บทความ: “ถ่านชีวภาพ (biochar)” วัสดุปรับปรุงดินเพื่อส่งเสริมการปลูกข้าวในพื้นที่ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

บัวหลวง ฝ้ายเยื่อ * และ เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* E-mail: Bualuang.F@chula.ac.th

การอ้างอิง: บัวหลวง ฝ้ายเยื่อ และ เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม. (2563). “ถ่านชีวภาพ (biochar)” วัสดุปรับปรุงดินเพื่อส่งเสริมการปลูกข้าวในพื้นที่ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 24 (ฉบับที่ 2).

บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นธัญพืช (cereal grain) ที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญของประชากรโลก และยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 หรือ “ข้าวหอมมะลิ” เป็นข้าวพันธุ์ที่มีชื่อเสียงที่สุดของประเทศไทย มีความต้องการในตลาดสูงทั้งเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก (Chaum และคณะ, 2007) โดยแหล่งผลิตข้าวหอมมะลิที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทยอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีการเพาะปลูกประมาณ 80% ของพื้นที่ปลูกข้าวหอมมะลิทั้งประเทศ (กรมการข้าว, 2559) อย่างไรก็ตาม จากสภาพทรัพยากรดินในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนปนทรายไม่อุ้มน้ำ มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และพื้นที่บางส่วนประสบปัญหาดินเค็ม (Clermont-Dauphin และคณะ, 2010; Arunin และ Pongwichian, 2015) โดยเฉพาะในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่วิกฤตดินเค็มของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (Wijitkosum, 2018) ทั้งนี้ ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์พื้นที่ดินเค็มดังกล่าวเพื่อการเพาะปลูกยังคงให้ผลผลิตต่ำ พื้นที่บางส่วนถูกทิ้งร้างไม่มีพืชปกคลุมผิวดิน และบางส่วนถูกนำไปใช้ประโยชน์ที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของพื้นที่ดินเค็มเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การแก้ไขปัญหาพื้นที่ดินเค็มจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทยเพื่อการรักษาระบบนิเวศและการสร้างความมั่นคงทางอาหารในอนาคต

ความหมายของดินเค็มและพื้นที่ดินเค็มของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ดินเค็ม (saline soil) คือ ดินที่มีปริมาณเกลือที่ละลายได้อยู่ในสารละลายดินมากเกินไปจนมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช ซึ่งเกลือส่วนใหญ่ที่พบในดินเค็ม คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โดยความเค็มของดินตรวจวัดได้จากการวัดการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สกัดจากดินที่อิ่มตัว

ด้วยน้ำ (Electrical conductivity of a saturated soil paste extract; ECe) ที่อุณหภูมิ 25° C มีหน่วยเป็นเดซิซีเมนต่อเมตร (dS/m) โดยใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity meter) ซึ่งจะใช้อัตราส่วนของดินต่อน้ำเท่ากับ 1:2 หรือ 1:5 (สมศรี อรุณินท์, 2539) โดยดินที่มีค่าการนำไฟฟ้าตั้งแต่ 4 dS/m ขึ้นไป จัดว่าเป็นดินเค็ม (Limpinuntana และ Arunin, 1986; Flowers และ Flowers, 2005) ซึ่งดินเค็มสามารถจำแนกตามค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินได้เป็น 3 ระดับ คือ ดินเค็มปานกลาง ดินเค็มมาก และดินเค็มจัด นอกจากนี้ ดินเค็มยังปรากฏลักษณะทางกายภาพที่แสดงให้เห็นความเค็มได้ คือ การมีคราบเกลือหรือขุยเกลือบนผิวดิน (รูปที่ 1)

รูปที่ 1 ลักษณะของคราบเกลือหรือขุยเกลือสีขาวที่พบบริเวณผิวดินของพื้นที่ดินเค็ม

ประเทศไทยมีพื้นที่ดินเค็มทั้งหมดประมาณ 22 ล้านไร่ โดยพื้นที่ดินเค็มประมาณ 17.8 ล้านไร่พบอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (สมศรี อรุณินท์, 2539; สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2552) ซึ่งมีสาเหตุมาจากกระบวนการผุพัง (weathering process) ของวัตถุต้นกำเนิดดินที่เป็นเกลือหิน (rock salt) หรือแร่เฮไลต์ (halite) ที่มีโซเดียมคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ (Limpinuntana และ Arunin, 1986; Arunin และ Pongwichian, 2015; Wijitkosum, 2020) สภาพปัญหาดินเค็มที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำแนกตามระดับความเค็มของดิน (ตารางที่ 1) พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่มีระดับความเค็มปานกลาง (70.8% ของพื้นที่ดินเค็มทั้งหมด) โดยพื้นที่ดังกล่าวถูกใช้ประโยชน์เพื่อการเพาะปลูก เช่น การปลูกข้าวหอมมะลิ ซึ่งจากสภาวะดินเค็มทำให้ได้ผลผลิตเฉลี่ยเพียง 100-150 กิโลกรัมต่อไร่ เท่านั้น (สมศรี อรุณินท์, 2539; Jedrum และคณะ, 2014) ในขณะที่การปลูกในพื้นที่ดินปกติจะให้ผลผลิตประมาณ 360 กิโลกรัมต่อไร่ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2559)

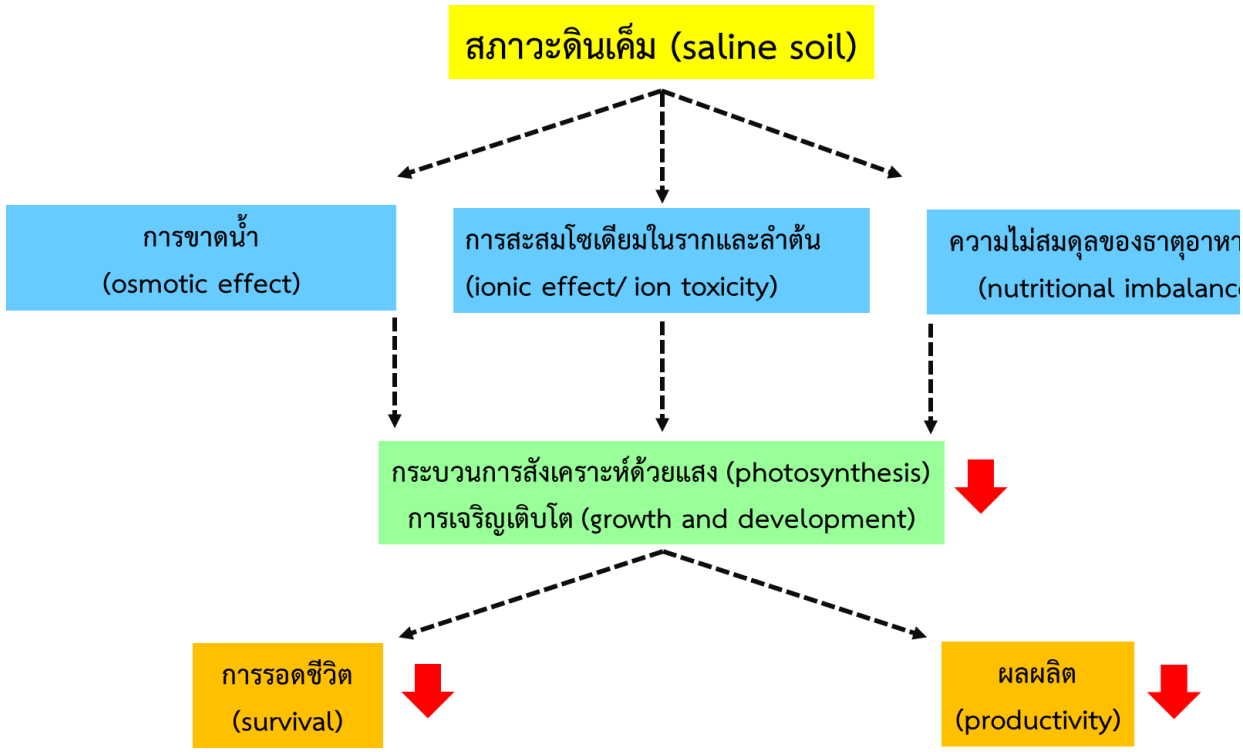
ตารางที่ 1 ระดับความเค็มและพื้นที่ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดิน ที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ หรือ ECe (dS/m)	ระดับความเค็มของดิน	พื้นที่ (ล้านไร่)
4-8	เค็มปานกลาง	12.6
8-16	เค็มมาก	3.7
>16	เค็มจัด	1.5

ที่มา: สมศรี อรุณินท์, 2539; Limpinuntana และ Arunin, 1986

ผลกระทบของสภาวะดินเค็มต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

ข้าวเป็นพืชที่ไม่ทนต่อสภาวะดินเค็ม (salt-sensitive plant) โดยดินที่มีความเค็มระดับปานกลางทำให้ข้าวพันธุ์ IR55178 ตายได้ทั้งหมดภายในระยะเวลา 60 วัน (Faiyue และคณะ, 2012) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pongprayoon และคณะ (2019) ที่พบว่า เมื่อต้นกล้าข้าวหอมมะลิที่ปลูกในสภาวะเค็มมากเป็นระยะเวลา 21 วัน ต้นกล้าข้าวจะไม่สามารถรอดชีวิตได้ ทั้งนี้ สภาวะเค็มของดินมีผลต่อข้าวใน 3 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ ทำให้ต้นข้าวขาดน้ำ (osmotic effect) ทำให้ต้นข้าวเกิดความเป็นพิษของโซเดียม (ionic effect/ ion toxicity) และทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารพืช (nutritional imbalance) (Munns และ Tester, 2008; Faiyue, 2011; Singh และ Flowers, 2011) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะผลกระทบของสภาวะดินเค็มต่อข้าว

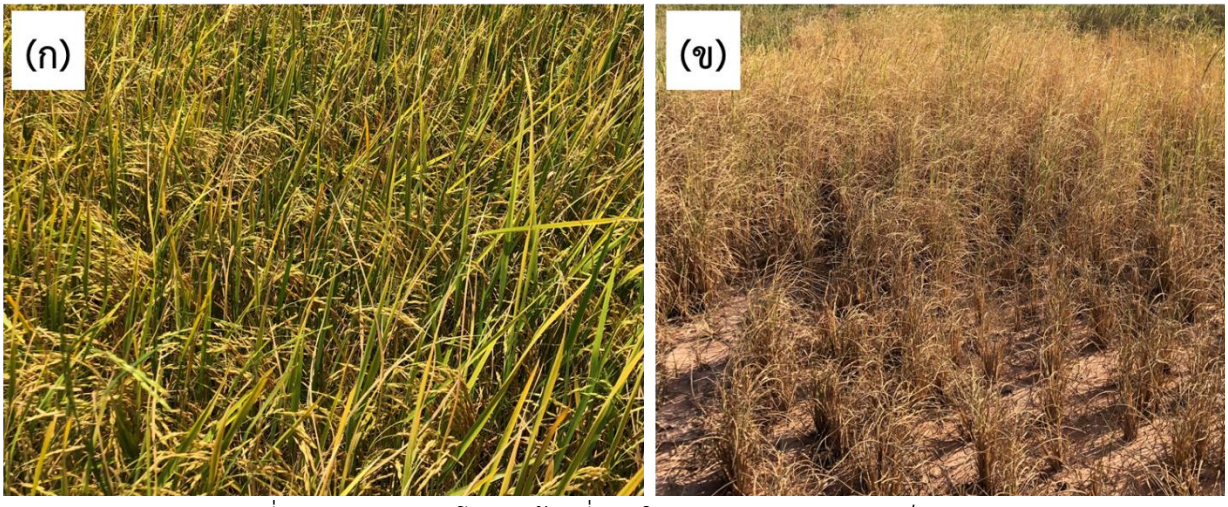
ซึ่งผลกระทบของสภาวะดินเค็มต่อข้าวในแต่ละลักษณะมีรายละเอียดสรุปพอสังเขปได้ ดังนี้

1. การขาดน้ำ (osmotic effect) เกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมของเกลือในสารละลายดินในปริมาณมากจนทำให้ต้นข้าวไม่สามารถดูดน้ำจากดินเข้าสู่รากได้ ทำให้เกิดปัญหาการขาดน้ำในระดับเซลล์และเนื้อเยื่อซึ่งส่งผลทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) ที่สำคัญของต้นข้าว เช่น การหายใจ การสังเคราะห์ด้วยแสง และการเจริญเติบโตมีค่าลดลง

2. ความเป็นพิษของโซเดียม (ionic effect/ ion toxicity) เกิดเนื่องจากโซเดียมไอออนที่ถูกลำเลียงเข้าสู่เซลล์พืชในปริมาณมากจนเกินความจุของแวคิวโอล (vacuole) ที่จะเก็บสะสม ทำให้มีปริมาณโซเดียมไอออนส่วนเกินสะสมในไซโตพลาสซึม (cytoplasm) เกิดความเป็นพิษต่อต้นข้าวโดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ของเซลล์

3. ความไม่สมดุลของธาตุอาหารพืช (nutritional imbalance) เกิดจากการที่โซเดียมไอออนไปยับยั้งการนำเข้าธาตุอาหารที่จำเป็นของพืช เช่น โพแทสเซียม โดยการยับยั้งโดยตรงผ่านทางช่องทางการนำเข้าสู่เซลล์ หรือการยับยั้งทางอ้อม เช่น การยับยั้งการเจริญเติบโตของรากหรือการลดจำนวนของท่อลำเลียงในรากพืช เป็นต้น

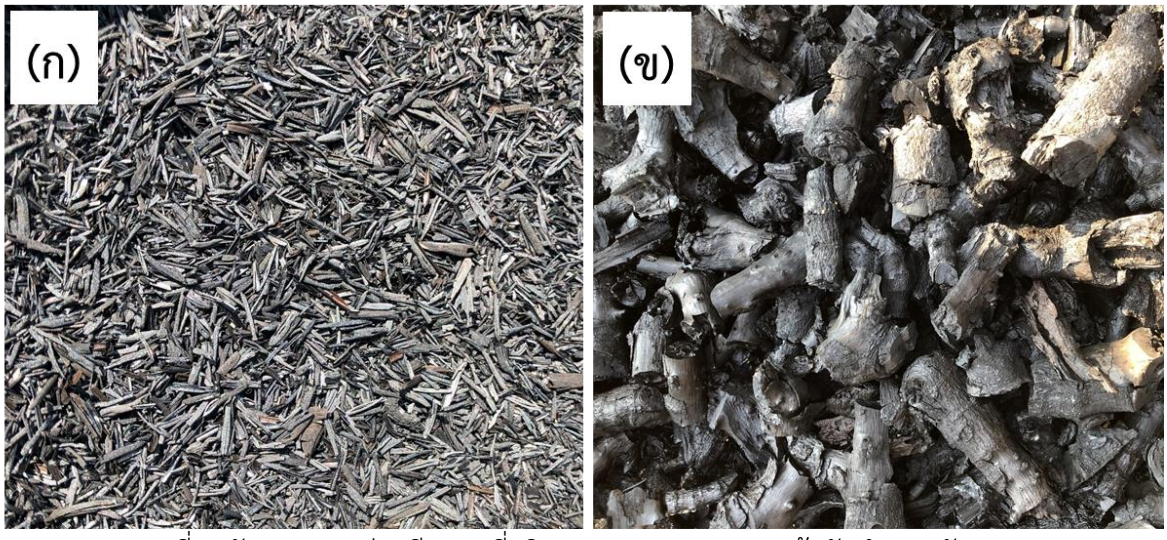
จากผลกระทบของสภาวะเค็มของดินต่อต้นข้าวดังที่กล่าวมาทำให้ข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ดินเค็มมีอัตราการรอดชีวิตต่ำ มีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตต่ำกว่าต้นข้าวที่ปลูกในดินปกติ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 การเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินปกติ (ก) และดินเค็ม (ข)

ถ่านชีวภาพและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเพื่อการเพิ่มผลผลิตข้าว

ถ่านชีวภาพ หรือ ไบโอชาร์ (Biochar) คือ ถ่านที่ผลิตจากการนำชีวมวล (biomass) ชนิดต่าง ๆ เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ เปลือกผลไม้ มูลสัตว์ หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ซังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ไปผ่านกระบวนการเผาในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนอยู่อย่างจำกัด ซึ่งเรียกว่า กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) (Sriburi และ Wijitkosum, 2016; Pituya และคณะ, 2017; Wijitkosum และ Jiwnok, 2019) (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ลักษณะของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบ (ก) และเหง้ามันสำปะหลัง (ข)

ด้วยคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงถึง 50% หรือมากกว่า 50% ขึ้นอยู่กับชีวมวลที่นำมาผลิต ทำให้ถ่านชีวภาพถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการกักเก็บคาร์บอนไว้ใต้ดิน (carbon sequestration) เพื่อช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีพื้นที่ผิวมาก มีประจุลบ มีรูพรุน และมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชจึงได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เพิ่มผลผลิตทางการเกษตร และเพิ่มความต้านทานของพืชต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมในพืชหลายชนิด รวมทั้ง การปรับปรุงและฟื้นฟูดินปนเปื้อนจากมลสาร (pollutant) ต่าง ๆ (พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์, 2560; อโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์ และคณะ, 2562; Sriburi และ Wijitkosum, 2016; Wijitkosum และ Sriburi, 2018; Yu และคณะ, 2019)

ตัวอย่างงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเพื่อการเพิ่มผลผลิตของข้าว เช่น การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเศษไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ กระชิด (*Blachia siamensis*) ชะเอมไทย (*Albizia myriophylla* Benth.) และกระดูกกบ (*Hymenppyramis brachiate* Wall.) ในการปลูกข้าวไร่พันธุ์เหลือง (Yellow rice) ในพื้นที่ดินเหนียวปนทราย (sandy clay) โดย Wijitkosum และ Kallayasiri (2015) ซึ่งได้รายงานว่า การผสมถ่านชีวภาพในอัตรา

1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรลงในแปลงปลูกทำให้ข้าวมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าการใส่ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวในทุกระยะการเจริญเติบโต โดยจำนวนต้นข้าวต่อกอ จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนัก 1,000 เมล็ด และเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกข้าวโดยใส่ปุ๋ยอินทรีย์เพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นวิธีการปลูกข้าวโดยทั่วไปของเกษตรกร นอกจากนั้น การใส่ถ่านชีวภาพในดินปลูกข้าวยังสามารถปรับปรุงคุณภาพดินได้ โดยทำให้ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณอินทรียวัตถุและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมด้วยถ่านชีวภาพ

จากคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจึงได้มีการทดลองใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในพื้นที่ดินเค็ม ซึ่งพบว่าถ่านชีวภาพสามารถส่งเสริมให้ข้าวเจริญเติบโตและอยู่รอดได้ในพื้นที่เพาะปลูกที่มีสภาวะดินเค็ม อาทิ การศึกษาวิจัยของ Jin และคณะ (2018) พบว่า การผสมถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าวสาลีในอัตรา 1.5% 3.0% และ 4.5% ของน้ำหนักดินซึ่งเป็นดินร่วนปนเหนียว (clay loam) ที่เค็มจัด (ECe = 26 dS/m) สามารถลดการสะสมโซเดียมไอออนในลำต้น ใบ และรวงข้าวพันธุ์ G9 ได้อย่างมีนัยสำคัญ และทำให้น้ำหนักแห้งของต้น จำนวนเมล็ดต่อรวง และผลผลิตต่อกอเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในชุดการทดลองที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ โดยอัตราการใช้ถ่านชีวภาพที่ดีที่สุด คือ 3.0% ของน้ำหนักดิน งานวิจัยของ Nguyen และคณะ (2018) ซึ่งได้รายงานผลการศึกษาที่สอดคล้องกันว่า การผสมถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบหรือฟางข้าวด้วยอัตรา 2.5% ของน้ำหนักดินในดินร่วนเหนียวปนตะกอน (silty clay loam) ที่มีความเค็มระดับปานกลาง (ECe = 5.7 dS/m) สามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งของต้นและรากข้าวพันธุ์ OM 6162 ได้อย่างมีนัยสำคัญ และถ่านชีวภาพยังช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบให้ผลการทดลองที่ดีกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าว นอกจากนั้น การวิจัยในพื้นที่ดินเค็มในจังหวัดนครราชสีมาซึ่งดินเป็นดินทรายร่วน มีสภาวะเป็นด่าง (pH 10.11) และมีความเค็มสูง (ECe = 43.81 dS/m และ SAR = 1,039.12) โดยการผสมถ่านชีวภาพที่ผลิตจากแกลบร่วมกับปุ๋ยมูลวัวเพื่อการปลูกข้าวหอมมะลิของ Wijitkosum (2020) พบว่า ดินมีระดับความเค็มและความเป็นด่างลดลง และต้นข้าวในแปลงทดลองที่ผสมถ่านชีวภาพในอัตรา 2 กิโลกรัมต่อตารางเมตรในระดับความลึก 15 เซนติเมตรร่วมกับปุ๋ยมูลวัวในอัตรา 1.25 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ ในขณะที่ต้นข้าวในแปลงทดลองที่ใส่ปุ๋ยมูลวัวในอัตรา 1.25 กิโลกรัมต่อตารางเมตรเพียงอย่างเดียวไม่สามารถเจริญเติบโตและอยู่รอดได้

บทสรุป

ถ่านชีวภาพมีศักยภาพในการเป็นวัสดุปรับปรุงดินเค็มเพื่อช่วยส่งเสริมการปลูกข้าวหอมมะลิในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยถ่านชีวภาพจะช่วยเพิ่มธาตุอาหารในดินและลดระดับความเค็มของดินทำให้ต้นข้าวสามารถเจริญเติบโตและสร้างผลผลิตได้

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “การศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเติบโต การสะสมโซเดียมไอออน และผลผลิตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในสภาวะดินเค็ม” ที่ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่/นักวิจัยใหม่ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2562 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ร้อยตำรวจตรี ดร.พินิจภณ ปิตุยะ จากศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทรายอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี สำหรับคำแนะนำในการเผาถ่านชีวภาพ

เอกสารอ้างอิง

กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. (2559). องค์ความรู้เรื่องข้าว พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=19.htm [22 กุมภาพันธ์ 2563]

กรมการข้าว. (2559). รายงานสถานการณ์การเพาะปลูกข้าวปี 2559/60 รอบที่ 1. กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 31 หน้า.

พินิจภณ ปิตุยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์. (2560). การพัฒนาและฟื้นฟูดินทรายในเขตเงาฝนด้วยถ่านชีวภาพ. วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 หน้า 27-38.

สมศรี อรุณินท์. (2539). ดินเค็มในประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 251 หน้า.

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. (2552). การวิจัยข้าวทนเค็มในภาคกลาง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 28 หน้า.

อโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์, พันธวัศ สัมพันธ์พานิช และพินิจภณ ปิตุยะ. (2562). ไม้กระถินเหลือใช้.....มวลชีวภาพสำหรับการฟื้นฟูดินปนเปื้อน. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 23 ฉบับที่ 4.

Arunin, S., and Pongwichian, P. (2015). Salt-affected soils and management in Thailand. Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan, 69, 319-325.

Cha-um, S., Vejchasarn, P., and Kirdmanee, C. (2007). An effective defensive response in Thai aromatic rice varieties (*Oryza sativa* L. spp. indica) to salinity. Journal of Crop Science and Biotechnology, 10, 257-264.

Clermont-Dauphin, C., Suwannang, N., Grünberger, O., Hammecker, C., and Maeght, J.L. (2010). Yield of rice under water and soil salinity risks in farmers' fields in northeast Thailand. Field Crops Research, 118, 289-296.

Faiyue, B. (2011). Bypass flow and sodium transport in rice (*Oryza sativa* L.). Doctoral thesis (DPhil), University of Sussex, UK.

Faiyue, B., Al-Azzawi, M.J. and Flowers, T.J. (2012). A new screening technique for salinity resistance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings using bypass flow. Plant Cell and Environment, 35, 1099-1108.

Flowers, T.J. and Flowers, S.A. (2005). Why does salinity pose such a difficult problem for plant breeders? Agricultural Water Management, 78, 15-24.

Jedrum, S., Thanachit, S., Anusontpornperm, S., and Wiriyakitnateekul, W. (2014). Soil amendments effect on yield and quality of jasmine rice grown on typic Natraqualfs, Northeast Thailand. International Journal of Soil Science, 9, 37-54.

Jin, F., Ran, C., Anwari, Q.A., Geng, Y.Q., Guo, L.Y., Li, J.B., Han, D., Zhang, X.Q., Liu, X., and Shao, X.W. (2018). Effects of biochar on sodium ion accumulation, yield and quality of rice in saline-sodic soil of the west of Songnen plain, northeast China. Plant Soil Environment, 64, 612–618.

Limpinuntana, V. and Arunin, S. (1986). Salt affected land in Thailand and its agricultural productivity. Reclamation and Revegetation Research, 5, 143-149.

Munns, R. and Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 59, 651-681.

Nguyen, B.T., Trinh, N.N., Le, C., M. T., Nguyen, T.T., Tran, T.V., Thai, B.V., and Le, T.V. (2018). The interactive effects of biochar and cow manure on rice growth and selected properties of salt-affected soil. Archives of Agronomy and Soil Science, 64, 1744-1758.

Pituya, P., Sriburi, T., and Wijitkosum, S. (2017). Optimization of biochar preparation from Acacia wood for soil amendment. Engineering journal, 21, 99-105.

Pongprayoon, W., Tisarum, R., Theerawittaya, C., and Cha-um, S. (2019). Evaluation and clustering on salt-tolerant ability in rice genotypes (*Oryza sativa* L. subsp. indica) using multivariate physiological indices. Physiology and Molecular Biology of Plants, 25, 473–483.

Singh, R.K. and Flowers, T.J. (2011). Physiology and molecular biology of the effects of salinity on rice. In M. Pessarakli (ed), Handbook of plant and crop stress, 3rd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 899-939.

Sriburi, T. and Wijitkosum, S. (2016). Biochar amendment experiments in Thailand: practical examples. In V.J. Bruckman, E.A. Varol, B.B. Uzun, J. Liu (eds.), Biochar a regional supply chain approach in view of climate change mitigation, pp. 368-389. Cambridge University Press, UK.

Wijitkosum, S. (2018). Fuzzy AHP for drought risk assessment in Lam Ta Kong watershed, the North-eastern region of Thailand. Soil and Water Research, 13, 218-225.

Wijitkosum, S. (2020). Applying rice husk biochar to revitalize saline sodic soil in Khorat Plateau area – a case study for food security purposes. In J.S. Singh, and C. Singh (eds.), Biochar applications in agriculture and environment. Springer (In press).

Wijitkosum, S. and Jiwnok, P. (2019). Elemental composition of biochar obtained from agricultural waste for soil amendment and carbon sequestration. Applied sciences, 9, 3980.

Wijitkosum, S. and Kallayasiri, W. (2015). The use of biochar to increase productivity of indigenous upland rice (*Oryza sativa* L.) and improve soil properties. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 6, 1326-1336.

Wijitkosum, S. and Sriburi, T. (2018). Increasing the amount of biomass in field crops for carbon sequestration and plant biomass enhancement using biochar. In Biochar - An Imperative Amendment for Soil and the Environment, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.82090.

Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., Tang, H., Wei, X., and Gao, B. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review. Journal of Environmental Management, 232, 8-21.