

### บทคัดย่อ

การใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดินเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติของดิน รวมทั้งเป็นการกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน เนื่องจากคาร์บอนในถ่านชีวภาพที่ผลิตจากการเผาที่อุณหภูมิสูง (pyrolysis) และไม่มีออกซิเจนจะถูกเปลี่ยนโครงสร้างทำให้มีความต้านทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ และทางเคมีเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนอินทรีย์ทั่วไป นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังมีพื้นที่ผิว และความพรุน, ค่า CEC และ pH สูง อย่างไรก็ตาม ปริมาณคาร์บอน และธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพจะแตกต่างกันตามชนิดของถ่านชีวภาพซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุดิบที่ใช้ และสภาพแวดล้อมของการเผา (pyrolysis) โดยทั่วไปความเข้มข้นของคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพลดลง เมื่อใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดินจะช่วยเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืชรวมทั้งช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของดินด้วย โดยลดความหนาแน่นรวมของดิน และเพิ่มความจุในการอุ้มน้ำ ทำให้ค่า CEC เพิ่มขึ้น ถ่านชีวภาพจะไปกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินโดยเป็นแหล่งอาหาร และปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม การใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละชนิดพืช เนื่องจากประเทศไทยมีวิถีชีวิตที่อยู่กับการผลิต และใช้ถ่านชีวภาพในการประกอบอาหาร อย่างไรก็ตาม หากเข้าใจสมบัติ และวิธีการใช้ที่ถูกต้องจะทำให้สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตพืช และที่สำคัญช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย

**คำสำคัญ :** ถ่านชีวภาพ การกักเก็บคาร์บอน ความอุดมสมบูรณ์ของดิน

### Abstract

Biochar application is alternative technology to improve soil properties and carbon sequestration in the soil. Due to its structure, biochar carbon produce under high temperature and absence oxygen and which modified chemical structure, hence make it more resistant to biological and chemical decomposition when compared with other organic matter applications. Therefore, biochars are characterised by high surface area and porosity, CEC and pH. However, carbon and nutrient of different biochars is variable and is dependent on both feedstock used and pyrolysis conditions. Generally, carbon concentration increase with higher temperatures, with a coinciding in biochar yield. Biochar applications may increase plant nutrients and improved soil physical and biological properties by reduce soil bulk density and increase water holding capacity and CEC value. Biochar addition to soil can stimulate microorganism activity by supplying a primary source of nutrients and improve microbes favorable environment in soil. Application of biochar combined with chemical or organic fertilizer such as manure can increase crop growth. Thai traditional ways of life in Thailand have produce and use biochar for cooking. However, the understanding for biochar properties and use the right method may contribute to reduced cost of crop production and greenhouse gases emission.

<sup>1</sup> สาขาพืชศาสตร์ คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม นครพนม 48000

Keywords: Biochar, Carbon sequestration, Soil fertility

## คำนำ

การทำเกษตรในอดีตกษัตริย์มุ่งเน้นการเพิ่มผลผลิตให้ได้ตามความต้องการของตลาดโดยการใส่ปุ๋ยเคมีโดยไม่ได้นำดินถึงผลกระทบในระยะยาวต่อสมบัติทางกายภาพของดิน และสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันภาครัฐได้ส่งเสริมการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ และเศษซากพืชที่เหลือหลังจากเก็บเกี่ยวไกลบเพื่อเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน ธาตุอาหาร และปรับปรุงโครงสร้างของดินให้มีความเหมาะสมในการเพาะปลูกพืช อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยอินทรีย์ และซากพืชต่างๆ ที่ไกลบลงในดินจะเกิดการย่อยสลาย (Decomposition) อย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากปัจจัยทางด้านสภาพภูมิอากาศที่ร้อนชื้นของประเทศไทย และกิจกรรมทางการเกษตร การย่อยสลายของปุ๋ยอินทรีย์ และซากพืชจะปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกมาทำให้ประเทศไทยถูกโจมตีจากต่างประเทศว่าเป็นแหล่งของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก และนำมาซึ่งการกีดกันทางการค้า ดังนั้น การคิดค้นเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และความอุดมสมบูรณ์ของดิน รวมทั้งช่วยชะลอการปลดปล่อย CO<sub>2</sub> ไปสู่บรรยากาศให้นานที่สุดจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในปัจจุบันนี้ ถ่านชีวภาพ (Biochar) คือ วัสดุอินทรีย์ที่ถูกเผาในสภาพที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำหรือไม่มีออกซิเจน ด้วยอุณหภูมิสูง 300-600 °C ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) (Bruun, 2011) ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีวิถีชีวิตผูกพันกับการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อการหุงต้ม แต่ถูกนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินน้อยมาก ยกเว้น การใช้ใช้ถ่านชีวภาพที่มีการนำไปใช้ใส่ดินเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน อย่างไรก็ตาม มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากให้ความสนใจในการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน (soil amendment) (Glasser et al., 2002; Topolanz et al., 2007; Masullii et al., 2010) เนื่องจาก ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินช่วยปรับปรุงสมบัติของดิน (Lehman et al., 2003; Liang et al., 2006; Chan et al., 2007) อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพ (biochar) ซึ่งก็คือ อินทรีย์วัตถุที่ถูกเผาเป็นถ่านแล้ว เช่นเดียวกับ ถ่าน (charcoal) แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ ถ่านส่วนมากมีวัตถุประสงค์ผลิตเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน และใช้ในการหุงต้มเป็นส่วนใหญ่ แต่ขณะที่ถ่านชีวภาพจะใช้สำหรับใส่ลงไปในดินส่วนองค์ประกอบต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกัน (Verheijen et al., 2010)

## 1. คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพสามารถผลิตจากซากพืชแทบทุกชนิด โดยทั่วไปมีสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีที่แตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ และสภาพแวดล้อมของการเผาซึ่งมีผลต่อการกักเก็บคาร์บอน และการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินดังต่อไปนี้

### 1.1 ความพรุน และพื้นที่ผิว

โครงสร้างของถ่านชีวภาพมีผลต่อสมบัติของถ่านชีวภาพ เช่น ความพรุน และพื้นที่ผิวซึ่งเป็นสมบัติบางประการของถ่านชีวภาพที่มีบทบาทสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเผาถ่านชีวภาพในสภาพที่อุณหภูมิแตกต่างกันจะมีผลทำให้พื้นที่ผิว และความพรุนแตกต่างกันและมีผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ ความจุในการดูดซับ และความสามารถในการหมุนเวียนธาตุอาหาร (Downie et al., 2009) ที่แตกต่างกันด้วย Bagreev et al. (2001) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของความพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเผา กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิว และความพรุนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (Keiluweit et al., 2010) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว และความพรุนของถ่านชีวภาพเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาเพิ่มขึ้นก็มีผลทำให้ปริมาณของคาร์บอนทั้งหมด และ สารที่ระเหยได้ (volatile matter) ลดลงด้วย (Keiluweit et al., 2010) นอกจากนี้ เป็นที่ทราบกันดีถึงอิทธิพลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพื้นที่ผิวของอนุภาคดินต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ โดยดินทรายมีความสามารถในการอุ้มน้ำเล็กน้อย และดินเหนียวมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง การใส่ถ่านชีวภาพลงไปบนดินเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสูงซึ่งน่าจะส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำของดินได้ โดยถ่านชีวภาพมีแนวโน้มในการเพิ่มความจุในการดูดซับน้ำ และอัตราการแทรกซึมของน้ำในดิน บางชนิด นักวิจัยบางคนได้รายงานว่ ถ่านชีวภาพที่เผาในสภาพอุณหภูมิต่ำ (400 °C) มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะมีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำต่ำอาจเหมาะนำมาใช้ในรูปแบบของปุ๋ยไนโตรเจนเนื่องจากถ่านมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจน เช่น  $\text{NH}_4^+$ , ยูเรียหรือแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต และธาตุอาหารพืชอื่นๆ ซึ่งอยู่ในรูปของปุ๋ยที่ปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizer) (Day et al., 2005) ในขณะที่ถ่านชีวภาพซึ่งเผาในสภาพอุณหภูมิสูงมีความสามารถในการดูดซับสูงจึงช่วยดูดซับและลดการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน (Sohi et al., 2010)

### 1.2 ปริมาณคาร์บอน

การผลิตถ่านชีวภาพเพื่อใช้ในการกักเก็บคาร์บอนในดินในระยะยาวนั้น สิ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพ แต่การผลิตถ่านชีวภาพเพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตทางการเกษตร ปริมาณคาร์บอนก็ไม่จำเป็นต้องเน้นมากนัก ประกอบกับปริมาณคาร์บอนจะแตกต่างกันตามชนิดของถ่านชีวภาพซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุดิบที่ใช้ และสภาพแวดล้อมของการเผา (pyrolysis) โดยทั่วไปความเข้มข้นของคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพลดลง (Lehmann et al., 2006; Sohi et al., 2009) Sohi et al. (2009) ได้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 °C เป็น 800 °C ทำให้ผลผลิตของถ่านชีวภาพลดลงจาก 67 เป็น 26 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 56 เป็น 93 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Baldock และ Smernik (2002) ปริมาณผลผลิตถ่านชีวภาพลดลงจาก 97 เป็น 19 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 150 °C เป็น 300 °C คาร์บอนในถ่านชีวภาพมีความเสถียรทั้งด้านทางเคมี และชีวภาพมากกว่าคาร์บอนที่อยู่ในวัตถุดิบเริ่มต้นซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการกักเก็บคาร์บอน และนี่เป็นเหตุผลหนึ่งที่ถ่านชีวภาพเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการใช้เป็นวัสดุทางการเกษตรเพื่อลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ได้เป็นอย่างดี (Lehmann et al. (2006) พบว่า การเปลี่ยนจากมวลชีวภาพไปอยู่ในรูปของถ่านชีวภาพประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนจากมวลชีวภาพจะเหลืออยู่ในถ่านชีวภาพซึ่งหากเปรียบเทียบกับ การเผาซากพืชในสภาพปกติ และการย่อยสลายโดยธรรมชาติจะมีคาร์บอนเหลืออยู่ปริมาณน้อย (น้อยกว่า 10-20% หลังจาก 5 ปี และ 3% หลังจาก 20 ปี ตามลำดับ) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ (Sparkes and Stoutjesdijk, 2011)

### 1.3 ปริมาณธาตุอาหาร

โดยทั่วไปปริมาณธาตุอาหารที่อยู่ในถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุอาหารในวัตถุดิบ ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากปุ๋ยคอกหรือกระดูกจะมีปริมาณธาตุอาหารสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ฟอสฟอรัส (6.1% ฟอสฟอรัส ในถ่านจากมูลสุกร และ 2.2% ฟอสฟอรัส ในถ่านจากมูลไก่) (Tsai et al., 2001; Huang et al., 2011) ถ่านชีวภาพซึ่งผลิตจากวัตถุดิบที่ได้จากพืช เช่น ไม้เนื้อแข็งส่วนใหญ่จะมีปริมาณธาตุอาหารต่ำ (0.04 และ 0.001% ฟอสฟอรัส ในเปลือก และแก่นไม้ยูคาลิปตัส) (FAO, 1985) ในขณะที่วัตถุดิบซึ่งเป็นใบไม้ และของเสียจากกระบวนการแปรรูปอาหารจะมีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่า (0.95% ฟอสฟอรัส ในใบถั่วลิสง) (Yuan, et al., 2011) นอกจากนี้ สภาพแวดล้อมของการเผาก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณ และความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารของถ่านชีวภาพ โดยการเผาในสภาพที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ปริมาณและความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนลดลง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลดลงจาก 3.8% เป็น 1.6% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้เผาจาก 400 °C เป็น 800 °C ตามลำดับ (Bagreev et al., 2001) Lang et al. (2005) รายงานว่า ไนโตรเจนถูกปลดปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเผา และมีปริมาณลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจนที่มีอยู่ก่อนเผา ซึ่งเมื่อนำไถกลบถ่านชีวภาพลงไปดินทำให้ความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในดินลดลง (Bagreev et al., 2001)

#### 1.4 ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน

ความสามารถในการหมุนเวียนธาตุอาหารของถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุแคตไอออน (cations exchange capacity; CEC) (Chan and Xu, 2009) ค่า CEC จึงเป็นตัวชี้วัดสำหรับประเมินความสามารถของดินในการกักเก็บแคตไอออนที่สำคัญ ดังนั้น ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์มักเป็นดินที่มีค่า CEC สูง อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพที่ผลิตภายใต้สภาพอุณหภูมิต่ำมีค่า CEC สูง ในขณะที่ถ่านชีวภาพที่ผลิตที่สภาพอุณหภูมิสูง (> 600 °C) จะมีค่า CEC ต่ำหรือไม่มีเลย (Chan et al., 2007; Lehmann, 2007;) จากการค้นพบนี้ทำให้ทราบว่า ถ่านชีวภาพที่ใช้เป็นสารปรับปรุงดินไม่ควรจะผลิตโดยใช้อุณหภูมิสูง เพราะจะทำให้สมบัติในคุณสมบัติธาตุอาหารของถ่านชีวภาพลดลง ถ่านชีวภาพที่มีค่า CEC สูงมีความสามารถในการดูดซับธาตุโลหะหนัก และสารประกอบอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น สารกำจัดแมลง และวัชพืช (Navia and Crowley, 2010) ดังนั้น การใส่ถ่านชีวภาพลงไปดินที่ทำการเกษตรจึงเป็นผลดีในการช่วยลดการปนเปื้อนของสารเคมีทางการเกษตร

#### 1.5 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ถ่านชีวภาพที่ใช้ในการปรับปรุงดินโดยทั่วไปมักมีคุณสมบัติเป็นด่างซึ่งจะมีผลต่อ pH ของดินเมื่อใส่ลงไปดินปริมาณมากแต่ไม่ใช่ถ่านชีวภาพทั้งหมดที่มี pH เป็นด่าง โดยทั่วไป pH ของถ่านชีวภาพอยู่ระหว่าง 4-12 ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ และสภาพแวดล้อมของการเผา (Bagreev et al., 2001; Lehmann, 2007) โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา ถ่านชีวภาพจะทำให้ค่า pH ของถ่านชีวภาพบางชนิดเพิ่มขึ้น Sohi et al. (2010) ได้รายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 310 เป็น 850 °C ถ่านชีวภาพที่ผลิตจาก bagasse จะมี pH เพิ่มขึ้นจาก 7.6 เป็น 9.7 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะสามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีค่า pH สูงได้แต่อาจจะมีผลต่อ pH ของดินเมื่อใส่ลงไปดินปริมาณไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากดินมีความจุบัฟเฟอร์ (buffering capacity)

## 2. ถ่านชีวภาพกับการกักเก็บคาร์บอนในดิน

การกักเก็บคาร์บอน (carbon sequestration) คือ การกักเก็บคาร์บอนที่อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้มาอยู่ในรูปอื่นที่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยและใช้ระยะเวลานาน อย่างไรก็ตาม ระดับของการกักเก็บคาร์บอนในดินถูกกำหนดโดยชนิดของดิน และวิธีการจัดการดิน ปัจจุบันการจัดการดินมุ่งเน้นการเพิ่มศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนโดยการใส่คาร์บอนลงไปดิน เช่น ปุ๋ยคอก และถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพได้รับการยอมรับอย่างมากในปัจจุบันในแง่ของเป็นตัวกักเก็บคาร์บอน เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความเสถียร, ปริมาณคาร์บอนสูง และมีศักยภาพในการคงทนอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลานาน ดังนั้น สมบัติดังกล่าวทำให้ถ่านชีวภาพปลดปล่อยเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างช้าๆ และใช้เวลานาน ซึ่งแตกต่างจากสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น ซากพืช ปุ๋ยพืชสด ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยคอก มักจะเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในเขตร้อนชื้น ทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราสูง และรวดเร็ว (Steiner, 2007) ดังนั้น การใส่ถ่านชีวภาพลงไปดินจึงสามารถช่วยลดการเกิดสภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ได้ การเปลี่ยนจากมวลชีวภาพคาร์บอน (biomass carbon) เป็นถ่านชีวภาพคาร์บอน (biochar carbon) ซึ่งสามารถกักเก็บคาร์บอนได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนเริ่มต้น (Lehmann et al., 2006) แต่ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ และสภาพแวดล้อมของการเผา ด้วยเหตุนี้ ปริมาณคาร์บอนในดินจึงมีเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่ถ่านชีวภาพลงไปดินโดยเปรียบเทียบกับการใส่ซากพืชหรือมวลชีวภาพอื่นๆ ลงไปในดินโดยตรง ดังแสดงใน Figure 1 ปริมาณคาร์บอนของมวลชีวภาพที่ใส่ลงไปดินโดยตรงเมื่อเวลาผ่านไป 100 ปี จะเหลือปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อรู้ข้อเท็จจริงเกี่ยวกับเอกสารนี้แล้ว กรุณาแจ้งให้เราทราบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอน 0% ในขณะที่การนำเอามวลชีวภาพมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ซึ่งหลังกระบวนการผลิตจะเหลือคาร์บอนอย่างน้อย 50% และเมื่อใส่ลงไปในดินเป็นเวลา 100 ปี เหลือปริมาณคาร์บอนมากกว่า 40% ด้วยเหตุนี้ ถ่านชีวภาพในดินจึงมีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนได้ดีกว่าการใส่มวลชีวภาพที่มีคาร์บอนเท่ากัน (Kwapinsik et al., 2010) หากมีการเปลี่ยนจากระบบทำไร่เลื่อนลอยซึ่งดำเนินการโดยการตัดไม้และเผา (slash and burn system) มาเป็นระบบการตัดไม้แล้วทำถ่านชีวภาพ (slash and char system) จะลดการสูญเสียคาร์บอนได้ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ (Maraseni, 2010) Roberts et al. (2010) ได้รายงานว่ ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเศษหญ้าจะช่วยลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 3 ตัน คาร์บอนไดออกไซด์สมมูลต่อตันของถ่านชีวภาพ

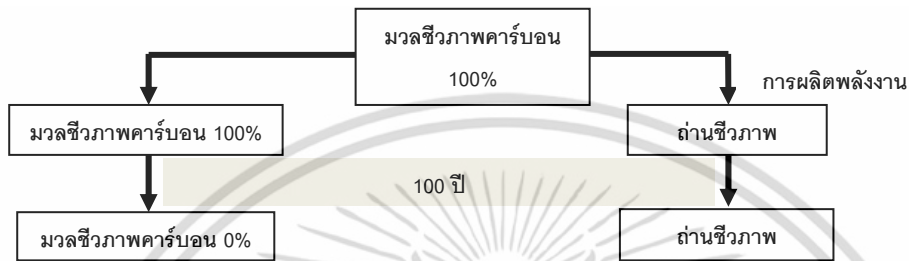


Figure 1 Comparison of traditional biomass and biochar applications to soil on soil carbon retention over 100 years. Source: Lehmann et al. (2006)

### 3. ผลของถ่านชีวภาพต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน

การใส่ถ่านชีวภาพในรูปของสารปรับปรุงดิน เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้เกิดขึ้นที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำหรือเพาะปลูกพืชมานาน โดยจะช่วยเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืชรวมทั้งช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของดิน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้แน่ใจว่าไม่ผลกระทบบางด้านลบต่อคุณภาพของดิน และการให้ผลผลิตของพืชเมื่อใช้ในปริมาณมาก มีนักวิจัยได้รายงานผลของถ่านชีวภาพต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินไว้หลายด้าน ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ความหนาแน่นของดิน และความจุในการอุ้มน้ำ

มีงานวิจัยจำนวนมากได้รายงานว่ การใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำจะทำให้ลดความหนาแน่นของดิน และเพิ่มความจุในการอุ้มน้ำ (Atkinson et al., 2010) โดยการใส่ถ่านชีวภาพจะไปเพิ่มความพรุนของดินเนื่องจากอนุภาคของถ่านชีวภาพมีรูพรุนภายในโครงสร้างอยู่แล้วทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ได้ดี และช่วยเพิ่มช่องว่างให้กับดิน นอกจากนี้จะเพิ่มความพรุนของดินแล้วยังเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของดินด้วย ดังนั้น ดินที่ใส่ถ่านชีวภาพจึงสามารถอุ้มน้ำได้ดีกว่าดินที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ เสวคินส์ (2554) ได้ทำการใส่ถ่านชีวภาพลงในดินที่ปลูกข้าวโพดหวานพบว่า ความชื้นของดินที่ใส่ถ่านชีวภาพ (9-10%) สูงกว่าดินที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ (5-7%) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกันกับงานทดลองของ Bruun (2011) พบว่ การใส่ถ่านชีวภาพที่มีขนาดใหญ่ (เช่น >0.5 mm) จะมีผลทำให้การระบายอากาศของดินเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างขนาดเล็กที่มีออกซิเจนในช่องว่างต่ำซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการต่างๆ ของดิน เช่น อัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ, การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ nitrification-denitrification และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่างๆ อย่างไรก็ตาม หากมีการใส่ถ่านชีวภาพที่มีอนุภาคขนาดเล็กลงไปในดินจะทำให้ไปเติมช่องว่างของดิน และทำให้เพิ่มความหนาแน่นของดินได้ (Brunn, 2011)

#### 3.2 ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุแคตไอออน

การใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดินสามารถเพิ่ม CEC ของดินได้ โดยถ่านชีวภาพที่เผาใหม่ถูกทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำในดินทำให้เกิดปฏิกิริยา oxidation ทำให้เพิ่มประจุลบสุทธิ ค่า CEC จึงเพิ่มขึ้น (Joseph et al., 2009) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนถ่านชีวภาพที่มีอายุมากแล้วจะมีความเข้มข้นของประจุลบสูงจึงกระตุ้นให้เกิดการจับตัวกันของเม็ดดิน (soil aggregation) และเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินต่อพืช (Liang et al., 2006; Major et al., 2010) นอกจากนี้ Inyang et al. (2010) ได้ทำการวัดค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแอนไอออน (anion exchange capacity: AEC) ในถ่านชีวภาพที่ผลิตจาก bagasse ซึ่งพบว่า การใส่ถ่านชีวภาพจะทำให้เพิ่ม CEC และ AEC ของดิน และช่วยปรับปรุงความจุในการจับยึดธาตุอาหารพืชของดินด้วย อย่างไรก็ตาม Granatstein et al. (2009) พบว่า ค่า CEC ไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อมีการใส่ถ่านชีวภาพ ถึงแม้ว่าการใส่ถ่านชีวภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มค่า CEC เมื่อใส่ถ่านชีวภาพลงไปในพื้นที่ที่มีค่า CEC ต่ำ

### 3.3 ความกรด-ด่างของดิน

จากการศึกษาของ Granatstein et al. (2009) เกี่ยวกับผลของ pH ของดินเมื่อใส่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุดิบแตกต่างกัน พบว่า มีความเปลี่ยนแปลงของ pH มาก เมื่อใส่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากพืชสมุนไพร 24.4 ตันต่อไร่ ลงไปในดินทราย (sandy soils) จะทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 7.1 เป็น 8.1 ในขณะที่การใส่ถ่านชีวภาพจากไม้เนื้อแข็งทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุดิบต่างๆ ในอัตราเดียวกันลงไปดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam soils) พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของ pH เพียงเล็กน้อย (Figure 2) ซึ่งน่าจะเกิดจากค่า CEC เริ่มต้นของดินอยู่ในระดับสูง

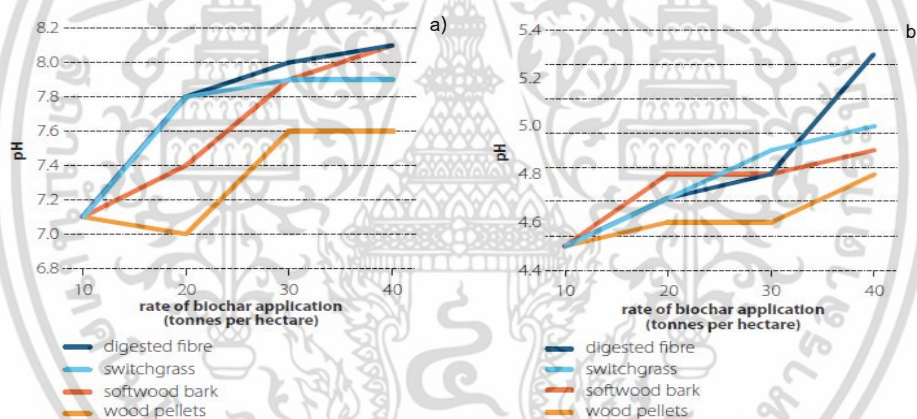


Figure 2 Change in soil pH with increasing biochar application rate to a) sandy soil and b) silt loam soils. Source: Granatstein et al. (2009)

### 3.4 การหมุนเวียนพืชธาตุอาหารในดิน

การละลายธาตุอาหารจากดินที่ทำการเกษตรเป็นผลทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลง จึงทำให้มีความจำเป็นในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์เพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังชักนำให้เกิดกระบวนการ eutrophication ในน้ำใต้ดิน และน้ำผิวดินอีกด้วย (Laird et al., 2010) มีงานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นว่าการใส่ถ่านชีวภาพลงไปในดินช่วยลดการละลายของธาตุอาหารและสารอื่นๆ ได้ (Ding et al., 2010; Glaser et al., 2002; Laird et al., 2010; Novak et al., 2009) จากคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากทำให้สามารถดูดซับธาตุอาหารพืชได้สูง นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการเพิ่มความจุของการอุ้มน้ำในดินซึ่งอาจช่วยในการปรับปรุงการหมุนเวียนธาตุอาหารพืชในดินได้ด้วย อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่ดูดซับธาตุอาหารไว้จะมีการเคลื่อนย้ายลงไปที่ด้านล่างของชั้นดินตามการเคลื่อนที่ของน้ำซึ่งทำให้มีธาตุอาหารไหลออกจากระบบเกษตรได้เช่นกัน (Leifeld et al., 2007; Major et al., 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพการแวดล้อมในการเผาถ่านชีวภาพ และวัตถุดิบในการเผาที่มีผลต่อส่วนประกอบและโครงสร้างของถ่านชีวภาพ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชแตกต่างกัน ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากปุ๋ยคอก และผลิตภัณฑ์จากสัตว์จะมีปริมาณธาตุอาหารสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบที่เป็นไม้เนื้อแข็ง อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปถ่านชีวภาพน่าจะมีความสำคัญอย่างมากในการใช้เป็นสารปรับปรุงดิน และการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุอาหารพืช (De Luca et al., 2009)

### 3.5 กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน

การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินมีผลต่อความอุดมสมบูรณ์ กิจกรรม และความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตในดิน โดยถ่านชีวภาพจะไปกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน (Hammes and Schmidt, 2009) นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังเป็นแหล่งธาตุอาหาร และช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมของดินทั้งด้านกายภาพ และชีวภาพทำให้มีสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน (Krull et al., 2010) จากคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีรูพรุน พื้นที่ผิวสัมผัสสูง จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับอินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารที่สามารถละลายน้ำได้มากจึงทำให้เพิ่มแหล่งอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย, แอคติโนมัยซีต และไมโครไรซา นอกจากนี้ ความสมดุล ความหลากหลาย และกิจกรรมของจุลินทรีย์ยังมีความสัมพันธ์อย่างมากกับ pH ของดิน ถ่านชีวภาพจะช่วยเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ pH ในดินให้กับจุลินทรีย์ เนื่องจาก ถ่านชีวภาพมีค่า CEC สูง อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพซึ่งมีความเสถียร ต้านทานต่อการย่อยสลาย ทำให้ไม่เหมาะกับการเป็นอาหารของจุลินทรีย์ แต่หากใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตใหม่ใส่ลงไปในดินอาจช่วยในการเพิ่มอาหารที่ช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ เนื่องจากในถ่านที่ผลิตใหม่ยังคงมีธาตุอาหารโดยเฉพาะ แคลเซียม และโพแทสเซียม อยู่ปริมาณมาก และอาจมีน้ำมันชีวภาพหรือสารประกอบอินทรีย์ซึ่งจะช่วยในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ได้ (Sparkes and Stoutjesdijk, 2011)

### 3.6 การเจริญเติบโตของพืช

จากสมบัติของถ่านชีวภาพเมื่อใส่ลงไปในดินทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และชีวภาพของดินที่ได้กล่าวมาข้างต้นซึ่งมีผลต่อการเพาะปลูกพืชอย่างมาก Chan et al. (2007) ได้ทำการศึกษาในเรือนทดลองโดยปลูกผักกาดในดินที่ประเทศ Australian พบว่า ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้พุ่ม (pH = 9.4) ที่อัตรา 100 ตันต่อเฮกแตร์ ทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 4.77 เป็น 5.99 แต่ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนทำให้ทั้งค่า pH ของดิน และการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มขึ้นถึง 266% เมื่อเทียบกับไม่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเช่นเดียวกันกับ Van Zwieten et al. (2010) พบว่า ข้าวสาลีมีประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนลงไปในดิน จากงานทดลองนี้จึงชี้ให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพช่วยชักนำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจนของพืช งานวิจัยการใส่ถ่านชีวภาพในสภาพไร่จำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพสามารถเพิ่มผลผลิตพืชหลายๆ ชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก (Blackwell et al., 2009) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทัทไท และคณะ (2554) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของถ่านชีวภาพในอัตราที่แตกต่างกันโดยไถพรวนลงดินก่อนปักดำข้าวนาสวน พบว่า ถ่านชีวภาพ อัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มจำนวนหน่อข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ควรมีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินนา โดยผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของพืชมีความแตกต่างกันในแต่ละชนิดพืช พืชตระกูลถั่วมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นเกือบ 20 เท่า (ผลผลิตเพิ่มขึ้น 1916%) น้ำหนักของหญ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 93% เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ Major et al. (2010) รายงานว่า ผลผลิตข้าวโพดที่ปลูกในดินที่ใส่ถ่านชีวภาพตลอด 4 ปี สูงกว่าดินอื่นๆ ยกเว้นในปีแรกของการใส่ถ่านชีวภาพซึ่งไม่มีผลต่อผลผลิตข้าวโพด นอกจากนี้ การใส่ถ่านชีวภาพในระยะยาวยังเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลดีต่อคุณสมบัติของดิน ช่วยปรับปรุงดินโดยเฉพาะดินที่มีปัญหา เช่น ดินเปรี้ยว Solaiman et al. (2010) ได้รายงานว่าการใส่ถ่านชีวภาพในดินเปรี้ยวซึ่งมีค่า CEC ต่ำ เมื่อใส่ปุ๋ยเคมีที่อัตราครึ่งหนึ่งของอัตราแนะนำร่วมกับการใส่ถ่านชีวภาพมีผลทำให้ผลผลิตของข้าวสาลีเพิ่มขึ้น 18% อย่างไรก็ตาม Hemwong and Cadisch (2012) ได้พบว่า ผลของการใส่ถ่านต่อผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 แตกต่างกันตามชนิดของถ่าน และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในช่วงข้าวตั้งท้องช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวได้ถึง 20%, 42% และ 15% ที่ใส่ถ่านไม้ไผ่, ถ่านยูคาลิปตัส และถ่านแกลบ ตามลำดับ

## สรุป

ถ่านชีวภาพมีสมบัติในการปรับปรุงดิน ได้แก่ ความพรุน และพื้นที่ผิวสัมผัส, ปริมาณคาร์บอน, CEC และ pH สูง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ดินมีสภาพที่เหมาะสมต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช คือ ลดความหนาแน่นของดิน และเพิ่มความจุในการอุ้มน้ำ, เพิ่มค่า CEC และ pH ในดิน, เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน และเพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ย โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน ทำให้พืชมีการเจริญเติบโต และผลผลิตดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินควรใส่ร่วมกับปุ๋ยโดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน หากต้องการเพิ่มการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช แต่หากต้องการใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติของดินอย่างเดียวก็ไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยเคมี นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการกักเก็บคาร์บอนได้ปริมาณมากกว่าการใส่สารอินทรีย์อื่นๆ สมบัติของถ่านชีวภาพมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และสภาพแวดล้อมของการเผา เช่น อุณหภูมิที่เผา และวิธีการเผา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใส่ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดิน และเพิ่มการเจริญเติบโต และผลผลิตของพืชนั้นมีทางเป็นไปได้สูง เนื่องจากประเทศไทยมีวิถีชีวิตที่อยู่กับการผลิต และใช้ถ่านชีวภาพในการประกอบอาหาร หากแต่ให้เข้าใจสมบัติ และวิธีการใช้ที่ถูกต้องจะทำให้สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตพืช และที่สำคัญช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย นอกจากนี้ การผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้วัตถุดิบที่มีอยู่ในท้องถิ่นจะทำให้สามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในท้องถิ่นเกิดประโยชน์สูงสุด และจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

## เอกสารอ้างอิง

- ทัพไท หน่อสุวรรณ, อรรถชัย จินตะเวช และสิทธิชัย ลอดแก้ว. 2554. ความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอชาร์เพื่อเพิ่มผลผลิตในระบบการผลิตข้าวนาสวน. หน้า 397-407 ใน รายงาน การประชุมวิชาการระบบเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 7 “ระบบเกษตรไทยได้ร่วมพระบารมี เพื่อความมั่นคงทางอาหารและพลังงาน”. คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม.
- เสาวคนธ์ เหมวงษ์ และ ศศิธร เชื้อกุดนะ. 2554. การใช้ถ่านชีวภาพปรับปรุงดินเพื่อปลูกข้าวโพดข้าวเหนียวหวาน. วารสารเกษตร 27(3): 259-266.
- Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald and N.A. Higgs. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil* 337(1): 1-18.
- Baldock, J.A. and R.J. Smernik. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Chemistry* 33: 1093-1109.
- Bagreev, A., T.J. Bandosz and D.C. Locke. 2001. Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. *Carbon* 39: 1971-1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Blackwell, P., G. Riethmuller and M. Collins. 2009. Biochar application to soil. pp. 207-226. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, United Kingdom.
- Bruun, E.W. 2011. Application of fast pyrolysis biochar to a loamy soil- Effects on carbon and nitrogen and potential for carbon sequestration. Ph.D Thesis at the National Laboratory of Renewable Energy, Technical University of Denmark (RisØ-DTU). 211 pp.
- Chan, K.Y. and Z. Xu. 2009. Biochar: nutrient properties and their enhancement. pp. 67-84. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, United Kingdom.
- Chan, K.Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie and S. Joseph. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45: 629-634.
- Day, D., R.J. Evans, J.W. Lee and D. Reicosky. 2005. Economical CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> capture from fossil-fuel utilization with combined renewable hydrogen production and large-scale carbon sequestration. *Energy* 30(14): 2558–2579.
- De Luca, T.H., M.D. MacKenzie, and M.J. Gundale. 2009. Biochar effects on soil nutrient transformations. pp. 251-270. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for environmental management: Science and Technology*. Earthscan, United Kingdom.
- Ding Y., X.Y. Liu, W.X. Wu, D.Z. Shi, M. Yang and Z.K. Zhong. 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water Air and Soil Pollution* 213:47-55.
- Downie, A., A. Crosky and P. Munroe. 2009. Physical properties of biochar. pp. 13-32. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, United Kingdom.
- FAO. 1985. Industrial charcoal marking. (online). Available: <http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e00.htm>.
- Glaser, B., J. Lehmann and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils* 35: 219-230.
- Granatstein, D., C.E. Kruger, H. Collins, S. Galinato, M. Garcia-Perez and J. Yoder. 2009. Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment: final project report. Washington State University, Wenatchee.
- Hammes, K. and W.I. Schmidt. 2009. Changes of biochar in soil. pp. 169-182. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, United Kingdom.
- Hemwong, S. and G. Cadisch. 2012. Effects of biochar amendment on soil fertility and lowland rice yield in Nakhon Phanom Province, Northeast, Thailand. *Nakhon Phanom University Journal*: (in press).
- Huang, Y., H. Dong, B. Shang, H. Xin and Z. Zhu. 2011. Characterization of animal manure and cornstalk ashes as affected by incineration temperature. *Applied Energy* 88: 947-952.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Inyang, M., B. Gao, P. Pullammanappallil, W.C. Ding and A.R. Zimmerman. 2010. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology* 101(22): 8868–8872.
- Joseph, S., C. Peacocke, J. Lehmann and P. Munroe. 2009. Developing a biochar classification and test methods. pp. 107-126. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, United Kingdom.
- Keiluweit, M., P.S. Nico, M.G. Johnson, and M. Kleber. 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science and Technology* 44(4): 1247–1253.
- Krull, E., B. Singh and S. Joseph. 2010. Preface to special issue: proceedings from the First Asia-Pacific Biochar Conference 2009, Gold Coast, Australia. *Australian Journal of Soil Research* 48(6–7): 1-4.
- Kwapinski, W., C.M.P. Byrne, E. Kryachko, P. Wolfram, C. Adley, J.J. Leahy, E.H. Novotny and M.H.B Hayes. 2010. Biochar from biomass and waste. *Waste Biomass Valor* 1: 177–189.
- Laird, A.R., J.L. Robinson, K.M. McMillan, D. Tordesillas-Gutiérrez, S.T. Moran and S.M. Gonzales. 2010. Comparison of the disparity between Talairach and MNI coordinates in functional neuroimaging data: Validation of the Lancaster transform. *Neuroimage* 51, 677–683.
- Lang, T. A.D. Jensen and P.A. Jensen. 2005. Retention of organic elements during solid fuel pyrolysis with emphasis on the peculiar behavior of nitrogen. *Energy and Fuels* 19: 1631-1643.
- Lehmann, J. 2007. A handful of carbon. *Nature* 447: 143–144.
- Lehmann, J., J. da Silva, C. Steiner, T. Nehls, W. Zech and B. Glaser. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249: 343-357.
- Lehmann, J., J. Gaunt and M. Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 403–427.
- Leifeld, J., S. Fenner and M. Müller. 2007. Mobility of black carbon in drained peatland soils. *Biogeosciences* 4: 425-432.
- Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman and B. O'Neill. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70(5): 1719-1730.
- Major, J., J. Lehmann, M. Rondon and C. Goodale. 2010. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology* 16(4): 1366–1379.
- Maraseni, T.N. 2010. Biochar: maximising the benefits. *International Journal of Environmental Studies* 67(3): 319–327.
- Masulili, A., W.H. Utomo and M.S. Syechfani. 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science* 2(1): 39-47.
- Navia, R. and D.E. Crowley. 2010. Closing the loop on organic waste management: biochar for agricultural land application and climate change mitigation. *Waste Management and Research* 28(6): 479–80.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Novak, J.M., W.J. Busscher, D.L. Laird, M. Ahmedna, D.W. Watts and M.A.S. Niandou. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science* 174: 105–112.
- Roberts, K.G., B.A. Gloy, S. Joseph, N.R. Scott and J. Lehmann. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology* 44: 827–833.
- Sohi, S.P., E. Krull, E. Lopez-Capel and R. Bol. 2010. Chapter 2—A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105: 47–82.
- Sohi, S., E. Lopez-Capel, E. Krull and R. Bol. 2009. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. (online). available: <http://www.clw.csiro.au/publications/consultancy/>.
- Solaiman, Z.M., P. Blackwell, L.K. Abbott and P. Storer. 2010. Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonization, growth and nutrition of wheat. *Australian Journal of Soil Research* 48: 546-554.
- Sparkes J. and P. Stoutjesdijk. 2011. Biochar: implications for agricultural productivity. Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia.
- Steiner, C. 2007. Slash and char as alternative to slash and burn- Soil charcoal amendment maintain soil fertility and establish a carbon sink. University of Bayreuth, Germany.
- Tsai, W.-T., S.-C. Liu, H.-R. Chen, Y.-M. Chang and Y.-L. Tsai. 2012. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment. *Chemosphere* 89: 198-203.
- Topoliantz, S., J.F. Ponge and S. Ballof. 2007. Manioc peel and charcoal: a potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics. *Biology and Fertility of Soils* 41: 15–21.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, A. Downie, S. Morris, S. Petty, J. Rust and K.Y. Chan. 2010. A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil. *Australian Journal of Soil Research* 48(6-7): 569–576.
- Verheijen, F., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde and I. Diafas. 2010. Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Scientific and Technical Reports. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Italy.
- Yuan, J.H., R.-K. Xu and H. Zhang. 2011. The form of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology* 102: 3488-3497.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้