

การเสริมธาตุเหล็กและสังกะสีของผักสลัดที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์

Iron and Zinc Biofortification of Hydroponic Lettuce

หัตถยา คงสุข^{1,2} อัจฉรา เพ็งหนู^{1,2*} และจุฑามาศ แก้วมโน^{1,2}

Hutthaya Khongsuk^{1,2}, Ashara Pengnoo^{1,2*} and Chutharmard Kaewmano^{1,2}

¹สาขาวิชาวนวัฒนกรรมเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

²ศูนย์วิจัยควบคุมศัตรูพืชโดยชีวินทรีย์แห่งชาติ ภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

¹Agricultural Innovation and Management Division, Faculty of Natural Resources,
Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla, Thailand 90110

²Natural Biological Control Research Center, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla, Thailand 90110

*Corresponding author: ashara.p@psu.ac.th

Abstract

Received: August 02, 2021

Revised: October 18, 2021

Accepted: January 28, 2022

Nowadays, an inadequate daily intake of iron and zinc is a widespread problem. This led to the study of the effect of biofortification by iron or zinc on growth and nutrients content in hydroponic lettuce. The experiment design was Factorial in Randomized Complete Block Design with green cos, frillice iceberg, green oak, red oak and butterhead and nutrient solution (control formula, Fe addition formula and Zn addition formula). The result showed that Fe or Zn fortified lettuce grow normally without nutrient toxicity or deficiency. Green cos, frillice iceberg and red oak cultivated in Fe addition formula showed no significant differences in growth when compared with the control formula. It also increased Fe content 1.3-2.3 times, with frillice iceberg obtain the highest Fe content (471.93 mg/kg dry weight). The content of P, Ca, Mg, and Mn tended to increase but Zn and Cu content tended to decrease. When adding Zn addition formula, red oak's whole fresh weights increased 58%. Zn content in lettuce increased 4.2-18.9 times, especially in butterhead and red oak (376.67 and 365.80 mg/kg dry weight, respectively). The addition Zn increased Ca content but P, K, Fe, Mn, and Cu content tended to decrease, except for red oak which Fe content increase 1.1 times. The maximum Fe and Zn content in edible part fresh weight of frillice iceberg and butterhead were 3.02 and 2.64 mg/kg which did not exceed the daily intake of iron and zinc standard. It could be upgraded to a functional vegetable in the future.

Keywords: iron, zinc, biofortification, lettuce, hydroponic

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการได้รับธาตุเหล็กและสังกะสีที่ไม่เพียงพอต่อร่างกายในแต่ละวัน กำลังเป็นปัญหาที่พบในวงกว้าง จึงนำมาสู่การศึกษาผลของการเพิ่มธาตุเหล็กและสังกะสี ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณธาตุอาหารในผักสลัดที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยวางแผนการทดลองแบบ Factorial in Randomized Complete Block Design ประกอบด้วยผักสลัดพันธุ์กรีนคอส ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค และบัตเตอร์เฮด และสารละลายธาตุอาหารสูตรควบคุม สูตรเพิ่มเหล็กและสูตรเพิ่มสังกะสี ผลการวิจัยพบว่า ผักสลัดเสริมธาตุเหล็กหรือสังกะสีสามารถเจริญเติบโตได้โดยไม่แสดงอาการเป็นพิษ หรือขาดธาตุอาหาร สูตรเพิ่มเหล็กทำให้การเจริญเติบโตของกรีนคอส ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก และเรดโอ๊คไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม ผักสลัดมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น 1.3-2.3 เท่า โดยฟิลเลย์ไอซ์เบิร์กมีปริมาณเหล็กสูงสุด (471.93 มก./กก. น้ำหนักแห้ง) สำหรับปริมาณฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีสของผักสลัด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนสังกะสีและทองแดงมีแนวโน้มลดลง ขณะที่สูตรเพิ่มสังกะสีทำให้เรดโอ๊คมีน้ำหนักสดทั้งต้นเพิ่มขึ้น 58% ปริมาณสังกะสีของผักสลัดเพิ่มขึ้น 4.2-18.9 เท่า โดยบัตเตอร์เฮดและเรดโอ๊คมีปริมาณสังกะสี 376.67 และ 365.80 มก./กก. น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การเพิ่มสังกะสีทำให้ปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัส โพแทสเซียม เหล็ก แมงกานีส และทองแดง มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นปริมาณเหล็กของเรดโอ๊คที่เพิ่มขึ้น 1.1 เท่า ปริมาณเหล็กและสังกะสีสูงที่สุดในน้ำหนักสดส่วนที่รับประทานได้ของฟิลเลย์ไอซ์เบิร์กและบัตเตอร์เฮด เท่ากับ 3.02 และ 2.64 มก./กก. น้ำหนักสด ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่าปริมาณเหล็กและสังกะสีที่ร่างกายควรได้รับในแต่ละวัน แสดงให้เห็นว่าการเสริมธาตุเหล็กและสังกะสี เป็นแนวทางการพัฒนาผักสลัดเพื่อสุขภาพได้ในอนาคต

คำสำคัญ: เหล็ก สังกะสี การเสริมธาตุอาหาร ผักสลัด ไฮโดรโปนิกส์

คำนำ

การผลิตผักสลัดในระบบไฮโดรโปนิกส์ เป็นระบบที่สามารถปลูกผักได้ต่อเนื่องตลอดทั้งปี ใช้พื้นที่ปลูกน้อย มีการใช้น้ำและจัดการธาตุอาหารที่ผักต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของผักได้ โดยผักสลัดที่ปลูกในประเทศไทยสามารถแบ่งกลุ่มตามลักษณะเด่นได้ดังนี้ 1) กลุ่มคอส (Cos) หรือโรมเมน (Romaine) แผ่นใบใหญ่ ก้านใบหนา และลำต้นใหญ่ เช่น พันธุ์กรีนคอส 2) กลุ่มคริสป์เฮด (Crisphead) ใบห่อเข้าหากัน ใบบาง กรอบ และขอบใบหยัก เช่น พันธุ์ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก 3) กลุ่มลีฟ (Leaf) ไม่มีการห่อหัว ใบหยักเป็นคลื่นหรือย่น เช่น พันธุ์กรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค 4) กลุ่มบัตเตอร์เฮด (Butterhead) เป็นพวกห่อหัวเข้าหากันอย่างหลวม ๆ ใบข้างนอกมีสีเขียว ข้างในสีขาวหรือสีเหลือง เช่น พันธุ์บัตเตอร์เฮด เป็นต้น (Kim *et al.*, 2016) ผักสลัดเป็นแหล่งวิตามิน แร่ธาตุ และสารพฤกษเคมีหลากหลายชนิดที่จำเป็นต่อร่างกาย โดยทั่วไปแล้วมนุษย์ควรบริโภคผักและผลไม้วันละไม่ต่ำกว่า 400 กรัม แต่ประชากรไทยร้อยละ 65.5 (53 ล้านคน) บริโภคผักและผลไม้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Phulkerd *et al.*, 2020) ด้วยส่วนหนึ่งผู้บริโภคมีความกังวลในเรื่องของสารเคมีตกค้าง โดยเฉพาะสารกำจัดศัตรูพืช แต่การผลิตผักสลัดในระบบไฮโดรโปนิกส์มีการใช้วัฏกรรมควบคุมศัตรูพืชโดยชีววิธี โดยการใช้ชีวภัณฑ์ *Bacillus subtilis* (B-Veggie) เพื่อป้องกันและควบคุมโรครากเน่าและใบจุด และใช้เชื้อราบีเวอร์เรีย (*Beauveria bassiana*) เพื่อควบคุมแมลงศัตรูผัก (Pengnoo *et al.*, 2016)

สำหรับธาตุเหล็กและสังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช หากพืชได้รับธาตุเหล็กไม่เพียงพอจะแสดงอาการซีดเหลืองที่ใบอ่อน (Rout and Sahoo, 2015) และแสดงอาการขาดสังกะสี โดยใบอ่อนมีขนาดเล็กกว่าปกติ สีเหลืองซีดมีจุดสีแดงขึ้นตามแผ่นใบ รากสั้น ลำต้นแคระแกร็น นอกจากนี้ยังเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อระบบการทำงานของร่างกายมนุษย์ โดยร่างกายควรได้รับเหล็กและสังกะสี 8-15 และ 5-15 มก./วัน ตามลำดับ (Institute of Medicine (U.S.) and Panel on Micronutrients, 2001) ซึ่งโดยปกติแล้วเหล็กและสังกะสี พบได้ทั่วไปในอาหารจำพวกเนื้อสัตว์และอาหารทะเล จึงทำให้ผู้ที่รับประทานอาหารมังสวิรัตหรือผู้ที่แพ้เนื้อสัตว์บางชนิด ได้รับธาตุเหล็กและสังกะสีน้อยกว่าคนทั่วไป อย่างไรก็ตามการเสริมธาตุเหล็กและสังกะสีในพืชเป็นวิธีเพิ่มคุณประโยชน์ของเหล็กและสังกะสีให้กับพืชที่น่าสนใจ ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการเพิ่มธาตุเหล็กและสังกะสี ที่มีต่อการเจริญเติบโตและปริมาณธาตุอาหารในผักสลัดที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ นำมาซึ่งแนวทางเสริมธาตุเหล็กและสังกะสีที่เหมาะสมกับผักสลัดแต่ละพันธุ์ และได้ผักสลัดที่มีคุณภาพ มีปริมาณเหล็กและสังกะสีสูง สามารถต่อ ยอดเป็นผักทางเลือกเพื่อสุขภาพ (Functional vegetable) และเพิ่มมูลค่าของผักสลัดได้อีกทางหนึ่งด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

การวางแผนการทดลอง: วางแผนการทดลองแบบ Factorial in Randomized Complete Block Design เปรียบเทียบพันธุ์ผักสลัด 5 พันธุ์ (กรีนคอส ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค และบัตเตอร์เฮด) และสารละลายธาตุอาหาร 3 สูตร (ควบคุม เพิ่มเหล็ก และสังกะสี) ทั้งหมด 4 ซ้ำ ซ้ำละ 2 ต้น ดำเนินการทดลองในสภาพแปลง ณ ศูนย์วิจัยควบคุมศัตรูพืชโดยชีวนทรีย์แห่งชาติ ภาคใต้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เริ่มเพาะเมล็ดผักบนฟองน้ำ เมื่อครบ 7 วัน ย้ายต้นกล้า

ลงชุดปลูกแบบ Deep Root Floating Technique (DRFT) ขนาด 1.2x3.4 เมตร ระยะปลูก 20x22 ซม. ใช้ชีวภัณฑ์ขยาย *Bacillus subtilis* (B-Veggie) ปริมาตร 1 ลิตร เพื่อป้องกันโรคและส่งเสริมการเจริญเติบโตของผัก ระบบปลูกมีสารละลายธาตุอาหาร 120 ลิตร โดยมีปริมาณธาตุอาหารทั้งหมด (มก./ลิตร) ไนโตรเจน 347.80 ฟอสฟอรัส 74.40 โพแทสเซียม 441.10 แคลเซียม 319.70 แมกนีเซียม 53.00 กำมะถัน 67.50 โบรอน 0.76 ทองแดง 0.85 เหล็ก 6.70 สังกะสี 0.76 แมงกานีส 0.81 โมลิบดีนัม 0.0045 และนิกเกิล 0.0002 กำหนดให้เป็นสูตรควบคุม เมื่อผักอายุ 30, 33 และ 35 วัน ทดสอบเพิ่มเหล็ก 8.83 มก./ลิตร ให้เป็นสูตรเพิ่มเหล็ก และเพิ่มสังกะสี 21.15 มก./ลิตร ให้เป็นสูตรเพิ่มสังกะสี

การเก็บบันทึกข้อมูล: เก็บผลผลิตที่ 38 วัน นับจากวันเพาะเมล็ด โดยชั่งน้ำหนักสดหลังตัดแต่ง น้ำหนักส่วนที่กินได้ (ใบสด) จากนั้นล้างใบสดด้วยน้ำกลั่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C. จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ บันทึกน้ำหนักแห้ง และนำไปหั่งบดละเอียดเพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร ย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกแล้ววิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี Kjeldahl ย่อยด้วยกรดผสมไนตริกและเปอร์คลอริกในอัตราส่วน 3:1 แล้ววิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสด้วยเครื่อง Visible spectrophotometer และปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี แมงกานีส และทองแดง ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Kalra, 1998)

การวิเคราะห์ข้อมูล: วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและวัดอิทธิพลของพันธุ์ผักสลัด สูตรสารละลายธาตุอาหาร และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ผักสลัดและสูตรสารละลายธาตุอาหาร ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Statistical Analysis Program (SPSS ver. 26) และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกรรมวิธี ด้วยวิธี Fisher's Least Significant Difference (LSD) และ Duncan's New Multiple Range Tests (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัยและวิจารณ์

การเจริญเติบโตของผักสลัด: พันธุ์ผักสลัดมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด (Table 1) แสดงให้เห็นว่ากรีนคอสมีการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งส่วนที่รับประทานได้สูงสุด (10.26 กรัม) อาจเนื่องมาจากลักษณะทางสรีระของกรีนคอสที่มีแผ่นใบใหญ่ ก้านใบหนา และลำต้นมีขนาดใหญ่ อาจสามารถในการดูดใช้น้ำและธาตุอาหารมากกว่าผักสลัดกลุ่มอื่น (Di Gioia *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักสดทั้งต้น น้ำหนักสดส่วนที่รับประทานได้ และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ของผักสลัดกลุ่มเดียวกันมีแนวโน้มไม่แตกต่างกัน โดยกรีนคอส ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก บัตเตอร์เฮด เป็นผักสลัดกลุ่มที่มีลักษณะทรงพุ่มขนาดใหญ่ แผ่นใบหนา อาจทำให้ดูดใช้น้ำและธาตุอาหารได้มากกว่ากรีนโอ๊คและเรดโอ๊คซึ่งเป็นผักสลัดกลุ่มลิฟ (Leaf) (Kim *et al.*, 2016) เมื่อทดสอบอิทธิพลของพันธุ์ร่วมกับสูตรสารละลายธาตุอาหาร ต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด (Table 2) ในสูตรเพิ่มเหล็ก พบว่ากรีนคอส ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก และเรดโอ๊ค มีการเจริญเติบโตทุกด้านไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเป็นผลจากอิทธิพลร่วมของพันธุ์ผักสลัดและสูตรเพิ่มเหล็ก เพราะกรีนคอส ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก เป็นผักสลัดกลุ่มที่ดูดใช้เหล็กได้มาก (Kim *et al.*, 2016) และธาตุเหล็กเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมในพืช เป็นองค์ประกอบในโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในไมโทคอนเดรีย และคลอโรพลาสต์ และโปรตีนชนิดอื่น ๆ มีบทบาทในการสังเคราะห์ฮอร์โมนพืช เช่น จิบเบอเรลลิน เอทิลีน และกรดจัสโมนิก และไอออนของเหล็กเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์พวก Nonhaem-enzyme เป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบินในโครงสร้างของฮีโมโกลบิน อีกทั้งเหล็กที่อยู่ในรูปของเหล็ก-กำมะถันคลอโรฟิลล์

ทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์หลายชนิด (Balk and Schaedler, 2014; Rout and Sahoo, 2015) การเพิ่มเหล็กอาจไปเร่งกระบวนการดังกล่าวและสร้างเสริมความแข็งแรงให้ผักสลัด ทำให้สามารถทนต่อภาวะเหล็กสูงได้มากขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มเหล็กในถั่วเขียวและมันสำปะหลัง ที่ทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Freitas *et al.*, 2015; Majeed *et al.*, 2020)

สำหรับเรดโอ๊คมีใบสีม่วงแดง ธาตุเหล็กที่เพิ่มขึ้นอาจเปลี่ยนรูปเป็นแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) (Shi *et al.*, 2017; Giordano *et al.*, 2019) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีสีแดงและสะสมที่ใบผัก ดังนั้น เหล็กที่เพิ่มขึ้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค อย่างไรก็ตาม กรีนโอ๊คและบัตเตอร์เฮดสูตรเพิ่มเหล็กมีน้ำหนักสดลดลง 25 และ 26% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม อาจเกิดจากผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊คและบัตเตอร์เฮดทนต่อเหล็กได้น้อยกว่าพันธุ์อื่น ขณะที่สูตรเพิ่มสังกะสีทำให้บัตเตอร์เฮดมีการเจริญเติบโตทุกด้านไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม อาจเป็นเพราะกลไกทางสรีรวิทยาของผักสลัดกลุ่มบัตเตอร์เฮดที่ตอบสนองต่อธาตุสังกะสีได้ดี (Kim *et al.*, 2016) ส่วนเรดโอ๊คในสูตรเพิ่มสังกะสีมีน้ำหนักสดทั้งต้นเพิ่มขึ้น 58% เนื่องจากสังกะสีเป็นตัวกระตุ้น (Catalyst) ของกระบวนการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน (Shi *et al.*, 2017) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ใบเรดโอ๊คมีสีม่วงแดง โดยที่ 70% ของสังกะสีถูกสำรองอยู่ในเนื้อเยื่อพืช (Montoya *et al.*, 2020) ในทางกลับกัน กรีนคอส ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก และกรีนโอ๊ค ในสูตรเพิ่มสังกะสีมีน้ำหนักสดทั้งต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเนื่องมาจากผักสลัดทั้งสามพันธุ์ทนต่อสังกะสีได้น้อยกว่าเรดโอ๊คและบัตเตอร์เฮด และปริมาณสังกะสีที่มากเกินไปอาจขัดขวางการดูดใช้ธาตุอาหารอื่น ๆ (Tsonev and Lidon, 2012)

Table 1 Comparison of lettuces varieties on lettuces growth

Species	Whole fresh weight (g)	Edible part weight (g)	Edible part dry weight (g)	Dry weight percentage (%)
Green cos	223.69a	158.02a	10.26a	6.87
Fillice iceberg	160.48ab	127.85ab	6.92b	5.54
Green oak	140.46b	110.68bc	6.72b	6.01
Red oak	97.69b	72.67c	4.12c	5.59
Butterhead	146.47ab	112.47bc	5.51bc	4.85
LSD 0.05	73.98	43.05	2.46	-
F-test	*	*	*	ns
C.V. (%)	26.45	21.19	11.18	22.94

ns=not significant; *significant at 0.05 probability levels, respectively

Means within the same column followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level by LSD test.

Table 2 Effect of lettuces varieties and fertilizer formula on lettuces growth

Species	Formula	Whole fresh weight (g)	Edible part weight (g)	Edible part dry weight (g)	Dry weight percentage (%)
Green cos	Control	264.70a	177.46ab	9.28b	5.23c-g
	Fe addition	270.38a	180.58a	10.28ab	5.69b-f
	Zn addition	135.98c-e	116.02d-g	11.24ab	9.69a
Frillice iceberg	Control	183.80b	150.82bc	7.12c	4.72fg
	Fe addition	153.64b-d	127.29c-e	6.40cd	5.03e-g
	Zn addition	143.99c-e	105.44e-g	7.24c	6.87b-f
Green oak	Control	167.65bc	138.25cd	9.12b	6.60bc
	Fe addition	124.52de	99.54e-g	5.27de	5.29c-g
	Zn addition	129.23de	94.25f-h	5.79c-e	6.14b-e

Table 2 (Continued)

Species	Formula	Whole fresh weight (g)	Edible part weight (g)	Edible part dry weight (g)	Dry weight percentage (%)
Red oak	Control	80.94 f	64.07 i	3.21 f	5.01 e-g
	Fe addition	83.69 f	66.45 hi	3.61 f	5.43 c-g
	Zn addition	128.44 de	87.48 g-i	5.53 c-e	6.32 b-d
Butterhead	Control	155.91 b-d	118.00 d-g	5.35 de	4.53 g
	Fe addition	114.87 ef	95.82 f-h	4.16 ef	4.34 g
	Zn addition	168.63 bc	123.59 c-f	7.02 cd	5.68 c-f
LSD 0.05		32.56	27.48	1.56	1.03
F-test		*	*	*	*
C.V. (%)		14.87	17.28	9.06	12.56

ns=not significant; *significant at 0.05 probability levels, respectively

Means within the same column followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level by LSD test.

ปริมาณธาตุอาหารในผักสลัด: จาก Table 3 แสดงให้เห็นแนวโน้มในภาพรวมของสูตรสารละลายธาตุอาหาร ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุในผักสลัด ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสูตรเพิ่มเหล็ก เพราะปริมาณเหล็กที่เพิ่มขึ้นอาจช่วยกระตุ้นกลไกต่าง ๆ ในผักสลัด เช่น ช่วยเร่งกลไกระดับโมเลกุลที่เกี่ยวข้องในการควบคุมยีน LATS ซึ่งส่งผลต่อการดูดใช้ในโตรเจนในพืช (Iacuzzo *et al.*, 2011) จากการศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มธาตุเหล็กและสังกะสีต่อปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง (Table 4) พบว่าฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก ในสูตรเพิ่มเหล็กมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 43% เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม อาจเป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กออกไซด์ที่สะสมอยู่ในราก ทำให้พืชสามารถดูดซับแอมโมเนียมในสารละลายธาตุอาหาร เช่น ไนเตรตและฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (Rout and Sahoo, 2015)

นอกจากนี้การดูดใช้ในโตรเจนในพืชที่เพิ่มสูงขึ้นอาจส่งผลโดยอ้อมต่อการเพิ่มโพแทสเซียมและแมกนีเซียม เพราะไนโตรเจนและธาตุทั้งสองมีอันตรกิริยาในรูปแบบที่ส่งเสริมกัน เมื่อพืชดูดใช้ในโตรเจนได้เพิ่มขึ้นปริมาณโพแทสเซียมและแมกนีเซียมจึงเพิ่มตาม (Yousaf *et al.*, 2021) ในทางกลับกันสูตรเพิ่มสังกะสีมีผลให้ธาตุอาหารหลักมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดจากอันตรกิริยาในเชิงปฏิปักษ์ของสังกะสีกับธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เช่นเดียวกับในถั่วเขียวและข้าวสาลี (Cakmak *et al.*, 2010; Samreen *et al.*, 2017) โดยผลการเพิ่มสังกะสีในผักสลัด ทำให้ปริมาณแคลเซียมในผักสลัดเพิ่มขึ้นประมาณ 9-35% เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม พบมากที่สุดในกรีนคอสสูตรเพิ่มสังกะสี (13.73 กรัม/กก. น้ำหนักแห้ง) อาจเนื่องมาจากอันตรกิริยาแบบส่งเสริมกันของสังกะสีและแคลเซียมเช่นเดียวกับในมะเขือเทศ (Haleema *et al.*, 2018)

Table 3 Comparison of fertilizer formula on lettuces nutrient contents

Formula	Total (dry weight)								
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn	Cu
	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
Control	37.34ab	3.62b	48.4a	9.59b	2.16b	206.10b	39.05b	32.62b	4.91a
Fe addition	40.17a	4.21a	58.39a	10.72a	2.37a	373.76a	34.10b	50.58a	4.38a
Zn addition	31.35b	2.91c	46.32b	11.66a	2.17b	152.23c	281.11a	16.76c	2.65b
LSD 0.05	3.42	0.43	10.00	1.02	0.19	35.09	37.72	7.72	1.12
F-test	*	*	*	*	*	*	*	*	*
C.V. (%)	14.88	18.79	30.95	15.10	13.72	22.71	30.44	36.58	24.59

ns=not significant; *significant at 0.05 probability levels, respectively

Means within the same column followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level by LSD test.

Table 4 Effect of lettuces varieties and fertilizer formula on macronutrient contents

Species	Formula	Total (dry weight)				
		N	P	K	Ca	Mg
		(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)
Green cos	Control	36.36b-d	3.83a-c	46.23c	10.68bc	2.16c-e
	Fe addition	37.07a-d	4.27ab	48.26c	8.78cd	1.90ef
	Zn addition	29.59ef	2.85cd	40.36c	13.73a	2.42a-c
Frllice iceberg	Control	27.06f	2.89cd	61.18a-c	10.18bc	2.39a-c
	Fe addition	38.58a-d	3.60a-d	72.27ab	11.45b	2.68a
	Zn addition	27.40f	2.75d	38.84c	11.05b	2.14c-e
Green oak	Control	38.19a-d	3.37b-d	48.17c	10.39bc	2.18c-e
	Fe addition	40.95ab	4.39ab	42.21c	11.02b	2.19c-e
	Zn addition	33.24d-f	3.49b-d	49.86c	11.70b	2.01d-f
Red oak	Control	41.36ab	3.89a-c	40.72c	8.82cd	2.33a-d
	Fe addition	40.66a-c	4.18ab	49.36c	10.59bc	2.49a-c
	Zn addition	32.40d-f	2.83cd	52.86bc	11.18b	2.32b-d

Table 4 (Continued)

Species	Formula	Total (dry weight)				
		N (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)	Ca (g/kg)	Mg (g/kg)
Butterhead	Control	43.74a	4.11ab	45.73c	7.86d	1.76f
	Fe addition	43.59a	4.60a	79.86a	11.77b	2.57ab
	Zn addition	34.12c-e	2.65d	49.67c	10.64bc	1.98d-f
LSD 0.05		5.82	0.92	20.15	1.78	0.31
F-test		*	*	*	*	*
C.V. (%)		11.26	18.11	27.73	11.75	9.80

ns=not significant; *significant at 0.05 probability levels, respectively

Means within the same column followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level by LSD test.

ในส่วนของจุลธาตุ (Table 5) พบว่าในสูตรเพิ่มเหล็ก ผักสลัดมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น 1.3-2.3 เท่า ฟิลเลย์ไอซ์เบิร์กมีปริมาณเหล็กสูงสุด (471.93 มก./กก. น้ำหนักแห้ง) คิดเป็น 1.9 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม เนื่องจากความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้น พืชจึงตอบสนองโดยการดูดใช้ธาตุดังกล่าวมากขึ้น โดยการเพิ่มเหล็กในสารละลายธาตุอาหารทำให้ผักสลัดบัตเตอร์เฮด มีเหล็กเพิ่มขึ้น 53.7% (Giordano *et al.* 2019) นอกจากนี้ การเพิ่มเหล็กทำให้ปริมาณแมงกานีสของผักสลัดเพิ่มขึ้น 1.2-2.2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับรูปแบบการกระจายของแมงกานีสในพืชที่เปลี่ยนไปตามระดับของเหล็ก และอัตราส่วน Fe/Mn ที่เพิ่มขึ้นเหมือนในต้นข้าว (Tanaka and Navasero, 1966) อย่างไรก็ตามพบแนวโน้มการลดลงของปริมาณสังกะสีและทองแดงที่ 12-58% และ 6-21% ตามลำดับ ในสูตรเพิ่มเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม อาจเนื่องมาจากอันตรกิริยาในเชิงปฏิปักษ์ของธาตุเหล็กและธาตุทั้งสอง (Rout and Sahoo, 2015) ขณะที่สูตรเพิ่มสังกะสี ผักสลัดมีปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นประมาณ 8.5 เท่า โดยเฉพาะบัตเตอร์เฮดและเรดโอ๊คที่มีปริมาณสังกะสีสูงสุด 328.38 และ 316.42 มก./กก.

น้ำหนักแห้ง คิดเป็น 7.8 และ 18.8 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม อาจเป็นเพราะปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้นมีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นของสังกะสีในเนื้อเยื่อพืชที่เพิ่มขึ้น (Gupta *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตามปริมาณเหล็กและทองแดงในผักสลัดส่วนใหญ่ในสูตรเพิ่มสังกะสีลดลง 39-56% และ 29-67% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม สันนิษฐานว่าเกิดจากอันตรกิริยาในเชิงปฏิปักษ์ ของเหล็กและทองแดงกับธาตุสังกะสี (Gupta *et al.*, 2016) ยกเว้นในผักสลัดเรดโอ๊คที่มีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น 1.1 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม เนื่องจากสังกะสีมีบทบาทต่อการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งเป็นสารที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก จึงทำให้มีการดูดใช้เหล็กเพิ่มขึ้น (Shi *et al.*, 2017; Giordano *et al.*, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับการเจริญเติบโตของเรดโอ๊ค (Table 2) แม้ว่ามีการเพิ่มธาตุเหล็กและธาตุสังกะสีมากถึง 1.3 และ 27.8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม แต่ผักสลัดทั้งหมดที่นำมาทดสอบไม่แสดงอาการผิดปกติที่เกิดจากปริมาณธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง อาจเป็นเพราะยังไม่ถึงระดับค่าวิกฤต (Critical level) โดยที่ปริมาณเหล็กและสังกะสีสูงที่สุดในน้ำหนักสดส่วนที่รับประทานได้ของฟิลเลย์ไอซ์เบิร์ก

และแบตเตอรี่เฮด มีค่าเท่ากับ 3.02 และ 2.64 มก./กก. น้ำหนักสด ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของปริมาณ เหล็กและสังกะสีที่ร่างกายควรได้รับ 8-15 และ 5-15 มก./วัน ตามลำดับ (Institute of Medicine (U.S.) Panel on Micronutrients, 2001) ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคัดเลือกพันธุ์ ผักสลัดเพื่อเสริมธาตุเหล็กและสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสม

และหากต้องการต่อยอดเป็นผักทางเลือกเพื่อสุขภาพ (Functional vegetable) ควรศึกษาเรื่องของการสะสม ไนเตรต วิตามิน สารฟลักซ์เคมี และแร่ธาตุอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อให้ได้มาซึ่งผักสลัดที่มีคุณค่าทางอาหาร มีปริมาณ เหล็กและสังกะสีสูง เพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตรให้ผู้ผลิต และ ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้ในที่สุด

Table 5 Effect of lettuces species and fertilizer formula on micronutrient contents

Species	Formula	Total (dry weight)			
		Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
Green cos	Control	252.45e	52.24e	47.74bc	5.74a-c
	Fe addition	337.08cd	49.21e	67.82a	4.75b-d
	Zn addition	110.57g	218.24c	14.68g	2.39ef
Frillice iceberg	Control	250.01e	43.76e	32.67de	4.86b-d
	Fe addition	471.93a	38.59e	57.41ab	3.84c-e
	Zn addition	119.69g	182.01d	19.27fg	1.62f
Green oak	Control	204.08f	51.59e	19.71fg	7.12a
	Fe addition	380.30b	21.74e	30.06d-f	6.08ab
	Zn addition	124.94g	262.81b	13.21g	4.84b-d
Red oak	Control	193.34f	49.38e	39.44cd	5.01b-d
	Fe addition	376.93bc	28.48e	46.19bc	4.70b-d
	Zn addition	216.50ef	365.80a	19.34fg	3.10d-f

Table 5 (Continued)

Species	Formula	Total (dry weight)			
		Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
Butterhead	Control	130.63g	48.29e	23.57e-g	1.82f
	Fe addition	302.58 d	32.49e	51.44bc	2.54ef
	Zn addition	189.46 f	376.67a	17.30fg	1.30f
LSD 0.05		40.99	30.27	11.87	1.68
F-test		*	*	*	*
C.V. (%)		11.79	18.00	25.00	29.58

ns=not significant; *significant at 0.05 probability levels, respectively

Means within the same column followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 level by LSD test.

สรุปผลการวิจัย

ผักสลัดพันธุ์กรีนคอส ฟิลเลย์โอชเบอร์ก กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค และบัตเตอร์เฮด ที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ ตอบสนองต่อการเสริมธาตุเหล็กและสังกะสีแตกต่างกัน ทุกพันธุ์เจริญเติบโตโดยไม่แสดงอาการผิดปกติของธาตุอาหารจากการที่มีเหล็กหรือสังกะสีสูง สูตรเพิ่มเหล็กไม่แสดงผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของ กรีนคอส ฟิลเลย์โอชเบอร์ก และเรดโอ๊ค แต่กรีนโอ๊คและบัตเตอร์เฮดมีน้ำหนักสดลดลง โดยการเพิ่มเหล็กทำให้ผักสลัดมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น 1.3-2.3 เท่า ซึ่งค่าสูงที่สุดอยู่ในฟิลเลย์โอชเบอร์ก (471.93 มก./กก. น้ำหนักแห้ง) และปริมาณฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีสเพิ่มขึ้น แต่สังกะสี และทองแดงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ขณะที่สูตรเพิ่มสังกะสี ทำให้การเจริญเติบโตของบัตเตอร์เฮด และเรดโอ๊คเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะน้ำหนักสดทั้งต้นของ เรดโอ๊ค (128.44 กรัม) ทำให้ผักสลัดมีปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้น 4.2-18.9 เท่า โดยที่บัตเตอร์เฮดและเรดโอ๊คมีปริมาณสังกะสี 376.67 และ 365.80 มก./กก. น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับแคลเซียมมีปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม เหล็ก แมงกานีส และทองแดง

มีปริมาณลดลงจากการเพิ่มสังกะสีเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ส่วนปริมาณเหล็กและสังกะสีในส่วนที่รับประทานได้สูงที่สุดในฟิลเลย์โอชเบอร์กและบัตเตอร์เฮด (3.02 และ 2.64 มก./กก. น้ำหนักสด) ซึ่งไม่เกินค่าปริมาณเหล็กและสังกะสีที่ร่างกายควรได้รับในแต่ละวัน (8-15 และ 5-15 มก./วัน) ดังนั้น แนวทางเสริมธาตุเหล็กและสังกะสีที่เหมาะสมกับผักสลัด ควรเลือกพันธุ์ผักสลัดที่เหมาะสม เพื่อให้ได้มาซึ่งผักสลัดที่มีเหล็กและสังกะสีสูง รวมทั้งศึกษาการสะสมไนเตรต วิตามิน สารพิษตกค้าง และสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มเติม สำหรับพัฒนาเป็นผักทางเลือกเพื่อสุขภาพ (Functional vegetable)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยความเป็นเลิศเทคโนโลยีชีวภาพเกษตรและทรัพยากรธรรมชาติ ระยะที่ 2 ศูนย์วิจัยควบคุมศัตรูพืชโดยชีวินทรีย์แห่งชาติ ภาคใต้ และภาควิชาวนวัตกรรมเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนวิจัย สถานที่และอุปกรณ์ดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Balk, J. and T.A. Schaedler. 2014. Iron cofactor assembly in plants. **Annual Review of Plant Biology** 65: 125-153.
- Cakmak, I., M. Kalayci, Y. Kaya, A.A. Torun, N. Aydin, Y. Wang, Z. Arisoy, H. Erdem, A. Yazici, O. Gokmen, L. Ozturk and W.J. Horst. 2010. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 58: 9092-9102.
- Di Gioia, F., M. Gonnella, V. Buono, O. Ayala and P. Santamaria. 2017. Agronomic, physiological and quality response of romaine and red oak-leaf lettuce to nitrogen input. **Italian Journal of Agronomy** 12(806): 47-58.
- Freitas, M.A., F.H.V. Medeiros, S.P. Carvalho, L.R.G. Guilherme, W.D. Teixeira, H. Zhang and P.W. Paré. 2015. Augmenting iron accumulation in cassava by the beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GBO3). **Frontiers in Plant Science** 6(596): 1-11.
- Giordano, M., C. El-Nakhel, A. Pannico, M.C. Kyriacou, S.R. Stazi, S. De Pascale and Y. Rouphael. 2019. Iron biofortification of red and green pigmented lettuce in closed soilless cultivation impacts crop performance and modulates mineral and bioactive composition. **Agronomy** 9(290): 1-21.
- Gupta, N., H. Ram and B. Kumar. 2016. Mechanism of zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology** 15: 89-109.
- Haleema, B., A. Rab and S.A. Hussain. 2018. Effect of calcium, boron and zinc foliar application on growth and fruit production of tomato. **Sarhad Journal of Agriculture** 34(1): 19-30.
- Iacuzzo, F., S. Gottardi, N. Tomasi, E. Savoia, R. Tommasi, G. Cortella, R. Terzano, R. Pinton, L. Dalla Costa and S. Cesco. 2011. Corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr.) growth in a water-saving floating system as affected by iron and sulfate availability: crop growth and food quality as affected by Fe and S availability. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 91: 344-354.
- Institute of Medicine (U.S.) Panel on Micronutrients. 2001. **DRI: dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc: a report of the panel on micronutrient**. [Online]. Available <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK222310/> (July 8, 2021).
- Kalra, Y.P. 1998. **Handbook of Reference Methods for Plant Analysis**. Boca Raton: CRC Press. 300 p.

- Kim, M.J., Y. Moon, J.C. Tou, B. Mou and N.L. Waterland. 2016. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Journal of Food Composition and Analysis** 49: 19-34.
- Majeed, A., W.A. Minhas, N. Mehboob, S. Farooq, M. Hussain, S. Alam and M.S. Rizwan. 2020. Iron application improves yield, economic returns and grain-Fe concentration of mungbean. **PloS one** 15: e0230720. [Online]. Available <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230720> (July 11, 2021).
- Montoya, M., A. Vallejo, J. Recio, G. Guardia and J.M. Alvarez. 2020. Zinc–nitrogen interaction effect on wheat biofortification and nutrient use efficiency. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 183(2): 169-179.
- Pengnoo A., C. Kaewmano, S. Kiatpathomchai and U. Loalae. 2016. **Technology of Quality and Safe Hydroponic Vegetable Production by B-Veggie bio-agent: *Bacillus subtilis***. Bangkok: National Research Council of Thailand. 63 p. [in Thai]
- Phulkerd, S., R.S. Gray and A. Chamrathirong. 2020. The influence of co-residential and non-co-residential living arrangements on sufficient fruit and vegetable consumption in the aging population in Thailand. **BMC Geriatrics** 20(1): 1-8.
- Rout, G.R. and S. Sahoo. 2015. Role of iron in plant growth and metabolism. **Reviews in Agricultural Science** 3: 1-24.
- Samreen, T., H.U. Shah, S. Ullah and M. Javid. 2017. Zinc effect on growth rate, chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mungbeans plant (*Vigna radiata*). **Arabian Journal of Chemistry** 10: 1802-1807.
- Shi, P., B. Li, H. Chen, C. Song, J. Meng, Z. Xi and Z. Zhang. 2017. Iron supply affects anthocyanin content and related gene expression in berries of *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon. **Molecules** 22(283): 1-13.
- Tanaka, A. and S.A. Navasero. 1966. Interaction between iron and manganese in the rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition** 12: 29-33.
- Tsonev, T. and F.J.C. Lidon. 2012. Zinc in plants - an overview 12. **Emirates Journal of Food and Agriculture** 24: 322-333.
- Yousaf, M., S. Bashir, H. Raza, A.N. Shah, J. Iqbal, M. Arif, M.A. Bukhari, S. Muhammad, S. Hashim, J. Alkahtani, M.S. Alwahibi and C. Hu. 2021. Role of nitrogen and magnesium for growth, yield and nutritional quality of radish. **Saudi Journal of Biological Sciences** 28: 3021-3030.