



ผลของถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอต่อผลผลิต การดูดใช้ธาตุอาหาร
และการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กในผักกาดหอม (*Lactuca sativa* var. *crispa*)
Effects of Biochar and Fe-EDTA on Yield, Nutrient Uptake and Iron
Translocation in Lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*)

สายชล สุขญาณกิจ^{1*} สิริวรรณ สมิตธิอาภรณ์¹ ธนภัทร ปลื้มพวง² และธนวรรณ พาณิชพัฒน์³

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

²ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

³ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

*Corresponding Author, E-mail: saychol.agri@gmail.com

Received: 26 June 2017 | Revised: 3 February 2018 | Accepted: 5 July 2018

บทคัดย่อ

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอต่อผลผลิต การดูดใช้ธาตุอาหาร และการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กในผักกาดหอม วางแผนการทดลองแบบ 2x5 factorial in randomized complete block โดยปัจจัยที่แรก คือไม่ใส่ถ่านชีวภาพ (A1) และใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับวัสดุปลูก (A2) ปัจจัยที่สอง คือความเข้มข้นของเหล็กอิตีที่เอ 5 ระดับ คือ 0 (B1), 25 (B2), 50 (B3), 75 (B4) และ 100 (B5) มก. Fe/กก. ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ผลการศึกษาพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพช่วยลดความเป็นพิษของเหล็กได้ โดยผักกาดหอมจะแสดงความเป็นพิษของเหล็กที่ระดับความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก. ขณะที่การไม่ใช้ถ่านชีวภาพทำให้ผักกาดหอมแสดงความเป็นพิษของเหล็กที่ความเข้มข้น 75 มก. Fe/กก. การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอความเข้มข้น 0-75 มก. Fe/กก. ผักกาดหอมมีความกว้างทรงพุ่ม น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในส่วนของการดูดใช้ในโตรเจนในพืชมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนโพแทสเซียม และเหล็กมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p \leq 0.01$) ขณะที่การดูดใช้ฟอสฟอรัสไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยชุดการทดลองที่ A1B3, A2B1 และ A1B5 ให้ค่าการดูดใช้ในโตรเจน โพแทสเซียม และเหล็กในพืชสูงที่สุด (0.78, 3.16 ก./ต้น และ 38.29 มก./กก. ตามลำดับ) การใช้ถ่านชีวภาพทำให้การเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กจากวัสดุปลูกสู่ส่วนเหนือดินของพืช (BCF) มีค่าลดลง ขณะที่การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก. ให้ค่าการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กจากรากสู่ส่วนเหนือดิน (TF) สูงที่สุด ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองที่ไม่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอความเข้มข้น 0, 25, 75 และ 100 มก. Fe/กก.

ABSTRACT

A greenhouse study was conducted to determine the effect of biochar and Fe-EDTA on the yield, nutrient uptake and iron translocation in lettuce. It was arranged in a 2x5 factorial in randomized complete block design with three replications. The first consist of no biochar (A1) and biochar with growing medium (A2) while the second factor

comprised five rates of Fe-EDTA: 0 (B1), 25 (B2), 50 (B3), 75 (B4) and 100 (B5) mg Fe/kg. The results revealed that biochar could reduce iron toxicity observed at 100 mg Fe/kg. while no biochar treatment showed iron toxicity at 75 mg Fe/kg. The biochar was used in combination with Fe-EDTA at 0-75 mg Fe/kg. Lettuce width, fresh and dry weight were not significantly different. Furthermore, nitrogen uptake was significantly different ($p \leq 0.05$). Potassium and iron uptake were highly significant difference ($p \leq 0.01$) while phosphorus uptake was not significantly different. The treatments of A1B3, A2B1 and A1B5 gave the highest of nitrogen, potassium and iron uptake (0.78, 3.16 g/plant and 38.29 mg/plant, respectively). Biochar could reduce iron translocation from the growing medium to the shoot (BCF). The translocation of iron from the root to the shoot (TF) was highest when biochar was used in combination with Fe-EDTA at 100 mg Fe/kg. but it was not statistically different from that obtained when no biochar was applied along with Fe-EDTA at 0, 25, 75 and 100 mg Fe/kg.

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ เหล็กอีดีทีเอ ผลผลิต การดูดใช้ธาตุอาหาร ผักกาดหอม

Keywords: Biochar, Fe-EDTA, Yield, Nutrient uptake, Lettuce

บทนำ

ถ่านชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้แบบไร้อากาศ (pyrolysis) ออกมไปด้วยคาร์บอนที่มีความเสถียรสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเนื่องจากช่วยปรับปรุงผลผลิตของดิน (soil productivity) กล่าวคือสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำและธาตุอาหารพืชในดิน อีกทั้งช่วยปรับปรุงโครงสร้างดินให้สามารถระบายน้ำและอากาศได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดก๊าซเรือนกระจก และเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนในดิน (Lehmann, 2007; Chen et al., 2010; Laird et al., 2010; Fellet et al., 2011; Thammasom et al., 2016) ซึ่งถือว่ามีประโยชน์ทั้งในด้านการเกษตรและสิ่งแวดล้อม Liu et al. (2014) รายงานว่าการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 20 และ 40 ตันต่อเฮกตาร์ สามารถยกระดับค่าพีเอชของดินได้ 0.6 และ 1.3 หน่วย ตามลำดับ ซึ่งจะเป็ประโยชน์อย่างมากในดินที่เป็นกรดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพีเอชจะส่งผลให้ธาตุอาหารพืชบางชนิดละลายออกมาและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้น (ยงยุทธ, 2558) ด้านความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนในดิน ถ่านชีวภาพถือว่าเป็นแหล่งคาร์บอนในดินที่สำคัญเนื่องจากมีความคงทนต่อการสลายตัวโดยจุลินทรีย์ดิน แต่ถึงกระนั้นอิทธิพลที่มีความโดดเด่นในการสลายตัวของถ่านชีวภาพที่เติมลงสู่ดินก็ยังคงมาจากจุลินทรีย์ดินเป็นหลัก (Kuzakov et al., 2009; Steinbeiss et al., 2009; Jiang et al., 2016)

ด้านธาตุเหล็กนั้นถือเป็นจุลธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเป็นองค์ประกอบและช่วยสร้าง

คลอโรฟิลล์ มีความจำเป็นในการสังเคราะห์โปรตีนในคลอโรพลาสต์ เป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์ และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันในพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ในการทดลองนี้มุ่งเน้นการศึกษาถึงบทบาทของธาตุเหล็ก ซึ่งใช้ในรูปของ Fe-EDTA เนื่องจากผักกาดหอมเป็นพืชที่บริโภคใบสด ธาตุเหล็กเป็นธาตุที่มีบทบาทสำคัญต่อความเขียวของใบ ซึ่งหากพืชได้รับธาตุเหล็กไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดสภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ (ยงยุทธ, 2558) ความเขียวของใบลดลง ส่งผลถึงคุณภาพของผลผลิต ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอีดีทีเอที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอม ลักษณะการแสดงออกของพืชเมื่อได้รับธาตุเหล็กในปริมาณที่แตกต่างกัน และการสะสมและการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กในต้นผักกาดหอม

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การดำเนินการวิจัย

ทำการปลูกพืช โดยใช้ผักกาดหอมพันธุ์ปักกุ่ม ของบริษัทฉ่วยเซ่งพันธุ์พืช จำกัด เป็นพืชทดลองในโรงเรือนของภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา วางแผนการทดลองแบบ 2x5 factorial in RCBD ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ปัจจัยแรก คือ ไม้ใส่ถ่านชีวภาพ (A1) และใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับวัสดุปลูก (A2) ปัจจัยที่สอง คือ ระดับของเหล็กอีดีทีเอที่ใช้ 5 ระดับ ได้แก่ 0 (B1), 25 (B2), 50 (B3), 75 (B4) และ 100

(B5) มก. Fe/วัสดุปลูก 1 กก. ทำการปลูกผักกาดหอมในถุงเพาะชำขนาดความจุ 10 กก. โดยใช้วัสดุปลูกซึ่งเตรียมจากทราย 4 ส่วน และถ่านชีวภาพ 1 ส่วน ผสมให้เข้ากัน ส่วนชุดการทดลองที่ไม่ใช้ถ่านชีวภาพ ใช้ทรายเป็นวัสดุปลูกเพียงอย่างเดียว วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุปลูกที่ใช้ในการทดลองตามวิธีการของ National Soil Survey Center (1996) ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำวัสดุปลูกที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้วใส่ในถุงเพาะชำ ถุงละ 8 กก. และทำการผสมกับเหล็กอิตีทีโอในอัตราต่างๆ ตามชุด

การทดลอง ทุกชุดการทดลองใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในรูปของปุ๋ยยูเรีย ซูเปอร์ฟอสเฟต และโพแทสเซียมคลอไรด์อัตรา 200 มก./วัสดุปลูก 1 กก. โดยใส่หลังจากย้ายกล้าพืชลงปลูกในถุงเพาะชำแล้ว 7 วัน ด้านการปลูกพืชขึ้น เพาะกล้าผักกาดหอมในถาดหลุมโดยใช้พีทมอสส์เป็นวัสดุเพาะ เมื่อต้นกล้าอายุได้ 14 วัน จึงย้ายลงเพาะในถุงเพาะชำที่เตรียมไว้จำนวน 1 ต้น/ถุง ทำการรดน้ำทุกวัน และเก็บผลผลิตที่ 40 วัน หลังย้ายกล้าปลูก

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุปลูกที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติของวัสดุปลูก	ถ่านชีวภาพ	ทราย
ค่าพีเอช (pH)	8.55	7.80
ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนส์/ม.)	0.61	0.07
อินทรีย์วัตถุ (ก./กก.)	101.70	0.70
ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (มิลลิอิควิวเลนต์/100 ก.)	5.01	0.63
ไนโตรเจนทั้งหมด (ก./กก.)	9.90	1.00
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (ก./กก.)	4.80	0.90
โพแทสเซียมทั้งหมด (ก./กก.)	19.00	0.70
แคลเซียมทั้งหมด (มก./กก.)	3,553.73	97.11
แมกนีเซียมทั้งหมด (มก./กก.)	3,230.91	225.38
โซเดียมทั้งหมด (มก./กก.)	2,134.06	43.40
เหล็กทั้งหมด (มก./กก.)	12,177.93	4,098.20

2. การบันทึกผลการทดลอง

2.1 การเจริญเติบโต

ทำการวัดค่าความเขียวของใบที่ระยะเก็บเกี่ยวโดยเครื่อง SPAD meter (SPAD-502 Minota, Osaka, Japan) จากนั้นวัดความสูง และความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมที่ระยะเก็บเกี่ยว แล้วตัดบริเวณโคนต้นเพื่อนำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นแล้วชั่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักสด จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดชั่งน้ำหนักแห้งหลังอบอีกครั้ง (Panich-pat and Srinives, 2009)

2.2 ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืช

วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และเหล็ก โดยนำตัวอย่างพืชหลังอบแห้งมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มม. ชั่งตัวอย่างจำนวน 0.2 ก. ใส่หลอดทดลองขนาด 75 มล. โดยในการวิเคราะห์ไนโตรเจน ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 10 มล. (Bremner and Mulvaney, 1982) ส่วนการวิเคราะห์ฟอสฟอรัส

โพแทสเซียม และเหล็ก ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรดผสมซึ่งประกอบด้วยกรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริกอัตราส่วน 5 ต่อ 2 ปริมาตร 10 มล. (Pequerul et al., 1993) หลังจากย่อยสลายตัวอย่างเสร็จ วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี Kjeldahl method (Bremner and Mulvaney, 1982) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดโดยวิธีการเทียบสี (vanado-molybdate yellow color method) ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร (Murphy and Riley, 1962) ปริมาณโพแทสเซียมและเหล็ก วัดด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer

2.3 การดูดใช้ธาตุอาหารและเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กในวัสดุปลูกและในพืช

การดูดใช้ธาตุอาหาร (Nutrient uptake, NU) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหารเข้าไปในเนื้อเยื่อพืช คำนวณได้ดังสมการที่ 1 (Akinrinde and Gaizer, 2006) ส่วนค่าการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กในวัสดุปลูกและในพืช (bioconcentration and translocation factor, BCF and

TF) เป็นค่าที่ใช้เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายธาตุโลหะมาสะสมในส่วนต่างๆ ของต้น คำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3 (สายชล และธนวรรณ, 2556; Zhao et al., 2011)

$$NU = C_{\text{nutrient}} \times B \text{ ----- (1)}$$

$$BCF = (Fe_{\text{plant}}) / (Fe_{\text{growing media}}) \text{ ----- (2)}$$

$$TF = (Fe_{\text{shoot}}) / (Fe_{\text{root}}) \text{ ----- (3)}$$

เมื่อ C_{nutrient} คือ ความเข้มข้นของธาตุอาหาร (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และเหล็ก) ในเนื้อเยื่อพืช, B คือ ชีวมวลส่วนเหนือดินของพืช, Fe_{plant} คือ ความเข้มข้นของเหล็กในพืช, $Fe_{\text{growing media}}$ คือ ความเข้มข้นของเหล็กในวัสดุปลูก, Fe_{shoot} คือ ความเข้มข้นของเหล็กในส่วนเหนือดินของพืช และ Fe_{root} คือ ความเข้มข้นของเหล็กในราก

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

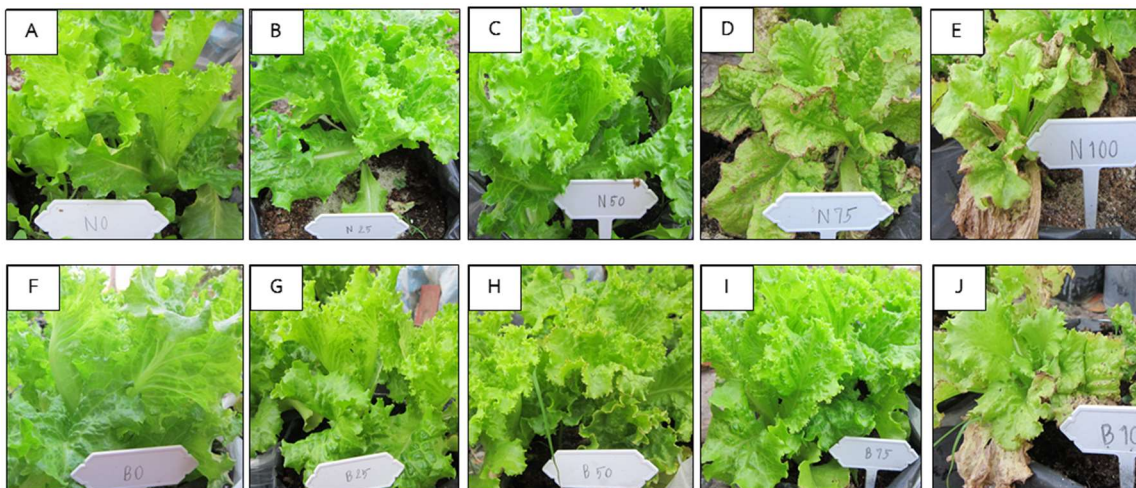
ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p \leq 0.05$)

ผลการวิจัย

1. การเจริญเติบโตของผักกาดหอม

การเจริญเติบโตของผักกาดหอมพิจารณาจากค่าความเขียวของใบ ความสูง ความกว้างทรงพุ่ม น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 2) พบว่า การใช้ถ่านชีวภาพ (A2) ทำให้ผักกาดหอมมีค่าความเขียวของใบแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เท่ากับ 18.84 ขณะที่น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งพบว่ามีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p \leq 0.01$) โดยการใช้ถ่านชีวภาพ (A2) ให้ค่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง 77.79 และ 16.54 ก. ตามลำดับ ส่วนค่าความสูงและความกว้างทรงพุ่มนั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ขณะที่การใช้เหล็กอ

ดีทีเอสส่งผลให้ผักกาดหอมมีค่าความเขียวของใบและน้ำหนักสดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$) และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตามลำดับ โดยการใช้เหล็กอดีทีเอสความเข้มข้น 25 มก. Fe/กก. (B2) ให้ค่าความเขียวของใบเท่ากับ 22.28 ซึ่งไม่แตกต่างจากชุดการทดลอง B3 ส่วนค่าน้ำหนักสดนั้นพบว่า การใช้เหล็กอดีทีเอสความเข้มข้น 50 มก. Fe/กก. (B3) ให้ค่าน้ำหนักสดสูงที่สุด ซึ่งค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง B1, B2 และ B4 ส่วนค่าความสูงนั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอดีทีเอสพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของความกว้างทรงพุ่ม ขณะที่ค่าความเขียวของใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p \leq 0.01$) โดยชุดการทดลองที่ A1B3 ให้ค่าความเขียวของใบสูงที่สุด (23.50) ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A1B2, A2B1 และ A2B2 ชุดการทดลองที่ A2B1 ให้ค่าความกว้างทรงพุ่มสูงที่สุด (20.66 ซม.) ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A1B2, A1B3, A1B5, A2B2, A2B3 และ A2B4 ชุดการทดลองที่ A2B1 ให้ค่าน้ำหนักสดสูงที่สุดเท่ากับ 93.79 ก. ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A2B2, A2B3 และ A2B4 ส่วนค่าน้ำหนักแห้งนั้นชุดการทดลองที่ A2B4 ให้ค่าน้ำหนักแห้งสูงที่สุด (17.00 ก.) ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A2B1, A2B2, A2B3 และ A2B5 การที่พืชได้รับธาตุเหล็กในความเข้มข้นสูงนั้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างชัดเจน (รูปที่ 1) โดยในชุดการทดลองที่ไม่ใช้ถ่านชีวภาพ ความเข้มข้นของเหล็กอดีทีเอส 75 มก. Fe/กก. เป็นต้นไป พืชแสดงอาการขอบใบตายอย่างชัดเจน ส่วนในชุดการทดลองที่ใช้ถ่านชีวภาพ อาการใบตายของพืชจะแสดงออกเมื่อได้รับเหล็กอดีทีเอสความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก.



รูปที่ 1 ลักษณะการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (A-E คือผักกาดหอมที่ปลูกในวัสดุปลูกที่ไม่มีถ่านชีวภาพซึ่งได้รับ FeEDTA ในอัตรา 0, 25, 50, 75 และ 100 มก. Fe/วัสดุปลูก 1 กก. ตามลำดับ ส่วน F-J คือผักกาดหอมที่ปลูกในวัสดุปลูกที่มีถ่านชีวภาพเป็นองค์ประกอบ และได้รับ Fe-EDTA ในอัตรา 0, 25, 50, 75 และ 100 มก. Fe/วัสดุปลูก 1 กก. ตามลำดับ)

2. ความเข้มข้นของธาตุอาหารในผักกาดหอม

การใช้ถ่านชีวภาพมีผลทำให้ความเข้มข้นของไนโตรเจน โปแทสเซียม และเหล็ก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) (ตารางที่ 3) ชุดการทดลองที่ไม่ใช้ถ่านชีวภาพให้ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนและเหล็กสูงที่สุด (46.23 ก./กก. และ 1,234.85 มก./กก.) ส่วนความเข้มข้นของฟอสฟอรัสไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ขณะที่การใช้เหล็กอิตีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ส่งผลให้ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) ส่วนโปแทสเซียม นั้น พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่ระดับความเข้มข้นของเหล็กอิตีทีเอ 0 มก. Fe/กก. (B1) ให้ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงที่สุด (46.53 ก./กก.) แต่ไม่แตกต่างกับชุดการทดลอง B2 และ B3 ชุดการทดลอง B5 (100 มก. Fe/กก.) ให้ค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงที่สุด (24.46 ก./กก.) แต่ไม่ต่างกันทางสถิติกับ B4 การใช้เหล็กอิตีทีเอ (0 มก. Fe/กก.) (B1) ทำให้ผักกาดหอมมีความเข้มข้นของโปแทสเซียมสูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลอง B2, B3 และ B4 ส่วนความเข้มข้นของเหล็กนั้นพบว่า

การใช้เหล็กอิตีทีเอความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก. (B5) ทำให้ผักกาดหอมมีความเข้มข้นของเหล็กสูงที่สุด (2,109.48 มก./กก.) เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีทีเอพบว่า มีปฏิสัมพันธ์ร่วมกัน มีผลให้ความเข้มข้นของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ความเข้มข้นของโปแทสเซียมและเหล็กมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) โดยชุดการทดลองที่ A1B3 ให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงที่สุด (49.70 ก./กก.) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A1B1, A1B2, A1B4, A1B5, A2B1 และ A2B2 ด้านความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืช ชุดการทดลองที่ A1B5 ให้ค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงที่สุด (25.83 ก./กก.) แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A1B4 และ A2B5 ความเข้มข้นของโปแทสเซียม นั้น พบว่าชุดการทดลองที่ A2B1 ให้ค่าโปแทสเซียมสูงที่สุด (190.23 ก./กก.) แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A2B3 และ A2B4 และส่วนความเข้มข้นของเหล็กในเนื้อเยื่อพืช ชุดการทดลองที่ A1B5 ให้ค่าความเข้มข้นของเหล็กในเนื้อเยื่อพืชสูงที่สุด (2,476.08 มก./กก.)

ตารางที่ 2 ผลของถ่านชีวภาพและเหล็กอิตีทีเอต่อค่าความเขียวใบ ความสูง ความกว้างทรงพุ่ม น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของผักกาดหอม

ชุดการทดลอง	ความเขียวใบ (SPAD unit)	ความสูง (ซม.)	ความกว้างทรงพุ่ม (ซม.)	น้ำหนักสด (ก./ต้น)	น้ำหนักแห้ง (ก./ต้น)
ถ่านชีวภาพ (A)					
ไม่ใช้ถ่านชีวภาพ (A1)	17.05 ^b	14.50	17.33	55.34 ^b	15.44 ^b
ใช้ถ่านชีวภาพ (A2)	18.84 ^a	15.60	18.40	77.79 ^a	16.54 ^a
F-test (A)	*	ns	ns	**	**
เหล็กอิตีทีเอ (B)					
0 มก. Fe/กก. (B1)	19.31 ^b	16.25	18.08	71.69 ^a	15.87
25 มก. Fe/กก. (B2)	22.28 ^a	16.33	18.83	64.52 ^{ab}	16.08
50 มก. Fe/กก. (B3)	21.15 ^{ab}	15.16	17.50	78.82 ^a	16.34
75 มก. Fe/กก. (B4)	16.25 ^c	12.83	18.06	67.65 ^a	15.99
100 มก. Fe/กก. (B5)	10.17 ^d	14.66	16.66	50.15 ^b	15.68
F-test (B)	**	ns	ns	*	ns
ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A X B)					
A1B1	17.30 ^{cd}	15.83	15.50 ^c	49.59 ^c	15.12 ^e
A1B2	22.20 ^{ab}	16.66	19.33 ^{ab}	57.66 ^c	15.87 ^{bcde}
A1B3	23.50 ^a	14.00	17.66 ^{abc}	67.73 ^{bc}	15.78 ^{cde}
A1B4	14.00 ^d	11.33	16.00 ^{bc}	48.46 ^c	14.98 ^e
A1B5	8.23 ^e	14.66	17.66 ^{abc}	53.29 ^c	15.74 ^{de}
A2B1	21.33 ^{abc}	16.66	20.66 ^a	93.79 ^a	16.61 ^{abc}
A2B2	22.36 ^{ab}	16.00	18.33 ^{abc}	71.39 ^{abc}	16.30 ^{abcd}
A2B3	18.80 ^{bc}	16.33	17.33 ^{abc}	89.90 ^{ab}	16.90 ^{ab}
A2B4	18.50 ^{bc}	14.33	20.00 ^a	86.84 ^{ab}	17.00 ^a
A2B5	13.20 ^d	14.67	15.66 ^c	47.10 ^c	15.92 ^{abcde}
F-test (AXB)	**	ns	*	**	**
%CV	12.96	14.89	9.96	19.48	3.59

**,* ค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$), ns ค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT, โดยตัวเลขที่กำกับด้วยตัวอักษร a มีค่ามากกว่าตัวเลขที่กำกับด้วยตัวอักษร b, c, d และ e ตามลำดับ

3. การดูใช้ธาตุอาหารและการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็ก

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีทีเอต่อการดูใช้ในโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และเหล็ก (รูปที่ 2) พบว่ามีผลต่อการดูใช้ในโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่โพแทสเซียม และเหล็กนั้น พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) ส่วนการดูใช้ฟอสฟอรัสนั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ชุดการทดลองที่ A1B3 (ไม่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับการใช้เหล็กอิตีทีเอ ความเข้มข้น 50 มก. Fe/กก.) ให้ค่าการดูใช้ในโตรเจนสูงที่สุด ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A1B1, A1B2,

A2B1 และ A2B2 การดูใช้โพแทสเซียมในพืชนั้น พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้เหล็กอิตีทีเอ (A2B1) ให้ค่าการดูใช้โพแทสเซียมสูงที่สุด ซึ่งไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ A2B3 และ A2B4 ส่วนการดูใช้เหล็กนั้น พบว่าชุดการทดลองที่ไม่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับการใช้เหล็กอิตีทีเอความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก. (A1B5) ให้ค่าการดูใช้เหล็กสูงที่สุด ขณะที่ชุดการทดลองที่มีการใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้เหล็กอิตีทีเอ (A2B1) ให้ค่าการดูใช้เหล็กในพืชต่ำที่สุด ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ A1B1, A1B2, A2B2, A2B3 และ A2B4

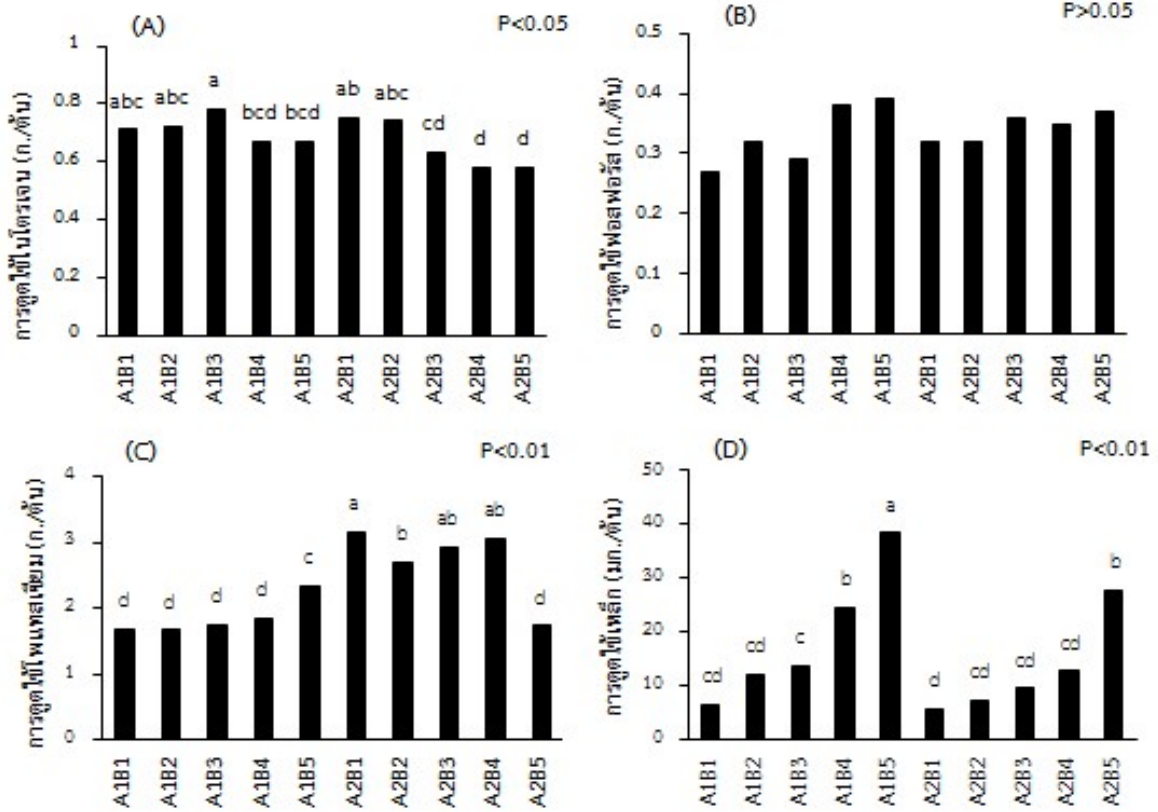
ในส่วนของการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กจากวัสดุปลูกสู่ส่วนเหนือดินของพืช และจากรากสู่ส่วนเหนือดิน พิจารณาจากค่า BCF และ TF (รูปที่ 3) จากผลการทดลอง พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ชุดการทดลองที่ไม่ใช้ถ่านชีวภาพ ร่วมกับการใช้เหล็กอิตีที่เเคความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก. (A1B5)

ให้ค่า BCF สูงที่สุด ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดการทดลองที่ A1B4 และ A2B5 ส่วนค่า TF พบว่าชุดการทดลองที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับการใช้เหล็กอิตีที่เเคความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก. (A2B5) ให้ค่า TF สูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ A1B1, A1B2, A1B4 และ A1B5

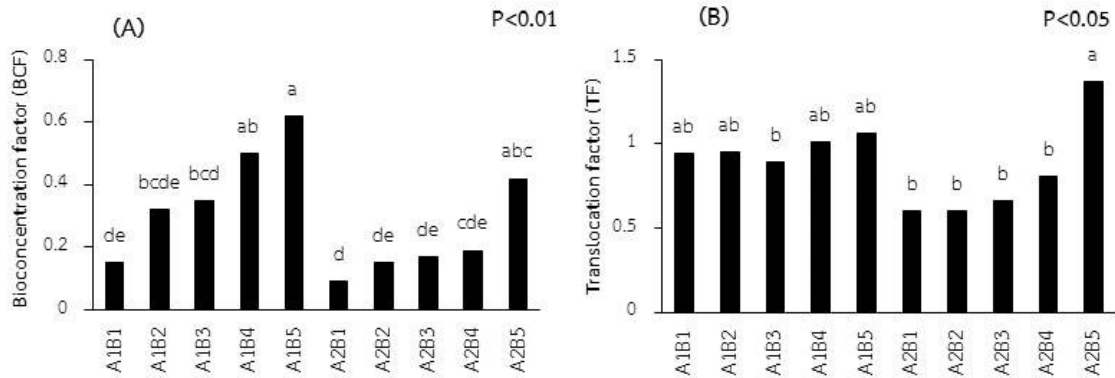
ตารางที่ 3 ผลของถ่านชีวภาพและเหล็กอิตีที่เเคต่อความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และเหล็กในผักกาดหอม

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของธาตุอาหาร (ก./กก.)			เหล็ก (มก./กก.)
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม	
ถ่านชีวภาพ (A)				
ไม่ใช้ถ่านชีวภาพ (A1)	46.23 ^a	21.80	120.26 ^b	1,234.85 ^a
ใช้ถ่านชีวภาพ (A2)	39.81 ^b	21.09	163.56 ^a	768.65 ^b
F-test (A)	**	ns	**	**
เหล็กอิตีที่เเค (B)				
0 มก. Fe/กก. (B1)	46.53 ^a	19.03 ^b	150.71 ^a	384.07 ^d
25 มก. Fe/กก. (B2)	45.43 ^a	20.23 ^b	135.68 ^{ab}	603.27 ^{cd}
50 มก. Fe/กก. (B3)	43.61 ^{ab}	20.13 ^b	142.56 ^a	715.17 ^c
75 มก. Fe/กก. (B4)	39.63 ^b	23.28 ^a	151.13 ^a	1,196.79 ^b
100 มก. Fe/กก. (B5)	39.90 ^b	24.46 ^a	130.21 ^b	2,109.48 ^a
F-test (B)	**	**	*	**
ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A X B)				
A1B1	47.50 ^a	18.30 ^c	111.20 ^d	426.86 ^{cd}
A1B2	45.53 ^a	20.40 ^{bc}	105.03 ^d	758.80 ^{cd}
A1B3	49.70 ^a	18.70 ^c	111.80 ^d	870.54 ^c
A1B4	44.86 ^a	25.80 ^a	122.96 ^d	1,641.99 ^b
A1B5	43.56 ^a	25.83 ^a	151.80 ^c	2,476.08 ^a
A2B1	45.56 ^a	19.76 ^{bc}	190.23 ^a	341.27 ^d
A2B2	45.33 ^a	20.06 ^{bcd}	66.33 ^{bc}	447.74 ^{cd}
A2B3	37.53 ^b	21.56 ^{bc}	173.33 ^{ab}	559.80 ^{cd}
A2B4	34.40 ^b	20.96 ^{bc}	179.30 ^{ab}	751.60 ^{cd}
A2B5	36.23 ^b	23.10 ^{ab}	108.60 ^d	1,742.88 ^b
F-test (AXB)	*	*	**	**
%CV	7.71	8.75	8.39	24.07

** * ค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$), ^{ns} ค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT, โดยตัวเลขที่กำกับด้วยตัวอักษร a มีค่ามากกว่าตัวเลขที่กำกับด้วยตัวอักษร b, c และ d ตามลำดับ



รูปที่ 2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างถ่านชีวภาพพร้อมกับเหล็กอิตีที่เอต่อการดูดใช้ในโตรเจน (A) ฟอสฟอรัส (B) โพลแทสเซียม (C) และเหล็ก (D) ในผักกาดหอม



รูปที่ 3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างถ่านชีวภาพพร้อมกับเหล็กอิตีที่เอต่อค่า bioconcentration factor (A) และค่า translocation factor (B) ของผักกาดหอม

วิจารณ์ผลการวิจัย

ในการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพพร้อมกับเหล็กอิตีที่เอพบว่ามันผลต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างชัดเจน โดยพิจารณาจากค่าความเขียวของใบ ความกว้างของทรงพุ่ม น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง การใช้ถ่านชีวภาพนั้นมีผลให้ผักกาดหอมสามารถ

เจริญเติบโตได้ดีกว่าการไม่ใช้ถ่านชีวภาพ ดังเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเขียวของใบ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 2) สอดคล้องกับ จาวภา และคณะ (2560) ที่ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินและการเจริญเติบโตของข้าวนาหว่านน้ำตม พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพมีผลต่อการเจริญเติบโตของ

ข้าวในระยะแรก ที่อายุ 30 และ 45 วันหลังหว่านข้าว โดยทำให้ข้าวมีความสูง จำนวนหน่อ/ต้น พื้นที่ใบ น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน สูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ Pandian et al. (2016) ศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดินและผลผลิตถั่วลิสงในดินอัลฟิโซลส์เขตกึ่งร้อน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดินได้ดีและช่วยเพิ่มผลผลิตถั่วลิสงได้มากกว่าการไม่ใช้ถ่านชีวภาพถึง 29 เปอร์เซ็นต์ ด้านการใช้เหล็กอิตีทีเอนั้น พบว่าความเข้มข้น 50 มก. Fe/กก. ช่วยส่งเสริมให้ผักกาดหอมมีน้ำหนักสดสูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาข้อมูล (ตารางที่ 2) พบว่าความเข้มข้นของเหล็กอิตีทีเอในช่วงระหว่าง 0-75 มก. Fe/กก. ให้ค่าน้ำหนักสดของผักกาดหอมไม่แตกต่างกัน ขณะที่ค่าความเขียวของใบนั้น พบว่าความเข้มข้นของเหล็ก 25 มก. Fe/กก. ทำให้ผักกาดหอมมีความเขียวสูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างจากการใช้ที่ความเข้มข้น 50 มก. Fe/กก. ธาตุเหล็กถือเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อพืชมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโต ช่วยในการสร้างคลอโรฟิลล์ ดังนั้นหากพืชได้รับธาตุเหล็กไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดอาการเหลืองซีด แต่หากได้รับในปริมาณมากเกินไป จะมีผลทำให้เกิดอาการใบแห้งตาย การเจริญเติบโตของใบและรากลดลง (ยงยุทธ, 2558) Ramirez and Lang (1997) ศึกษาความเข้มข้นของธาตุเหล็กต่อการเจริญเติบโตและการเกิดอาการเหลืองซีดในต้น Holiday cactus พบว่า การเพิ่มขึ้นของระดับความเข้มข้นเหล็กส่งผลให้พืชมีน้ำหนักแห้งและความสูงลดลง ในทางตรงข้ามความเข้มข้นของเหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้พืชแสดงอาการซีดเหลืองเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ โดยจากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ความเข้มข้นของเหล็กอิตีทีเอ 75 มก. Fe/กก. พืชแสดงอาการขอบใบตาย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 100 มก. Fe/กก. พืชมีการแสดงอาการใบตายเพิ่มมากขึ้น ส่วนในชุดการทดลองที่มีการใช้ถ่านชีวภาพพืชเริ่มแสดงอาการใบตายอย่างชัดเจนที่ระดับความเข้มข้นเหล็ก 100 มก. Fe/กก. ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ถ่านชีวภาพสามารถลดความเป็นพิษของเหล็กที่มากเกินไปได้ เนื่องจากถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้ดี มีความพรุนในตัวสูง คุณสมบัติเหล่านี้จึงมีส่วนสำคัญในการช่วยลดระดับความเป็นพิษของธาตุอาหารพืชส่วนเกินได้ (Lehmann, 2007; Thammasom et al., 2016) และจากข้อมูลปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างถ่านชีวภาพ และเหล็กอิตีทีเอ จะเห็นได้ว่าการใช้ถ่าน

ชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีทีเอความเข้มข้นตั้งแต่ 0-75 มก. Fe/กก. ให้ค่าความกว้างทรงพุ่ม น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกัน อาจกล่าวได้ว่าการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีทีเอในช่วงความเข้มข้น 0-75 มก. Fe/กก. ไม่มีผลในการส่งเสริมการเจริญเติบโต แต่อัตราความเข้มข้นของเหล็กที่สูงกว่า 75 มก./กก. จะมีผลในการลดการเจริญเติบโตของผักกาดหอม

ความเข้มข้นและการดูดใช้ธาตุอาหารพิจารณาจากธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และธาตุเหล็กซึ่งเป็นธาตุที่เติมลงไปเพื่อเป็นตัวแปรในการศึกษานี้ โดยการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีทีเอพบปฏิสัมพันธ์ด้านความเข้มข้นและการดูดใช้ธาตุอาหารอย่างชัดเจน ระดับเหล็กอิตีทีเอที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนและโพแทสเซียมในพืชลดลง ในทางตรงข้ามการเพิ่มความเข้มข้นของเหล็กอิตีทีเอทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและเหล็กในพืชเพิ่มมากขึ้น อันตรกิริยาของธาตุเหล็กต่อธาตุอาหารหลัก (ไนโตรเจน และโพแทสเซียม) ส่วนใหญ่นั้นมีผลในเชิงลบ (ยงยุทธ, 2558) เนื่องจากการดูดใช้ธาตุเหล่านี้พืชจะดูดในรูปของแคตไอออน (NH_4^+ และ K^+) ทำให้เกิดการแก่งแย่งกับธาตุเหล็กซึ่งพืชจะดูดใช้ในรูป Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} ซึ่งเป็นรูปของแคตไอออนเพื่อเข้าสู่รากพืชเช่นเดียวกัน ซึ่งกรณีนี้ในสารละลายดินหรือในวัสดุปลูกมี Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} ในปริมาณมาก พืชจึงดูดใช้ในไนโตรเจนและโพแทสเซียมได้ลดลง ในทางตรงข้ามการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพืชจะดูดในรูปของ H_2PO_4^- หรือ HPO_4^{2-} ซึ่งเป็นรูปของแอนไอออนทำให้ไม่เกิดการแก่งแย่งในการเข้าสู่รากพืชเหมือนธาตุที่อยู่ในรูปแคตไอออน ฟอสฟอรัสจึงมีโอกาสในการถูกดูดใช้มากกว่าธาตุอาหารหลักตัวอื่น (Robson and Pitman, 1983; Fageria, 2001) และจากการทดลองจะเห็นว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพทำให้ความเข้มข้นของเหล็กในพืชสูงกว่าการใช้ถ่านชีวภาพ ซึ่งเป็นเพราะการทดลองนี้ใช้เหล็กในรูปของเหล็กอิตีทีเอ ซึ่งจัดอยู่ในรูปของเหล็กคีเลตเหล็กในรูปนี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ที่จะทำให้เกิดการตกตะกอน ดังนั้นพืชจึงสามารถดูดเหล็กไปสะสมในส่วนต่างๆ ได้ง่าย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) แต่ถ่านชีวภาพนั้นเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี อันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของตัวถ่านเอง ดังนั้นในชุดการทดลองที่ไม่มีการใช้ถ่านชีวภาพ พืชจึงดูดเหล็กไปสะสมได้มากกว่าชุดการทดลองที่มีการใช้ถ่านชีวภาพ เพราะเหล็กสามารถละลายออกมาได้อย่างเต็มที่และไม่ถูกดูดซับ ความเข้มข้นของ

เหล็กที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความเข้มข้นของเหล็กในผักกาดหอมเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากรูปของธาตุเหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้ง่าย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเหล็กอิตีที่เอจึงมีผลให้ความเข้มข้นของเหล็กในพืชสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สุณิสา และคณะ (2553) ที่ศึกษาผลของปุ๋ยเหล็กอิตีที่เอ เหล็กดีทีพีเอ และเหล็กอิตีเอชต่อผลผลิตของข้าวโพดหวานที่ปลูกในดินเหนียว พบว่าการให้ปุ๋ยเหล็กชนิดต่างๆ ในอัตราสูงขึ้นไปมีผลให้พืชดูดใช้ธาตุเหล็กได้สูงขึ้นตามไปด้วย

ด้านการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กในพืชนั้น พบว่าการให้เหล็กอิตีที่เอในปริมาณมากที่สุดของการทดลอง (100 มก. Fe/กก.) พืชสามารถเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กจากในวัสดุปลูกมาสะสมในส่วนเหนือดินได้มากที่สุด (BCF) ขณะที่การเคลื่อนย้ายเหล็กจากรากสู่ส่วนเหนือดิน (TF) ให้ผลการทดลองคล้ายกัน โดยชุดการทดลองที่มีการใช้ถ่านชีวภาพในช่วง 0-75 มก. Fe/กก. มีผลต่อการเคลื่อนย้ายเหล็กที่ลดลงอย่างชัดเจน ส่วนชุดการทดลองที่ให้เหล็กอิตีที่เอความเข้มข้น 100 มก. Fe/กก. มีผลทำให้เหล็กเคลื่อนย้ายสู่ส่วนเหนือดินได้สูงที่สุด การเคลื่อนย้ายเหล็กในปริมาณมากที่สุดของการทดลองนั้นมีอิทธิพลมาจากการใช้เหล็กความเข้มข้นสูง ถึงกระนั้นการเคลื่อนย้ายเหล็กมาสะสมในส่วนเหนือดินในปริมาณมากกลับมีผลเชิงลบต่อพืช เนื่องจากผักกาดหอมไม่ใช่พืชในกลุ่ม hyperaccumulator ของธาตุเหล็ก การที่เหล็กเคลื่อนที่มาสะสมในส่วนเหนือดินมากเกินไปจึงทำให้พืชแสดงความเป็นพิษออกมา (รูปที่ 1D, 1E และ 1J) ส่งผลให้เกิดภาวะแคะแกร็น ใบตาย และไม่เจริญเติบโต พืชส่วนใหญ่ที่เป็นกลุ่ม hyperaccumulator ที่สามารถสะสมธาตุโลหะไว้ในส่วนเหนือดินในปริมาณสูงมักเป็นกลุ่มของวัชพืช ซึ่งจะมีค่า BCF และ TF สูงกว่า 1 (อลิสา, 2553; สายชล, 2556) Broschat and Moore (2004) ศึกษาความเป็นพิษของปุ๋ยเหล็กชนิดต่างๆ และผลต่อปริมาณธาตุเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และฟอสฟอรัสในต้นดาวเรืองแอฟริกันและต้นผีเสื้อ พบว่า การใช้เหล็กอิตีที่เอเพียง 1 ไมโครโมลาร์ ทำให้ต้นผีเสื้อแสดงความเป็นพิษอย่างรุนแรงและตายทั้งหมดเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 4 ไมโครโมลาร์ ขณะที่ดาวเรืองแอฟริกันไม่แสดงอาการเป็นพิษแม้ได้รับเหล็กอิตีที่เอความเข้มข้นสูงถึง 6 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเป็นความ

เข้มข้นสูงที่สุดที่ใช้ในการทดลอง ขณะที่ Bhat et al. (2016) ศึกษาการใช้ต้นบัวบกเพื่อบำบัดธาตุเหล็กในดินสีแดงเขตร้อน พบว่าต้นบัวบกมีประสิทธิภาพสูงในการสะสมเหล็กในส่วนเหนือดิน ซึ่งสามารถจัดอยู่ในกลุ่มพืชที่เป็น hyperaccumulator ได้ เนื่องจากให้ค่า BCF สูงกว่า 1 ส่วนผักกาดหอมที่ใช้เป็นพืชทดลองในครั้งนี้ยังไม่จัดอยู่ในพืชกลุ่ม hyperaccumulator เนื่องจากค่า BCF ที่ได้จากการทดลองน้อยกว่า 1 ส่วนค่า TF นั้นถึงแม้ว่าชุดการทดลองที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอความเข้มข้น 100 มก./กก. นั้นให้ค่า TF สูงกว่า 1 แต่เมื่อพิจารณาจากลักษณะการเจริญเติบโตแล้ว (รูปที่ 1J) จะเห็นว่าพืชแสดงความเป็นพิษเนื่องจากเหล็กอย่างชัดเจน จึงไม่สามารถจัดเป็นพืชในกลุ่ม hyperaccumulator ของธาตุเหล็กได้

สรุปผลการวิจัย

การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอมีผลให้การเจริญเติบโต ผลผลิต การดูดใช้ธาตุอาหาร และความสามารถในการเคลื่อนย้ายเหล็กในผักกาดหอมมีความแตกต่างกัน ชุดการทดลองที่ไม่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับการใช้เหล็กอิตีที่เอที่ความเข้มข้นสูงกว่า 75 มก. Fe/กก. ผักกาดหอมแสดงอาการเป็นพิษอย่างชัดเจน ส่วนการใช้ถ่านชีวภาพลักษณะอาการเป็นพิษจะแสดงเมื่อผักกาดหอมได้รับเหล็กอิตีที่เอ 100 มก. Fe/กก. การใช้ถ่านชีวภาพให้ผลในเชิงบวกต่อการเจริญเติบโต ขณะที่การเพิ่มระดับเหล็กอิตีที่เอทำให้ ความเขียวของใบ และน้ำหนักสดของผักกาดหอมมีค่าลดลง การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับเหล็กอิตีที่เอที่ความเข้มข้น 0-75 มก. Fe/กก. ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอม แต่ความเข้มข้นที่สูงกว่านี้มีผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิตลดลง ระดับเหล็กอิตีที่เอที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของไนโตรเจน และโพแทสเซียมในผักกาดหอมมีค่าลดลง ขณะที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่การให้เหล็กอิตีที่เอความเข้มข้นสูงสุดของการทดลอง (100 มก. Fe/กก.) ทำให้ธาตุเหล็กสามารถเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนเหนือดินของผักกาดหอมได้สูงที่สุด ซึ่งส่งผลในเชิงลบต่อการเจริญเติบโต เนื่องจากผักกาดหอมแสดงความเป็นพิษ เกิดอาการใบตาย และการเจริญเติบโตลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่างทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2548). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 351-353.
- จาวภา มะนาวนอก สันติไมตรี ก้อนคำดี เกษสุดา เดชภิมล วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์ พลพินิจ และดร.ณัฏ โขติชธูยางกูร. (2560) ถ่านชีวภาพ: ผลต่อคุณสมบัติของดินและการเจริญเติบโตของข้าวนาหว่านน้ำตาม (การทดสอบในสภาพกระถาง). วารสารแก่นเกษตร 45: 209-220.
- ยงยุทธ โอสดสภา. (2558). ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 311-334.
- สายชล สุขญาณกิจ. (2556). การเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ: 64 หน้า
- สายชล สุขญาณกิจ และชนวรรณ พาณิชพัฒน์. (2556). เปรียบเทียบการเจริญเติบโตและการสะสมตะกั่วของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 41(4): 996-1007.
- สุนิสา ผิ่วราไพ จงรักษ์ จันท์เจริญสุข และสุเทพ ทองแพ. (2553). ผลของปุ๋ยเหล็กอิตีทีเอ เหล็กดีทีพีเอ และเหล็กอิตีดีเอต่อผลผลิตของข้าวโพดหวานที่ปลูกในดินเนื้อปูน. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 สาขาพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 1-8.
- อลิสาวังใน. (2553). การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 243-254.
- Akinrinde, E. A. and Gaizer, T. (2006). Differences in the performance and phosphorus use efficiency of some tropical rice (*Oryza sativa* L.) varieties. Pakistan Journal of Nutrition 5: 206-211.
- Bhat, I.U., Mauris, E.N. and Khanam, Z. (2016). Phytoremediation of iron from red soil of tropical region by using *Centella asiatica*. International Journal of Phytoremediation 18: 918-923.
- Bremner, J.M. and Mulvaney, C.S. (1982). Nitrogen – Total. In Methods of Soil Analysis Part 2 – Chemical and Microbiological Properties. Wisconsin. Amer. Soc. Agron. Inc. pp 595-624.
- Broschat, T.K. and Moore, K.K. (2004). Phytotoxicity of several iron fertilizer and their effect on Fe, Mn, Zn, Cu and P content of African marigolds and zonal geraniums. HortScience 39: 595-598.
- Chen, Y., Shinogi, Y. and Taira, M. (2010). Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. Australian Journal of Soil Research 48: 526-530.
- Fageria, V.D. (2001). Nutrient interaction in crop plants. Journal of Plant Nutrition 24: 1269-1290.
- Fellet, G., Marchiol, L., Vedove, G.D. and Peressotti, A. (2011). Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation. Chemosphere 83: 1262-1267.
- Jiang, X., Haddix, M.L. and Cotrufo, M.F. (2016). Interactions between biochar and soil organic carbon decomposition: Effects of nitrogen and low molecular weight carbon compound addition. Soil Biology and Biochemistry 100: 92-101.
- Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I. and Xu, X. (2009). Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. Soil Biology and Biochemistry 41: 210-219.
- Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B. and Karlen, D.L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. Geoderma 158: 443-449.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. Frontiers in Ecology and the Environment 5: 381-387
- Liu, X., Li, L., Bian, R., Chen, D., Qu, J., Kibue, G.W., Pan, G., Zhang, X., Zheng, J. and Zheng, J. (2014). Effect of biochar amendment on soil-silicon availability and rice uptake. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177: 91-96.
- Murphy, J. and Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta 27: 31-36.
- National Soil Survey Center. (1996). Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report No.

- 42, Version 3.0. Washington, D.C: Natural Resources Conservation Service, USDA.
- Pandian, K. , Subramaniayan, P. , Gnasekaran, P. and Chitraputhirapillai, S. (2016) . Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi- arid tropics. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62: 1293-1310.
- Panich-pat, T. and Srinives, P. (2009) . Partitioning of lead accumulation in rice plant. *Thai Journal of Agricultural Science* 42: 35-40.
- Pequerul, A., Pérez,C. Madero, P. Val, J. and Monge, E. (1993). A rapid wet digestion method for plant analysis. *In Optimization of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers. pp. 3-6.
- Ramirez, D. and Lang, H. J. (1997) . Effect of applied iron concentration on growth and phylloclade marginal chlorosis of Holiday cactus (*Schlumbergera* sp.) . *Journal of the American Society for Horticultural Science* 122: 438-444.
- Robson, A.D. and Pitman, J.B. (1983). Interaction between nutrient in higher plants. *In Inorganic Plant Nutrient: Encyclopedia of Plant Physiology*. New York: Springer-Verlag. pp. 147-180.
- Steinbeiss, S., Gleixner, G. and Antonietti, M. (2009). Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1301-1310.
- Thammasom, N., Vityakon, P. Lawongsa, P. and Saenjana P. (2016). Biochar and rice straw have different effects on soil productivity, greenhouse gas emission and carbon sequestration in Northeast Thailand paddy soil. *Agriculture and Natural Resources* 50: 192-198.
- Zhao, W.W., Nan, Z. R., Wang, S.L. and Zhao, Z.J. (2011). Accumulation and distribution of cadmium and lead in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils from the oasis, North- West China. *Journal of Science Food and Agriculture* 91: 377-384.

