

ความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอชาร์เพื่อเพิ่มผลผลิตในระบบการผลิตข้าวนาสวน

Feasibility of bio-char production for yield increment of lowland rice system

ทัฟไท นนุสุวรรณ^{1*}, อรรถชัย จินตะเวช², สิทธิชัย ลอดแก้ว³

Tupthai Norsuwan^{1*}, Atthachai Jintrawet², Sittichai Lordkaew³

Received: 28 February 2012 ;Accepted: 12 May 2012

บทคัดย่อ

ไบโอชาร์ (bio-char) คือ อินทรีย์วัตถุที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสทำให้ได้อินทรีย์วัตถุที่มีรูพรุน มีคุณสมบัติในการดูดซับธาตุอาหารพืชและยังช่วยลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนจากนาสวน การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของการใส่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือของการผลิตน้ำหมักชีวภาพ 4 อัตรา ประกอบด้วย 0 640 1,280 และ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ โดยพรวนลงดินก่อนการปักดำข้าว พบว่าการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มจำนวนหน่อข้าวอย่างมีนัยสำคัญเป็นผลให้มีจำนวนรวงข้าวมากกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการใส่ไบโอชาร์ทุกอัตราไม่ทำให้น้ำหนักเมล็ดตอกและน้ำหนักเมล็ดเต็มตอกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งพบว่าน้ำหนักเมล็ด 1000 เมล็ดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดเต็มของกรรมวิธีที่ใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 2,560 กิโลกรัม มีค่าน้อยที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างกับการไม่ใส่ไบโอชาร์ ในระยะข้าวสร้างน้านมพบว่าการใส่ไบโอชาร์ไม่ทำให้ SPAD-value ที่ใบธงของหน่อหลักไม่มีความแตกต่างกัน แต่การใส่ไบโอชาร์ที่อัตรา 1,280 และ 2,560 กิโลกรัม ทำให้ดินนาสามารถรักษาแอมโมเนียมไอออนได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ทำการศึกษากาการผลิตไบโอชาร์โดยใช้เตาเผาซึ่งดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร พบว่าการเผาเศษไม้ สัก มะม่วง และขนุน ที่ระยะเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ใช้เศษไม้หนัก 50.5 ± 5.2 และ 44.4 ± 10.4 กิโลกรัม สามารถผลิตไบโอชาร์ได้ 10.3 ± 2.8 และ 4.8 ± 1.3 กิโลกรัมตามลำดับ นำผลการทดลองที่ได้ไปจำลองสถานการณ์ให้การตอบสนองของผลผลิตข้าวจากการใส่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษไม้ สัก มะม่วง และขนุน เหมือนกับการใส่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือจากการผลิตน้ำหมักชีวภาพ เพื่อประเมินต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ พบว่าการผลิตไบโอชาร์เพื่อปรับปรุงดินนา 1ไร่ ของปีแรก ใน 4 อัตรา ข้างต้นมีต้นทุนในการผลิตไบโอชาร์ต่ำที่สุด 0 6300.0 8812.5 และ 1,2412.5 บาทต่อไร่ ได้ผลตอบแทน 7024.72 1594.59 -1544.48 และ -4,741.75 บาทต่อไร่ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ข้าวนาสวน ไบโอชาร์ แอมโมเนียมไอออน ผลผลิต

Abstract

Bio-char is an organic material that is processed through the pyrolysis procedure generating highly porous organic material; leading to, becoming a plant nutrients absorption and a reducing carbon dioxide and methane emission from lowland rice field. This study conducted an experiment to compare the effects of bio-char, produced from the waste of enzyme ionic plasma production, at 4 rates consisting of 0, 640, 1,280 and 2,560 kg per rai by mixing bio-char into paddy soil before rice transplantation. The results showed that 2,560 kg per rai of bio-char application significantly increased tiller number, consequently, the panicle number increased more than that without bio-char application. However, both grain weight and filled grain weight did not differ significantly in all cases. During milling stage, the SPAD-value at flag leaf of main tiller was not different at all cases; but, the ammonium ion was maintainable in the

¹ นักวิทยาศาสตร์เกษตร, ²อาจารย์, ³นักวิชาการเกษตร, ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

¹ Agricultural scientist, ²Lecturer, ³Researcher, Multiple Cropping Center, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

* Corresponding author: Tupthai Norsuwan, Multiple Cropping Center, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand. E-mail: tupthai.n@cmu.ac.th

application of 1,280 and 2,560 kg bio-char per rai significantly more than the other rates. This study also a conducted bio-char production experiment by adapting 200 liter barrels to be furnaces. The result showed that burning mixed wood chips of teak mango and jackfruit for 2 and 3 hours by using 50.5 ± 5.2 and 44.4 ± 10.4 kg wood chip; produced 10.3 ± 2.8 and 4.8 ± 1.3 kg bio-char respectively. The result of the simulated conditions displayed that bio-char production for enhanced 1 rai of paddy soil following 4 rates above at the first year; therefore, the bio-char production cost were 0, 6,300.0, 8812.5 and 1,2412.5 baht per rai and it gained benefit as 7024.72, 1,594.59, -1,544.48 and -4,741.75 baht per rai respectively.

Keywords: Lowland rice, Bio-char, Ammonium ion, Yield

บทนำ

ข้าวนาสวน คือข้าวที่ปลูกในนาที่มีการกักเก็บน้ำในระดับน้ำลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตร มีปลูกทุกภาคของประเทศไทยซึ่งคิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การผลิตข้าวทั้งหมด 61 ล้านไร่ ซึ่งความอุดมสมบูรณ์ของพื้นที่การผลิตข้าวดังกล่าวเกี่ยวข้องกับอินทรีย์วัตถุที่มีการการย่อยสลายและปลดปล่อยออกไปสู่บรรยากาศในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ทั้งระหว่างขั้นตอนการเตรียมดินก่อนปลูกข้าวและในฤดูปลูก

แนวความคิดหนึ่งที่ได้รับการพิจารณาในวงกว้าง เพื่อช่วยลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน คือการกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน โดยเฉพาะในรูปของไบโอชาร์ (bio-char) หรือ อินทรีย์วัตถุที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการสลายมวลสารด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศในช่วงอุณหภูมิสูง วิธีการหนึ่งคือการให้ความร้อนในอัตราน้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส เรียกว่า slow pyrolysis จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันดินและถ่านไม้ (charcoal) จากการประเมินในรายงานของ Lehmann, Gaunt & Rondon (2006)¹ พบว่าการนำอินทรีย์วัตถุมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้สูญเสียคาร์บอนไปในกระบวนการดังกล่าว 50 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำไปใส่ลงในดินจะสามารถกักเก็บคาร์บอนให้อยู่ในดินได้มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ หลังจากผ่านไป 100 ปี ในขณะที่อินทรีย์วัตถุที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะย่อยสลายและปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาทั้งหมด

จากกระบวนการไพโรไลซิสดังกล่าวทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์ซึ่งเป็นผลึกคาร์บอนที่มีรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคดินเหนียว (>1,500 ตารางเมตรต่อกรัม) ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้ไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลทั้งที่เป็นประจุบวกและ

ประจุลบของสารอาหารของพืช และโมเลกุลของน้ำ² ไบโอชาร์สามารถปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินโดยทำให้ pH ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity) และ การนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของดินเพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการระบายน้ำของดินเป็นผลให้ปริมาณสารอาหารที่พืชสามารถเอาไปใช้ได้เพิ่มขึ้นจากทั้งสารอาหารที่มีในไบโอชาร์ที่ปลดปล่อยอย่างช้าๆและสารอาหารที่ถูกกักเก็บไว้เนื่องจากคุณสมบัติของไบโอชาร์^{3,4} นอกจากนี้ไบโอชาร์ยังสามารถช่วยลดการชะล้างไนโตรเจนจากผิวดินโดยการดูดซับแอมโมเนียมไอออนไว้⁵⁻⁷ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดใช้ในไนโตรเจนของข้าวสาลีสูงขึ้น⁸ น้ำหนักเมล็ดของข้าวไร่สูงขึ้นเมื่อมีการใช้ไบโอชาร์ในอัตรา 8 ตันต่อเฮกตาร์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไบโอชาร์ในอัตราที่สูงขึ้นทำให้น้ำหนักเมล็ดลดลงเนื่องจากเกิดการจำกัดการดูดใช้ในไนโตรเจนของข้าว⁹ ในข้าวนาสวนพบว่าการใช้ไบโอชาร์ที่ผลิตจากแกลบในอัตรา 1,600 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้จำนวนหน่อข้าวจาก 9 หน่อ เพิ่มขึ้นเป็น 17.33 หน่อ และจำนวนรวงข้าวจาก 5 รวง เพิ่มขึ้นเป็น 9.67 รวง แตกต่างจากการไม่ใส่ไบโอชาร์¹⁰ นอกจากนี้การนำไบโอชาร์ปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินยังช่วยลดการปลดปล่อยมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากดินนาข้าวได้¹¹

การพิจารณาความเป็นไปได้ที่เกษตรกรรายย่อยจะดำเนินงานผลิตและนำไบโอชาร์มาใช้ปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินนา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปีแรกของการดำเนินงานจำเป็นจะต้องอาศัยข้อมูลประกอบการตัดสินใจ การศึกษาจึงมีความพยายามที่จะนำเสนอผลการตอบสนองของผลผลิตข้าวที่ได้รับอิทธิพลจากการใส่ไบโอชาร์ในดินนาและผลตอบแทนที่เกษตรกรจะได้รับในปีแรกของการใช้ไบโอชาร์ปรับปรุงที่นาของตน

วิธีการศึกษา

วิธีการทดลองอิทธิพลของใบโอชาร์ที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวนาสวน

ดำเนินการทดลอง ณ สถานีวิจัยเกษตรเขตชลประทาน ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (19°N, 99°E) เริ่มดำเนินงานตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ - มิถุนายน 2554 ดำเนินการเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราการใช้ใบโอชาร์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวนาสวน โดยใช้ใบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือของการผลิตน้ำหมักชีวภาพซึ่งประกอบไปด้วยเศษอาหารและกากน้ำตาลที่ตากแดดจนแห้ง นำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยใบโอชาร์ดังกล่าวได้รับการสนับสนุนจากกรมพัฒนาที่ดิน¹² ใช้แผนการทดลอง Completely Randomized Design ทำการเปรียบเทียบ 4 กรรมวิธี คือ กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม (ไม่ใส่ใบโอชาร์) กรรมวิธีที่ 2 ใส่ใบโอชาร์อัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ ในบ่อซีเมนต์และพรวนใบโอชาร์ลงในดินที่ระดับความลึกประมาณ 30 เซนติเมตร กรรมวิธีที่ 3 ใส่ใบโอชาร์อัตรา 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ (ปริมาณ 2 เท่าของกรรมวิธีที่ 2) และกรรมวิธีที่ 4 ใส่ใบโอชาร์อัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ (ปริมาณ 4 เท่าของกรรมวิธีที่ 2) ทำ 4 ซ้ำ เป็นจำนวนทั้งสิ้น 16 หน่วยการทดลอง แต่ละหน่วยทดลองดำเนินการในบ่อซีเมนต์เส้นผ่านศูนย์กลางยาว 0.8 เมตร สูง 0.6 เมตร ใช้ดินที่มาจากแหล่งเดียวกัน ใส่ดินสูงจากก้นบ่อ 0.4 เมตร พรวนใบโอชาร์ลงในดินตามอัตราที่ทำการเปรียบเทียบข้างน้ำไว้ 10 วัน ต่อจากนั้นปักดำกล้าข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 อายุ 25 วัน จำนวน 12 กล้าต่อหน่วยทดลอง และรักษาระดับน้ำไว้ที่ 10 - 15 เซนติเมตรไปจนถึงก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิต 15 วัน

การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์หาความแตกต่างทางสถิติ

นำตัวอย่างใบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือของการผลิตน้ำหมักชีวภาพมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารโดยวิธีมาตรฐานของการวิเคราะห์ดินก่อนพรวนลงในดิน ติดตามการเจริญเติบโตของข้าวโดยการนับจำนวนหน่อตอกทุก 15 วัน หลังปักดำ เก็บตัวอย่างโคลน ลึก 10 เซนติเมตร 4 จุดต่อหน่วยการทดลอง นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียมไอออนตามวิธีโฟลอินเจกชันคอนดักโตเมตรี (mg/kg in dry soil) พร้อมกับวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ (SPAD unit for rice-plant leave) ที่ใบธงของหน่อหลัก 3 จุดต่อใบ ของข้าว 4 กอจากบริเวณกลางบ่อซีเมนต์ โดยใช้ Chlorophyll meter SPAD-502 (Minolta Co., Ltd.) ในระยะข้าวสร้างน้านม และสุดท้ายเก็บข้อมูลองค์

ประกอบผลผลิตข้าว 4 กอ กลางบ่อซีเมนต์ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Statistix 8 Version 8.0 เพื่อหาความแตกต่างของจำนวนหน่อตอกทุก 15 วันหลังปักดำ องค์ประกอบผลผลิตข้าวซึ่งประกอบด้วย จำนวนหน่อตอก จำนวนรวงตอก น้ำหนักเมล็ดตอก (g) น้ำหนักเมล็ดเต็มตอก (g) อัตราส่วนของน้ำหนักเมล็ดเต็มตอก (g) น้ำหนัก 1,000 เมล็ดตอก (g) นอกจากนี้วิเคราะห์ข้อมูล SPAD-value ของใบธงที่หน่อหลักของข้าว และปริมาณแอมโมเนียมไอออนในดินที่ข้าวระยะน้านม

การศึกษาการผลิตใบโอชาร์ด้วยเตาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร

ดำเนินการดัดแปลงถังน้ำมันความจุ 200 ลิตร (สูง 90 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร) จำนวน 3 ใบ เพื่อสร้างเตาเผาจำนวน 2 เตา ทดลองผลิตใบโอชาร์ที่ระยะเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง ทำ 3 ซ้ำ โดยบรรจุเศษไม้สัก มะม่วง และขุ่น จนเต็มถึง นำเศษไม้ขนาดเล็กและใบไม้มาวางเหนือเศษไม้ที่ต้องการเผาเพื่อป้องกันการติดไฟ เเผาจนได้ใบโอชาร์และนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อบนาน 2 วัน เพื่อลดความชื้น บันทึกขนาดของไม้ที่นำมาบรรจุในเตาเผา น้ำหนักของไม้ที่นำมาเผา น้ำหนักผลผลิตใบโอชาร์ที่ได้ และชั่วโมงทำงานที่ใช้ในการผลิต และวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของใบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษไม้ สัก มะม่วง และขุ่น ด้วยวิธีวิเคราะห์ดินมาตรฐาน

การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของการใช้ใบโอชาร์ในการผลิตข้าวนาสวนในปีแรก

นำข้อมูลผลผลิตข้าวที่ได้จากการทดลองการใช้ใบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือของการผลิตน้ำหมักชีวภาพ และข้อมูลจากศึกษาการผลิตใบโอชาร์จากเศษไม้ สัก มะม่วง และขุ่นโดยใช้เตาเผาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร นำข้อมูลทั้งสองส่วนมาจำลองสถานการณ์และสร้างเงื่อนไขในการคำนวณต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของการใช้ใบโอชาร์ในอัตรา 0, 640 1,280 และ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับการปรับปรุงดินนาในปีแรก

ผลการศึกษา

อิทธิพลของใบโอชาร์ที่มีต่อจำนวนหน่อของข้าว

การติดตามจำนวนหน่อของข้าวที่ 15, 30, 45, 60 และ 75 วันหลังปักดำ (Table 1) พบว่าการใส่ใบโอชาร์ในอัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มจำนวนหน่อข้าวอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในทุกระยะวันหลังปักดำเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ใส่ไบโอชาร์ ในการนับจำนวนหน่อครั้งสุดท้ายที่ 75 วันหลังปักดำ พบว่าการใส่ไบโอชาร์อัตรา

2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มจำนวนหน่อเป็น 10.19 หน่อ ในขณะที่กรรมวิธีที่ไม่ใส่ไบโอชาร์เลยมีจำนวนหน่อน้อยที่สุดเพียง 7.94 หน่อ

Table 1 Effects of bio-char levels with Tiller number per hill of lowland rice following the days after transplant (DAT) in cement ponds

Rate of bio-char application to drainage soil (kg/rai)	Days after transplant				
	15	30	45	60	75
0	2.63 (B)	7.94 (B)	9.50 (B)	7.94 (B)	7.94 (B)
640	2.94 (AB)	9.13 (AB)	10.63 (AB)	9.75 (AB)	9.43 (AB)
1,280	3.12 (AB)	9.25 (AB)	10.75 (AB)	9.19 (AB)	9.25 (AB)
2,560	3.50 (A)	10.37 (A)	11.94 (A)	10.19 (A)	10.19 (A)
F-test	*	*	*	*	*
CV (%)	26.29	27.05	24.77	26.10	26.87
LSD _{0.05}	0.58	1.75	1.87	1.71	1.74

¹ mean of 16 hill * significant difference ($P < 0.05$)

อิทธิพลของไบโอชาร์กับ SPAD-value ที่ใบธงของหน่อหลักและปริมาณแอมโมเนียมไอออนในดินลึก 0-10 เซนติเมตร ในระยะข้าวสร้างน้านม

การวัด SPAD-value ที่ใบธงของหน่อหลักในระยะข้าวสร้างน้านมที่ 30 วัน ก่อนเก็บเกี่ยว (Table 2) พบว่าการใส่ไบโอชาร์ในระดับต่างๆ ไม่มีผลทำให้ SPAD-value แตกต่างกับการไม่ใส่ไบโอชาร์ แสดงให้เห็นว่าการใส่ไบโอชาร์ไม่มีผลต่อระดับคลอโรฟิลล์ในใบข้าวที่ระยะข้าวสร้างน้านม อย่างไรก็ตามจากการวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนของ

ดินลึก 0-10 เซนติเมตร ในระยะข้าวสร้างน้านม (Table 2) พบว่าการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 1,280 และ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถตรึงแอมโมเนียมไอออนได้ 5.32 และ 5.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ใส่ไบโอชาร์และการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งสามารถตรึงแอมโมเนียมไอออนได้ 4.82 และ 4.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ

Table 2 Effects of bio-char on SPAD-value in main tiller's flag leaf and ammonium ion in 0-10 cm depth at milling stage of lowland rice (30 days before harvesting) in cement ponds

Rate of adding bio-char at drainage soil (kg/rai)	SPAD-value	Ammonium ion (mg/kg in dry soil)
0	37.95 ¹	4.82 ² (B)
640	36.98	4.68 (B)
1,280	38.24	5.32 (A)
2,560	37.23	5.37 (A)
F-test	ns	*
CV (%)	5.04	7.63
LSD _{0.05}	-	0.39

¹ mean of 16 hill; ² mean of 8 times of measurement ^{ns} not significant difference ($p > 0.05$)

* significant difference ($p < 0.01$)

อิทธิพลของไบโอชาร์กับองค์ประกอบผลผลิตข้าว

การตรวจสอบองค์ประกอบผลผลิตข้าว (Table 3) ที่ระยะเก็บเกี่ยว พบว่าการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้ข้าวมีจำนวนหน่อมากที่สุดแตกต่างกับการไม่ใส่ไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 640 และ 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ แต่เมื่อเปรียบเทียบการไม่ใส่ไบโอชาร์กับการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 650 และ 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ พบว่าจำนวนหน่อของข้าวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักเมล็ดตอกและน้ำหนักเมล็ดเต็มตอก พบว่าการใส่ไบโอชาร์ที่อัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้น้ำหนักเมล็ดตอกสูงที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับกรรมวิธีอื่น อย่างไรก็ตาม น้ำหนักเมล็ดเต็มตอกของกรรมวิธีการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ สูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับกรรมวิธีอื่น และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนเมล็ดเต็มโดยน้ำหนัก พบว่าการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้อัตราส่วนเมล็ดเต็มโดยน้ำหนักต่ำที่สุดซึ่งไม่แตกต่างกับ

การไม่ใส่ไบโอชาร์และการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ นอกจากนี้การใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้อัตราส่วนเมล็ดเต็มโดยน้ำหนักสูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างกับการไม่ใส่ไบโอชาร์และการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 1,280 กิโลกรัม จากการตรวจสอบน้ำหนัก 1,000 เมล็ด พบว่าการใส่ไบโอชาร์ที่อัตรา 640 และ 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้น้ำหนัก 1,000 เมล็ด สูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์และการใส่ไบโอชาร์อัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ธาตุอาหารโดยน้ำหนักของไบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือของการผลิตน้ำหมักชีวภาพ

จากการนำไบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือจากการผลิตน้ำหมักชีวภาพมาวิเคราะห์ธาตุอาหารพบว่า ประกอบด้วย ไนโตรเจน 3.46% ฟอสฟอรัส 0.86% โพแทสเซียม 2.84% แคลเซียม 2.66% และแมกนีเซียม 0.38% โดยน้ำหนักไบโอชาร์

Table 3 Effect of bio-char with yield components of low land rice in cement ponds

Rate of adding bio-char to drainage soil (kg/rai)	Yield components per hill				
	Panicles number	Grain weight (g)	Filled grain weight (g)	Filled grain weight ratio	1000 grain weight (g)
0	7.31 (B)	28.31	26.01	0.920 (AB)	31.017 (B)
640	8.44 (AB)	31.13	29.33	0.938 (A)	32.211 (A)
1,280	7.87 (AB)	29.56	26.98	0.916 (AB)	32.308 (A)
2,560	9.31 (A)	32.06	28.47	0.893 (B)	30.927 (B)
F-test	*	ns	ns	*	*
CV (%)	28.25	30.41	30.07	4.40	5.13
LSD _{0.05}	1.64	6.51	5.89	0.028	1.147

¹ mean of 16 hill ^{ns} not significant difference ($P > 0.05$)

* significant difference ($P < 0.05$)

ผลการศึกษาการผลิตไบโอชาร์จากเศษไม้ด้วยเตาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร

ดำเนินการดัดแปลงถังน้ำมันความจุ 200 ลิตร ที่มีความสูง 90 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร จำนวน 3 ถัง ดัดแปลงเป็นเตาเผาเพื่อผลิตไบโอชาร์ 2 เตา เจาะรูที่กันเตา 48 รู แต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เพื่อให้อากาศเข้าในเตาได้ทั่วถึง (Figure 1) ค่าใช้จ่ายในการผลิตเตาเผา 2 เตาประกอบด้วย ถังน้ำมัน 200 ลิตร จำนวน 3 ถังราคาถังละ 450 บาท เป็นเงิน 1,350 บาท จ้างเหมา

ดัดแปลงถังน้ำมันเพื่อสร้างเตาเผาไบโอชาร์ราคา 150 บาท ต่อเตา จำนวน 2 เตา เป็นเงิน 300 บาท ค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นในการสร้างเตาเผา 2 เตา รวมเป็นเงิน 1,650 บาท

การทดสอบการผลิตไบโอชาร์ด้วยเตาที่ดัดแปลงขึ้นโดย (Figure 2, 3) โดยบรรจุเศษไม้ ลัก มะม่วง และขนุนที่เตรียมไว้ (Table 4) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ± 2.4 เซนติเมตร, ยาว 20 ± 6.3 เซนติเมตร ($n=30$) จนเต็มถึงใส่เศษไม้ขนาดเล็กและใบไม้เหนือเศษไม้ที่ต้องการจะเผาในเตาเพื่อง่ายต่อการจุดไฟ ใช้เวลาในการเผา 2 และ 3 ชั่วโมง

พบว่า การเผาเศษไม้หนัก 44.4 ± 10.4 (n=3) กิโลกรัม นาน 3 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอชาร์ได้ 4.8 ± 1.3 กิโลกรัม และการเผาเศษไม้ 50.5 ± 5.2 กิโลกรัม นาน 2 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอชาร์ได้ 10.3 ± 2.8 กิโลกรัม และนำไบโอชาร์ที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ธาตุอาหารพบว่า ประกอบด้วย ไนโตรเจน 1.49% ฟอสฟอรัส 0.53% โพแทสเซียม 0.93% แคลเซียม 0.64% และแมกนีเซียม 0.16% โดยน้ำหนักไบโอชาร์

ต้นทุนและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของการใช้ไบโอชาร์ในการผลิตข้าวนาสวนในปีแรก

ในการผลิตไบโอชาร์เพื่อนำมาปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินนาในพื้นที่ 1 ไร่ มีเงื่อนไขในการคิดคำนวณดังนี้ การผลิตไบโอชาร์มีต้นทุนในการผลิตประกอบด้วยเตาเผาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร มูลค่า 825 บาทต่อเตา ค่าแรงงานชั่วโมงละ 37.5 บาท ซึ่งในการเผาหนึ่งรอบต้องใช้เวลาในการจัดหาและตัดแต่งเศษไม้ 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เศษไม้ 50 กิโลกรัม และใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง เพื่อผลิตไบโอชาร์ 10.3 กิโลกรัม (อ้างอิงข้อมูลจากการทดลองผลิต) และเพื่อสอดคล้องกับแนวคิดที่จะตรึงคาร์บอนจากอินทรีย์วัตถุในป่าในรูปของไบโอชาร์ จึงไม่คิดราคาของไม้ที่นำมาเผา อีกทั้งจำลองสถานการณ์ให้การตอบสนองของผลผลิตข้าวจากการใส่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษไม้สัก มะม่วง และขนุน เหมือนกับการใส่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือจากการผลิตน้ำหมัก

ชีวภาพ ซึ่งเกษตรกรสามารถเก็บเกี่ยวข้าวได้ผลผลิต 665.85 750.08 690.69 และ 728.83 กิโลกรัมต่อไร่ (คำนวณจากน้ำหนักเมล็ดเต็ม x 16 กอต่อตารางเมตร x 1600 ตารางเมตร) จากการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 0 640 1,280 และ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (อ้างอิงผลจากการทดลอง) แล้วสามารถขายข้าวได้ราคา 10.55 บาทต่อกิโลกรัม

จากการนำเงื่อนไขทั้งหมดมาคำนวณ พบว่าการผลิตไบโอชาร์โดยใช้ต้นทุนต่ำที่สุดต้องดำเนินการดังนี้ (Table 5) การใส่ไบโอชาร์ 640 กิโลกรัมต่อไร่ จะต้องใช้เตาเผา 4 เตา ใช้เวลา 80 ชั่วโมง เป็นต้นทุนในการผลิตทั้งสิ้น 6,300 บาท การใส่ไบโอชาร์ 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ จะต้องใช้เตาเผา 5 เตา ใช้เวลา 125 ชั่วโมง เป็นต้นทุนในการผลิตทั้งสิ้น 8,812.5 บาท และการใส่ไบโอชาร์ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ จะต้องใช้เตาเผา 8 เตา ใช้เวลา 155 ชั่วโมง เป็นต้นทุนในการผลิตทั้งสิ้น 12,412.5 บาท โดยมีค่าใช้จ่ายในการใส่ไบโอชาร์ในนา 1 ไร่ ใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง คิดเป็น 18.75 บาทต่อไร่ รวมเป็นต้นทุนในการดำเนินงานทั้งสิ้น 0 6,318.75 8,831.25 และ 14,431.25 บาท และมีรายรับจากขายข้าว 7,024.72 7,913.34 7,286.77 และ 7,689.16 บาท ทำให้ได้กำไรสุทธิ 7,024.72 1,594.59 -1,544.48 และ -4,741.75 บาท จากการใส่ไบโอชาร์ตามอัตรา 0, 640, 1,280 และ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ



Figure 1 200 liter barrel were adapted to bio-char kiln



Figure 2 Wood chips from teak, mango and jackfruit were contained into 200 litter-barrel kiln (left) before leaves and small wood chips had been topped for fire easily (right)



Figure 3 Burning wood chips from teak, mango and jackfruit in a 200 litter-barrel kiln (left) and bio-char products (right)

Table 4 Efficiency of 200 liter-barrel kiln for bio-char production from wood chip (teak mango and jackfruit; 4 ± 2.4 cm diameter, 20 ± 6.3 cm length, $n = 30$)

	Burning time	
	3 hour	2 hour
Load weight (kg)	$44.4^1 \pm 10.4$	50.5 ± 5.2
Bio-char weight (kg)	4.8 ± 1.3	10.3 ± 2.8
% Bio-char conversion	11.67	20.80

¹ mean of 3 times $\pm$ standard error

Table 5 Production cost and economic return of 4 rates of bio-char application for 1 rai paddy field (1600 m²) at first year by calculating from bio-char production cost of 200 litter-barrel kiln and simulated effect of bio-char produced from waste of enzyme ionic plasma production to rice yield

Items	Without bio-char application	Bio-char rate (kg per rai)		
		640	1,280	2,560
1) Bio-char production cost (baht)	0	6,300	8812.5	1,2412.5
- production cost of bio-char kiln (baht)	0	3,300 (4 ¹)	4,125 (5 ¹)	6,600 (8 ¹)
- labour cost of preparing and loading wood chips (baht)	0	1,800 (48 ²)	2,812.5 (75 ²)	3,487.5 (93 ²)
- labour cost for burning	0	1,200 (32 ²)	1,875 (50 ²)	2325.25 (62 ²)
2) Management cost (baht)	0	18.75	18.75	18.75
-labor cost for sowing bio-char (0.5 hour)	0	18.75	18.75	18.75
3) Total cost (baht) = 1) + 2)	0	6,318.75	8,831.25	14,431.25
4) Yield (kg per rai)	665.85 ³	750.08 ³	690.69 ³	728.83 ³
5) Sale price of rice (baht per kg)	10.55	10.55	10.55	10.55
6) Total income (baht) = 4) * 5)	7,024.72	7,913.34	7,286.77	7,689.16
7) Net profit = (6) - (3)	7024.72	1594.59	-1544.48	-4741.75

¹ Kiln number for the lowest bio-char production cost

² Working hour (300 baht per day) for the lowest bio-char production cost

³ filled grain weight per hill x 16 hills x 1600 m² (transplantation space 25 x 25 cm)

วิจารณ์และสรุปผล

การใส่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือของการผลิตน้ำหมักชีวภาพอัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มจำนวนหน่อของข้าวได้ตั้งแต่ 15 วันหลังปักดำ จนถึง 75 วันหลังปักดำ เป็นผลทำให้มีจำนวนรวงมากที่สุดแตกต่างกับการที่ไม่ใส่ไบโอชาร์ จำนวนรวงที่เพิ่มสูงขึ้นนี้มีความเป็นไปได้ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่สูงขึ้น¹³⁻¹⁵ ซึ่งมีอยู่ในไบโอชาร์ที่ใส่ลงไป (0.86% ฟอสฟอรัส 0.86% โพแทสเซียม โดยน้ำหนักไบโอชาร์จากผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ธาตุอาหารโดยน้ำหนัก) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตกลับพบว่าน้ำหนักเมล็ดตอกและน้ำหนักเมล็ดเต็มตอกไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เป็นผลมาจากอัตราส่วนเมล็ดเต็มโดยน้ำหนักและน้ำหนัก 1,000 เมล็ดในกรรมวิธีที่ใส่ไบโอชาร์อัตรา 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าน้อยที่สุด ไม่แตกต่างกับการไม่ใส่ไบโอชาร์ สอดคล้องกับ SPAD-value ที่วัดได้ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณคลอโรฟิลล์และปริมาณไนโตรเจนที่ข้าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในระยะข้าวสร้างน้านมไม่มีความแตกต่างกันระหว่างการไม่ใส่ไบโอชาร์และการใส่ไบโอชาร์ในอัตราต่างๆ ประกอบกับจำนวนรวงที่มากกว่าทำให้การสะสมอาหารที่เมล็ดไม่สมบูรณ์ ถึงแม้ว่าปริมาณแอมโมเนียมไอออนในระยะข้าวสร้างน้านมในกรรมวิธี

ที่ใส่ไบโอชาร์อัตรา 2,560 และ 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่ไม่ใส่ไบโอชาร์ และกรรมวิธีที่ใส่ไบโอชาร์ 640 กิโลกรัมต่อไร่ แต่อย่างไรก็ตามมีงานศึกษาจำนวนมากที่รายงานถึงดินที่มีไบโอชาร์ประกอบอยู่ในสัดส่วนที่สูงจะทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ของดินสูงตามทำให้การดูดใช้ในโตรเจนของพืชลดลง^{4, 9} เป็นผลให้การใส่ไบโอชาร์เพียงอย่างเดียวในอัตรา 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ ได้ผลผลิตข้าวไร่น้อยกว่าการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมกับการใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 1,280 กิโลกรัมต่อไร่⁹ สอดคล้องกับการทดลองของ Nelson, Agudelo, Yuan & Gan (2011)¹⁶ พบว่าในดินที่มีการใส่ไบโอชาร์เพื่อปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์จะต้องมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมด้วยจึงจะทำให้ได้ผลผลิตที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการตอบสนองของผลผลิตข้าวนาสวนกับการใช้ไบโอชาร์ปรับปรุงดินนาสวนร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมี

จากการผลิตไบโอชาร์จากเศษไม้ สัก มะม่วง และขนุน ด้วยเตาเผาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร พบว่ามีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้และมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณไบโอชาร์ที่สามารถผลิตได้ เช่น ชนิดและความชื้นของไม้ที่นำมาเผา ขนาดของไม้ที่นำมาใช้เผา อุณหภูมิขณะเผา และอากาศที่ผ่านเข้าไปในขณะที่เผาทำให้ได้ผลผลิตไบโอชาร์ลดลง¹⁷ ทำให้

การเผาครั้งนี้สามารถผลิตไบโอชาร์ได้สูงสุดที่ 20.8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักก่อนเผา โดยทั่วไปการเผาถ่านจะทำในสภาวะที่อับอากาศดังนั้นหากมีการดัดแปลงเตาให้ปริมาณออกซิเจนที่เข้าไปในเตาลดลงจะทำให้ได้ปริมาณไบโอชาร์มากขึ้น ดังเช่นเตาเผาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร ที่ถูกดัดแปลงในรูปแบบต่างๆอาจมีประสิทธิภาพสูงกว่า ดังเช่นเตาเผาถ่านในชุมชนที่การผลิตถ่านเป็นอาชีพอยู่นั้นซึ่งสามารถผลิตถ่านได้ 12.5 ถึง 42 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักก่อนเผา¹⁸ อย่างไรก็ตามการใช้เตาเผาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร มีข้อดีที่สามารถขนย้ายเตาเผาได้สะดวก สามารถย้ายสถานที่ในการเผาเข้าใกล้แหล่งที่มีเศษไม้ในท้องถิ่น เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการขนย้ายไม้มายังที่สถานที่เผา

เมื่อพิจารณาจากต้นทุนการผลิตไบโอชาร์จากเศษไม้ด้วยเตาเผาที่ดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร พบว่าต้นทุนในการใช้ไบโอชาร์ปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินสูงขึ้นตามอัตราที่ต้องการใช้ และจากการจำลองสถานการณ์โดยนำผลการตอบสนองของผลผลิตข้าวที่เกิดจากการใส่ไบโอชาร์ที่ผลิตจากกากที่เหลือของการผลิตน้ำมันหemp 4 อัตรา ซึ่งไม่ได้ตอบสนองอย่างชัดเจนต่ออัตราการใส่ไบโอชาร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้ผลตอบแทนจากการขายข้าวของเกษตรกรลดลงตามไปด้วยในปีแรก อย่างไรก็ตามการคำนวณผลตอบแทนทางเศรษฐกิจนี้ได้นำข้อมูลเฉพาะจากกิจกรรมที่ต้องดำเนินงานแตกต่างกับการผลิตข้าวนาสวนทั่วไปเพื่อให้เห็นความแตกต่างกันเฉพาะต้นทุนสำหรับการใช้ไบโอชาร์ในแปลงของเกษตรกร จึงไม่นำต้นทุนการเตรียมดิน เมล็ดพันธุ์ข้าว แรงงานในการปลูกข้าว เก็บเกี่ยว ฯลฯ รวมคำนวณด้วย อีกทั้งการตอบสนองของผลผลิตข้าวนาสวนที่ได้รับอิทธิพลจากการใช้ไบโอชาร์ปรับปรุงดินร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีในการผลิตข้าวยังไม่ได้พิสูจน์ในการศึกษาครั้งนี้ จึงไม่นำต้นทุนการใช้ปุ๋ยมารวมคำนวณด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร (ศวพก.) คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนงบประมาณในการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.ชัยนาม ดิสถาพร กรมพัฒนาที่ดิน ที่ให้การสนับสนุนไบโอชาร์สำหรับการทดลอง ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. จุฑา จักรมณี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียมไอออนตามวิธีโฟลอินเจกชันคอนดักโตเมตรี ขอขอบคุณอาจารย์จตุรงค์ พวงมณี และอาจารย์กุลศร ทองงาม ศวพก. สำหรับการจัดสรรแรงงาน

ในการดำเนินงานทดลองและคำปรึกษาในการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสำหรับการทดลองผลิตไบโอชาร์

อ้างอิง

1. Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-Char Sequestration in terrestrial Ecosystem - A Review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006;11:403-27.
2. Atkinson CJ, Fitzgerald JD, Hipps NA. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. Plant Soil. 2010;337:1-18.
3. Lehmann J, Rondon M. Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soil in the Humid Tropics. Biological Approaches to Sustainable Soil Systems. 2006:517-29.
4. DeLuca TH, MacKenzie MD, Gundale MJ. Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations. In: Lehmann J, Joseph S, editors. Biochar for Environmental Management: Earthscan Publishers Ltd 2009. p. 251-70.
5. Ding Y, Liu Y-X, Wu W-X, Shi D-Z, Yang M, Zhong Z-K. Evaluation of Biochar Effects on Nitrogen Retention and Leaching in Multi-Layered Soil Columns. Water Air Soil Pollut. 2010;213:47-55.
6. Singh BP, Hatton BJ, Singh B, Cowie AL. The role of biochar in reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from soil. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World; 1 - 6 August 2010; Brisbane, Australia 2010. p. 257-9.
7. Zheng W, Sharma BK, Rajagopalan N. Using Biochar as a Soil Amendment for Sustainable Agriculture: Illinois Sustainable Technology Center 2010.
8. Zwieter LV, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant Soil. 2010;327:235-46.
9. Asai H, Samson BK, Stephan HM, Songyikhangsuthor K, Hommaa K, Kiyono Y, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field Crops Research. 2009;111:81-4.

10. Masulili A, Utomo WH, MS S. 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*. 2010;2:39-47.
11. Liu Y, Yang M, Wu Y, Wang H, Chen Y, Wu W. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar. *Journal of Soils and Sediments*. 2011;11:930-9.
12. อภิญา ดวงจันทร์, พิริยะ ปิ่นทอง, นิธิ นิลฉวี. การเปลี่ยนกากน้ำหมักชีวภาพไปเป็นน้ำมันชีวภาพ และถ่านชีวภาพด้วย กระบวนการไพโรไลซิส: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2553.
13. Alam MM, Hasanuzzaman M, Nahar K. Tiller Dynamics of Three Irrigated Rice Varieties under Varying Phosphorus Levels. *American-Eurasian Journal of Agronomy* 2. 2009;2:89-94.
14. Yoshida S. *Fundamentals of Rice Crop Science*: The International Rice Research Institute; 1981.
15. Bhiah KM, Guppy C, Lockwood P, Jessop R. Effect of potassium on rice lodging under high nitrogen nutrition. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World; 1 - 6 August 2010. p. 136-9.
16. Nelson NO, Agudelo SC, Yuan W, Gan J. Nitrogen and Phosphorus Availability in Biochar-Amended Soils. *Soil Science*. 2011;176:218-26.
17. Quayle WC. Biochar potential for soil improvement & soil fertility. *IREC Farmers' Newsletter*. 2010:22-4.
18. Kammen DM, Lew DJ. *Review of Technologies for the Production and Use of Charcoal*. Berkeley: University of California 2005.