil Use and Management. 28: 514–518.

Zhang, R., Z. Qu, W. Yang, J. Li, L. Wang, Q. Liu, D. Zhang, T. Qiao, and Y. Zhao. 2024. Evaluating annual soil carbon emissions under biochar-added farmland subjecting from freeze–thaw cycle. Journal of Environmental Management. 365: 121506.

Zhao, L., X. Cao, O. Mašek, and A. R. Zimmerman. 2013. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. Journal of Hazardous Materials. 256-257: 1-9.

Zhao, L., X. Cao, W. Zheng, and Y. Kan. 2014. Phosphorus-assisted biomass thermal conversion: reducing carbon loss and improving biochar stability. PLOS ONE. 9: e115373.

Zhao, L., X. Cao, W. Zheng, J. W. Scott, B. K. Sharma, and X. Chen. 2022. Biochar-based slow-release nitrogen fertilizers: A review. Environmental Chemistry Letters. 20: 131-151.