

การลดการสะสมฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในผักสลัดที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์

Reduction of Phosphorus and Potassium Accumulations in Lettuce Grown in a Hydroponic System

รุจิรา ตะติ¹ เพ็ญญา จักรสมศักดิ์² และสาวิกา กอนแสง^{3*}

Rujira Tadi¹ Pennapa Jaksomsak² and Sawika Konsaeng^{3*}

¹ สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹ Program in Soil Science, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

² ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50200

² Department of Plant and Soil Science, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, San Sai, Chiang Mai 50200

³ สาขาวิชาเกษตรเคมี คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

³ Program in Agricultural Chemistry, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290

* Corresponding author: sawika.k@gmail.com

(Received: 16 May 2023; Revised: 14 July 2023; Accepted: 20 July 2023)

Abstract

This research aimed to evaluate the phosphorus (P) and potassium (K) accumulations, and the effects on growth and yield of lettuce grown in reduced phosphorus and potassium concentrations nutrient solution. Green oak and red oak plant were grown in a hydroponic system with four treatments of varying concentrations of KH_2PO_4 and KCl including 1) 0.1 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$) 2) 0.1 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl ($\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$) 3) 0.3 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($\text{P}_{0.3}\text{K}_{0.5}$) and 4) 0.3 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl ($\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$). The results showed that the reduction of P and K affected different growth parameters although only the yield of red oak was decreased. Phosphorus accumulation of green oak in $\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$ and $\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$ was reduced from 5.31 mg/g in $\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$ to 2.58 and 1.89 mg/g. It was also found that K was dropped from 63.14 mg/g in $\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$ to 37.82 and 46.96 mg/g in treatments that reduced P or K or both P and K in the nutrient solution. In the same way, red oak had lower P concentration in $\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$ and $\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$ which were 3.65 and 2.96 mg/g. There were 69.73, 69.47, and 50.41 mg/g for potassium accumulation, in $\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$, $\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$ and $\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$, respectively. However, the higher sodium accumulation in red oak supplied with $\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$ was noted while not affecting green oak. The results from this study could be used for vegetable production with low P and K.

Keywords: Potassium, phosphorus, lettuce, fertilizer application

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเจริญเติบโต ผลผลิต การสะสมฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในผักสลัดกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่ลดความเข้มข้นฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ดำเนินการปลูกผักสลัดในระบบไฮโดรโปนิคส์ โดยมีการเติม KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายธาตุอาหารพืชต่างกัน 4 กรรมวิธีการทดลอง ประกอบด้วย 1) 0.1 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$) 2) 0.1 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl

($P_{0.1}K_{1.0}$) 3) 0.3 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($P_{0.3}K_{0.5}$) และ 4) 0.3 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl ($P_{0.3}K_{1.0}$) ผลการศึกษาพบว่า การลดความเข้มข้นของธาตุอาหารส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดทั้งสองชนิดแตกต่างกัน โดยเฉพาะผลผลิตของเรดโอ๊ค นอกจากนี้การสะสมฟอสฟอรัสในกรีนโอ๊คลดลงจาก 5.31 mg/g ใน $P_{0.3}K_{1.0}$ เป็น 2.58 และ 1.89 mg/g ใน $P_{0.1}K_{0.5}$ และ $P_{0.1}K_{1.0}$ การสะสมโพแทสเซียมลดลงจาก 63.14 mg/g ใน $P_{0.3}K_{1.0}$ เป็น 37.82 และ 46.96 มิลลิกรัม/กรัม ในกรรมวิธีที่มีการลดความเข้มข้นของธาตุทั้งสอง หรือมีการลดธาตุใดธาตุหนึ่ง ส่วนเรดโอ๊คมีการสะสมฟอสฟอรัสใน $P_{0.1}K_{0.5}$ และ $P_{0.1}K_{1.0}$ ลดลงโดยมีค่า 3.65 และ 2.96 mg/g มีการสะสมโพแทสเซียมใน $P_{0.3}K_{0.5}$, $P_{0.1}K_{1.0}$ และ $P_{0.1}K_{0.5}$ 69.73, 69.47 และ 50.41 mg/g ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการปลูกผักสลัดเรดโอ๊คด้วย $P_{0.1}K_{0.5}$ มีการสะสมโซเดียมเพิ่มขึ้น ผลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตผักที่มีฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่ำ

คำสำคัญ: โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส ผักสลัด วิธีการให้ปุ๋ย

คำนำ

ในประเทศไทยพบผู้ป่วยโรคไตเป็นอันดับ 3 ซึ่งมีประมาณ 8 ล้านคน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (Manantapong *et al.*, 2022) สาเหตุมาจากการรับประทานอาหารที่มีโซเดียมสูง รวมทั้งการบริโภคอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ผักใบเขียวและผลไม้ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูง แม้ว่าฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโซเดียม เป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ แต่หน่วยไตของผู้ป่วยโรคไตและโรคไตเรื้อรัง (Chronic Kidney Disease; CKD) มีประสิทธิภาพลดลง จึงไม่สามารถขับแร่ธาตุออกมาได้หมด ส่งผลให้เกิดการสะสมของแร่ธาตุในเลือดสูงจนหัวใจทำงานผิดปกติ (Putcha and Allon, 2007) ในเลือดคนปกติควรมีระดับฟอสฟอรัสในเลือดต่ำกว่า 4.8 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร และระดับโพแทสเซียมเท่ากับ 3.5-5.5 มิลลิกรัมวาลีนต่อลิตร (Talukder *et al.*, 2016) ดังนั้น คนควรได้รับโพแทสเซียมจากการบริโภคอาหารวันละ 2,000-3,500 มิลลิกรัมต่อวัน หรือ 200 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด และควรได้รับฟอสฟอรัสวันละ 800-1,000 มิลลิกรัมต่อวัน หรือ 300 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด (Pollock *et al.*, 2005) ในพืชอาหารมีการสะสมฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสูงกว่า 0.2 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เนื่องจากธาตุทั้งสองจัดเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณมากฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบใน

สารอินทรีย์ที่สำคัญต่อพืชหลายชนิด เช่น นิวคลีโอโปรตีน (nucleoprotein) ที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์ และการถ่ายทอดลักษณะพันธุกรรมโดยโครโมโซม ฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ที่จำเป็นต่อกระบวนการสร้างแป้ง โปรตีน และช่วยให้พืชออกดอกและแก่เร็วโพแทสเซียมจึงมีบทบาทในการเจริญเติบโต และพัฒนาส่วนต่าง ๆ ของพืช (Osotsapar, 2015) รวมทั้งเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้โดยผ่านท่อลำเลียงน้ำและท่อลำเลียงอาหาร ทำหน้าที่ควบคุมการเปิดและปิดของปากใบ ควบคุมการแลกเปลี่ยนแร่ธาตุระหว่างนอกเซลล์และภายในเซลล์ของพืช มีความสำคัญต่อคุณภาพของมะเขือเทศเชอร์รี่ เช่น ขนาด สี สันรสชาติ และระยะเวลาในการเก็บรักษา (Manantapong *et al.*, 2022)

การที่ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังบริโภคพืชอาหารจึงส่งผลให้ได้รับปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในปริมาณที่สูงตามไปด้วย ทั้งนี้พืชอาหารบางชนิด เช่น ผักสลัดหรือผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) เป็นผักที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ประกอบด้วยน้ำ 95 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 1-2 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 1-2 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 0.25 เปอร์เซ็นต์ มีสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น วิตามินเอ วิตามินซี และแร่ธาตุหลายชนิด เช่น แคลเซียม เหล็ก และฟอสฟอรัส เป็นต้น (Jirakiattikun and Saelim, 2009) หากสามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในพืชเหล่านี้ได้ จะเป็นประโยชน์ในการผลิตพืชอาหารทางเลือกที่ทำให้ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง

สามารถควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในเลือดให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้พบว่า มีรายงานวิจัยในการผลิตพืชลดปริมาณโพแทสเซียมในพืชหลายชนิด เช่น สตรอว์เบอร์รี่ (Mondal *et al.*, 2017) ผักกินใบ (Manantapong *et al.*, 2019) ผักสลัด (Xu *et al.*, 2021) สวิสชาร์ด และผักโขม (D'Imperio *et al.*, 2019) มะเขือเทศ (Manantapong *et al.*, 2022; Diem and Godhold, 1993; Tsukagoshi *et al.*, 2021) แต่การผลิตพืชลดการสะสมปริมาณฟอสฟอรัสยังมีอยู่น้อย และยังไม่พบการศึกษาการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมร่วมกัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการสะสมฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในผักสลัดที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่ลดความเข้มข้นฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมลง รวมทั้งประเมินผลกระทบต่อ การเจริญเติบโต และการให้ผลผลิต ซึ่งจะสามารถใช้เป็นแนวทางการผลิตพืชโพแทสเซียม และฟอสฟอรัสต่ำสำหรับผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังได้

อุปกรณ์และวิธีการ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 4 กรรมวิธีการทดลอง (Table 1) 4 ซ้ำ ในแต่ละซ้ำ ประกอบด้วยผักสลัด 6 ต้น มีการกำหนดกรรมวิธีการทดลองจากการทดลองเบื้องต้นของคณะผู้วิจัย ที่พบว่า การได้รับ KH_2PO_4 0.3 มิลลิโมลาร์ และ KCl 1.0 มิลลิโมลาร์ เป็นระดับที่เพียงพอต่อ

การเจริญเติบโตของผักสลัด (ข้อมูลไม่ได้นำเสนอ) ดำเนินการทดลองระหว่างเดือนมิถุนายน ถึง สิงหาคม พ.ศ. 2565 โดยเพาะเมล็ดผักสลัดกรีนโอ๊ค และเรดโอ๊ค ลงบนแผ่นฟองน้ำที่ตัดสำเร็จขนาด 2.54×2.54 เซนติเมตร เจาะตรงกลางก้อนฟองน้ำ สำหรับใส่เมล็ด นำฟองน้ำใส่ถาดพลาสติก รดน้ำให้ชุ่ม และวางไว้ในที่ร่ม หลังเพาะเมล็ด 3 วัน นำถาดเพาะออกมาวางที่แสงแดดรำไร และรักษาระดับน้ำในถาด ให้สูงประมาณ 1.5 เซนติเมตร ย้ายต้นกล้าอายุ 7 วัน ลงในสารละลายธาตุอาหารความเข้มข้น $1/2$ เท่าของสูตรปกติ (Siringam, 2014)

เมื่อต้นกล้าอายุ 21 วัน ย้ายต้นกล้าลงใน ถาดพลาสติกสีดำ ขนาด $31 \times 46.5 \times 18$ เซนติเมตร ที่บรรจุสารละลายธาตุอาหาร 10 ลิตร โดยมีระยะปลูก 5×5 เซนติเมตร ในระบบไฮโดรโพนิคส์ แบบ DFT (deep flow technique) และเริ่มให้สารละลายธาตุอาหารที่ดัดแปลงจาก สูตร Enshi solution (Ogawa *et al.*, 2007) ประกอบด้วย 4 มิลลิโมลาร์ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1 มิลลิโมลาร์ MgSO_4 , 0.025 H_3BO_3 , 0.004 มิลลิโมลาร์ $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.0004 มิลลิโมลาร์ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.0001 มิลลิโมลาร์ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.00002 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ที่ได้รับ KH_2PO_4 และ KCl แตกต่างกันตามกรรมวิธีการทดลองที่กำหนด เปลี่ยนสารละลายทุกสัปดาห์ และปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารให้อยู่ที่ระดับ 6.2 - 6.5 ตลอดการทดลอง

Table 1 Concentrations of KH_2PO_4 and KCl in nutrient solution

Treatments	KH_2PO_4 in nutrient solution (mM)	KCl in nutrient solution (mM)
$\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$	0.1	0.5
$\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$	0.1	1.0
$\text{P}_{0.3}\text{K}_{0.5}$	0.3	0.5
$\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$	0.3	1.0

1) การเจริญเติบโตและผลผลิต

เมื่อต้นผักสลัดอายุ 42 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการบันทึก ความสูงต้น ความยาวราก ความกว้างทรงพุ่ม นับจำนวนใบ และวัดค่า SPAD บนใบ

โดยใช้เครื่อง chlorophyll meter (SPAD-502Plus, ประเทศญี่ปุ่น) บันทึกน้ำหนักสดต้น จากนั้นนำผักไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และน้ำกลั่นตามลำดับ หั่นตัวอย่างเป็นขนาด 2-3 เซนติเมตร อบที่

อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งนำหนักแห้งแล้วจึงนำมาบดละเอียด (Manantapong *et al.*, 2019) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโซเดียม

2) การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโซเดียม

ย่อยตัวอย่างพืชด้วยกรดผสมไนตริก-เปอร์คลอริก จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างมาวัดปริมาณโพแทสเซียม โดยทำให้สารละลายตัวอย่างเจือจางลง 10 เท่า ด้วย 0.5 โมลาร์ HCl และวัดปริมาณโซเดียม โดยทำให้สารละลายตัวอย่างเจือจางลง 80 เท่า ด้วย 0.5 โมลาร์ HCl อ่านค่าด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer

ผลการวิจัยและวิจารณ์

การเจริญเติบโตและผลผลิต

จากการทดลองปลูกผักสลัดกรีนโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นของ KCl และ KH_2PO_4 ในสารละลายต่างกัน 4 กรรมวิธีการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของ KH_2PO_4 หรือ KCl ที่ลดลงส่งผลกระทบต่อความสูงและความยาวรากของสลัดกรีนโอ๊ค กรรมวิธีการทดลองที่ได้รับ $\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$ และ $\text{P}_{0.3}\text{K}_{0.5}$ มีความสูง 12.46 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่า $\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$ (10.87 เซนติเมตร) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

(CECIL1011, ประเทศอังกฤษ) และวัดปริมาณฟอสฟอรัสด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลายวานาโดโมลิบเดต วัดค่าการดูดกลืนแสง โดยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (SavantaAAΣ, ประเทศออสเตรเลีย) ที่ช่วงคลื่น 430 นาโนเมตร (Puranapong *et al.*, 2005)

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม SX for windows เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้ Least Significant Difference (LSD) ที่ความเชื่อมั่น 95%

ส่วนความยาวรากของกรรมวิธีการทดลองที่ได้รับ KH_2PO_4 0.1 มิลลิโมลาร์ ทั้ง 2 กรรมวิธีการทดลอง ($\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$ และ $\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$) มีความยาวรากมากกว่ากรรมวิธีการทดลองอื่น (13.72 และ 14.63 เซนติเมตรตามลำดับ) ขณะที่ระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ไม่มีผลต่อความกว้างทรงพุ่ม (21.81-23.39 เซนติเมตร) จำนวนใบ (11.15-11.89 ใบ) ค่า SPAD (24.97-26.28 หน่วย) และน้ำหนักสดต้น (36.83-43.97 กรัม) (Table 2)

Table 2 Average of height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of green oak lettuce in a hydroponic system at harvest (42 days after sowing)

Treatments	Plant Height (cm)	Canopy width (cm)	No. of Leaf/Plant (number)	Root length (cm)	SPAD value (unit)	Shoot fresh weight (g/plant)
$\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$	11.78ab	22.37	11.54	13.72a	25.94	43.97
$\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$	12.46a	22.40	11.89	14.63a	24.97	39.83
$\text{P}_{0.3}\text{K}_{0.5}$	12.46a	23.39	11.83	11.13b	25.58	46.00
$\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$	10.87b	21.81	11.15	11.34b	26.28	36.83
F-test	*	ns	ns	**	ns	ns
LSD _{0.05}	1.17	2.75	0.76	1.50	2.75	9.46

Remarks: Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $p \leq 0.05$

ns means non-significant difference, * and ** mean significant at $p \leq 0.05$ and 0.01, respectively

การเจริญเติบโตของสลัดเรดโอ๊คที่แสดงใน (Table 3) พบว่า ความสูง ความยาวราก และค่า SPAD

ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสลัดเรดโอ๊คมีความสูง 12.32 - 12.83 เซนติเมตร

ความยาวราก 23.25 - 26.12 เซนติเมตร ค่า SPAD 37.98 - 40.17 หน่วย ทั้งนี้พบว่าความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ และน้ำหนักสดต้นมีความแตกต่างทางสถิติระหว่างแต่ละกรรมวิธีการทดลอง ความกว้างทรงพุ่มของสลัดเรดโอ๊คที่ได้รับ $P_{0.3}K_{0.5}$ มีค่ามากที่สุด (21.58 เซนติเมตร) ส่วน $P_{0.3}K_{0.5}$ มีจำนวนใบมากกว่า $P_{0.1}K_{0.5}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่า กรรมวิธีการทดลองที่มีการลดระดับความเข้มข้น KH_2PO_4 หรือ KCl ทำให้น้ำหนักสดต้นลดลง 25.9 - 32.8 เปอร์เซ็นต์

การที่การเจริญเติบโตของผักสลัดได้รับผลกระทบจากการลดระดับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหาร เนื่องจากธาตุทั้งสองเป็นธาตุจำเป็นสำหรับพืช การได้รับฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไปจะส่งผลกระทบต่ออัตราการขนส่งฟอสฟอรัสไปยังผิวรากพืช รวมทั้งพืชจะมีการปรับตัวเพื่อลดการใช้ฟอสเฟตและนำฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์และนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้อัตราส่วนการเจริญเติบโตของส่วนยอดลดลง (Neocleous and Savvas, 2019; Peret *et al.*, 2011; Silber, 2008; Zhu *et al.*, 2020) ส่วนโพแทสเซียมที่ลดลงทำให้การสังเคราะห์แสงและอัตราการคายน้ำลดลง โดยการกระตุ้นการปิดปากใบ (Marek *et al.*, 2019) ส่งผลต่อน้ำหนักสด ความสูง และปริมาณคลอโรฟิลล์ (Prajapati and Modi, 2012; Wakeel *et al.*, 2011) ผลการเจริญเติบโตของ

ผักสลัดในงานวิจัยนี้ได้รับผลกระทบดังกล่าวเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำหนักสดของสลัดเรดโอ๊คในกรรมวิธีการทดลองที่ได้รับทั้งฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในระดับต่ำ ($P_{0.1}K_{0.5}$) หรือได้รับฟอสฟอรัสหรือโพแทสเซียมระดับต่ำอย่างใดอย่างหนึ่ง ($P_{0.1}K_{1.0}$ และ $P_{0.3}K_{0.5}$) มีน้ำหนักสดต้นน้อยกว่ากรรมวิธีการทดลองที่ได้รับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพียงพอส ($P_{0.3}K_{1.0}$) (Table 3) ทั้งนี้ผลกระทบเหล่านี้อาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ลดลงอยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง หรือการลดลงนั้นทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารอื่น (Osotsapar, 2015) เช่น การขาดฟอสฟอรัสยังทำให้พืชขาดโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (Chimma *et al.* 2019; Adams, 2002; Onthong and Osaki, 2006) การขาดโพแทสเซียมทำให้พืชดูดใช้ธาตุบางชนิดได้มากขึ้น ได้แก่ ฟอสฟอรัส และแคลเซียม (Osotsapar, 2015) แมงกานีส แมกนีเซียม และโบรอน (Levine and Mattson, 2021) อย่างไรก็ตามการตอบสนองด้านการเจริญเติบโตของสลัดทั้งสองชนิดต่อระดับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่ลดลงไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกลักษณะที่ทำการศึกษาเนื่องจากสัณฐานธาตุอาหารที่พืชต้องการมีความแตกต่างกัน (Jirakiattikun and Saelim, 2009)

Table 3 The average of height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of red oak lettuce in a hydroponic system at harvest (42 days after sowing)

Treatments	Plant Height (cm)	Canopy width (cm)	No. of Leaf/Plant (number)	Root length (cm)	SPAD value (unit)	Shoot fresh weight (g/plant)
$P_{0.1}K_{0.5}$	12.54	19.54b	10.91c	26.12	40.17	35.46b
$P_{0.1}K_{1.0}$	12.50	19.69b	11.00bc	24.54	38.69	35.96b
$P_{0.3}K_{0.5}$	12.83	21.58a	11.61ab	23.25	37.98	39.09b
$P_{0.3}K_{1.0}$	12.32	19.57b	11.66a	23.94	38.03	52.76a
F-test	ns	*	*	ns	ns	**
LSD _{0.05}	0.51	1.36	0.65	2.90	2.29	6.28

Remarks: Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $P \leq 0.05$ ns means non-significant difference, * and ** mean significant at $P \leq 0.05$ and 0.01, respectively

การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และ โซเดียม

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกันทำให้เกิดการสะสมธาตุฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสลัดกรีนไค้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การให้ $P_{0.3}K_{0.5}$ และ $P_{0.3}K_{1.0}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสมากกว่ากรรมวิธีการทดลองอื่น (5.39 และ 5.31 มิลลิกรัมต่อกรัม) ต้นที่ได้รับ $P_{0.1}K_{1.0}$ มีการสะสม

ฟอสฟอรัสน้อยที่สุด (1.89 มิลลิกรัมต่อกรัม) สำหรับการสะสมโพแทสเซียม สลัดกรีนไค้จากกรรมวิธี $P_{0.3}K_{1.0}$ มีการสะสมโพแทสเซียมมากที่สุด 63.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่ากรรมวิธีการทดลองที่เหลือซึ่งมีค่าระหว่าง 37.82 - 46.96 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารไม่มีผลต่อการสะสมโซเดียมในสลัดกรีนไค้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.50 - 0.55 มิลลิกรัมต่อกรัม (Table 4)

Table 4 Phosphorus (P) potassium (K) and sodium (Na) concentrations (mg/g) of green oak lettuce shoots grown in a hydroponic system supplied with various concentrations of KH_2PO_4 and KCl

Treatments	P concentration (mg/g)	P difference (%)	K concentration (mg/g)	K difference (%)	Na concentration (mg/g)
$P_{0.1}K_{0.5}$	2.86b	-52	37.82b	-40	0.53
$P_{0.1}K_{1.0}$	1.89c	-65	46.96b	-26	0.51
$P_{0.3}K_{0.5}$	5.39a	+1.5	46.62b	-26	0.51
$P_{0.3}K_{1.0}$	5.31a	-	63.14a	-	0.55
F-test	**		*		ns
LSD _{0.05}	0.47		0.12		0.07

Remarks: Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $p \leq 0.05$ ns means non-significant difference, * and ** mean significant at $p \leq 0.05$ and 0.01, respectively, the percentage of P and K differences are the increasing (+) or decreasing (-) of P or K concentrations in green oak shoot in each treatment compared with sufficient P and K treatment ($P_{0.3}K_{1.0}$)

ในสลัดเรดไค้พบว่า กรรมวิธีการทดลองที่มีการให้ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในระดับที่ต่างกันส่งผลให้การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโซเดียม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่า การให้ฟอสฟอรัสในสารละลายระดับเพียงพอ ($P_{0.3}K_{0.5}$ และ $P_{0.3}K_{1.0}$) พืชจะมีการสะสมฟอสฟอรัสสูงกว่ากรรมวิธีการทดลองอื่น (มีค่า 6.85 และ 6.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) การให้ฟอสฟอรัสในสารละลายระดับต่ำ เมื่อได้รับ $P_{0.1}K_{0.5}$

และ $P_{0.1}K_{1.0}$ ทำให้พืชมีการสะสมฟอสฟอรัสน้อยลง โดยมีค่า 3.65 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 2.96 มิลลิกรัมต่อกรัม ด้านการสะสมโพแทสเซียมจะเห็นได้ว่าการได้รับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในระดับเพียงพอ ($P_{0.3}K_{1.0}$) มีการสะสมโพแทสเซียมสูงที่สุด (78.10 มิลลิกรัมต่อกรัม) รองลงมา คือ สลัดเรดไค้ที่ได้รับฟอสฟอรัสระดับต่ำและโพแทสเซียมระดับเพียงพอ ($P_{0.1}K_{1.0}$) และได้รับฟอสฟอรัสระดับเพียงพอและโพแทสเซียมระดับต่ำ ($P_{0.3}K_{0.5}$) ซึ่งมี

การสะสมโพแทสเซียม 64.47 และ 69.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ขณะที่การได้รับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในระดับต่ำ ($P_{0.1}K_{0.5}$) มีการสะสมโพแทสเซียมน้อยที่สุด (50.41 มิลลิกรัมต่อกรัม) อย่างไรก็ตาม การให้ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่ำ ($P_{0.1}K_{0.5}$) ทำให้มีการมีการสะสมโซเดียมในปริมาณมากที่สุด 1.03 มิลลิกรัมต่อกรัม และสูงกว่าทุกกรรมวิธี (Table 5) มีงานวิจัยที่รายงานว่า การลดปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารลงสามารถลดการสะสมโพแทสเซียมได้ 25 เปอร์เซ็นต์ในมะเขือเทศ (Tsukagoshi *et al.*, 2021) และ 43 เปอร์เซ็นต์ ในสวิสชาร์ด (D'Imperio *et al.*, 2019) งานวิจัยนี้สามารถลดการสะสมโพแทสเซียมในสลัดกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คได้ 26 – 40 และ 11 - 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับการลดการสะสมฟอสฟอรัสในพืช การศึกษาก่อนหน้าของผู้วิจัยพบว่า การลดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายจาก 0.6 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 เป็น 0.2 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 ทำให้ฟอสฟอรัสสะสมในส่วนต้นของสลัดกรีนโอ๊คลดลงจาก 4.58 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 3.59 และ 1.66 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Tadi *et al.*, 2022)

ในการศึกษานี้พบว่า การสะสมฟอสฟอรัสในสลัดกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คมีค่าอยู่ระหว่าง 1.89 - 5.39 และ 2.96 - 6.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้สลัดทั้งสองชนิดที่ได้รับฟอสฟอรัส 0.1 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 แต่ได้รับโพแทสเซียม 0.5 มิลลิโมลาร์ KCl ($P_{0.1}K_{0.5}$) มีการสะสมฟอสฟอรัสที่สูงกว่าการได้รับฟอสฟอรัส 0.1 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 แต่ได้รับโพแทสเซียม 1.0 มิลลิโมลาร์ KCl ($P_{0.1}K_{1.0}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 4 และ Table 5) เนื่องจาก

การได้รับโพแทสเซียมในระดับที่ต่ำทำให้พืชมีการดูดฟอสฟอรัสได้มากขึ้น (Osotsapar, 2015) ในทางกลับกันพบว่า สลัดเรดโอ๊คที่ได้รับโพแทสเซียม 0.5 มิลลิโมลาร์ KCl แต่ได้รับฟอสฟอรัส 0.3 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 ($P_{0.3}K_{0.5}$) มีการสะสมโพแทสเซียมไม่แตกต่างกับการได้รับ 1.0 มิลลิโมลาร์ KCl แต่ได้รับ 0.1 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 ($P_{0.1}K_{1.0}$) เกิดจากการได้รับฟอสฟอรัสที่สูงขึ้นส่งเสริมให้มีการดูดโพแทสเซียมได้มากขึ้น (Onthong and Osaki, 2006) นอกจากนี้พืชที่ได้รับโพแทสเซียมต่ำจะดูดใช้โซเดียมได้สูงกว่าการได้รับโพแทสเซียมในปริมาณปกติ (Ogawa *et al.*, 2012; Pujos and Morard, 1997; Tomemori *et al.*, 2002) ในการศึกษาที่พบการสะสมโซเดียมในเรดโอ๊คที่เพิ่มขึ้นถึง 46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหาร ($P_{0.1}K_{0.5}$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Manantapong *et al.* (2019) ที่พบการสะสมโซเดียมเพิ่มขึ้นในผักกวางตุ้งฮ่องเต้ ผักกาดเขียวอ่อน และคะน้าที่ได้รับปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายลดลง 1/2 และ 1/4 เท่า อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาที่พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมในกรีนโอ๊คไม่ได้เพิ่มขึ้นดังที่พบในเรดโอ๊คอาจเนื่องมาจากความต้องการโพแทสเซียมในผักสลัดทั้งสองชนิดแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการดูดใช้ และการแทนที่โพแทสเซียมที่ขาดด้วยโซเดียม (Pujos and Morard, 1997) ดังนั้นผลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตผักที่มีฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่ำ สำหรับผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังเพื่อเป็นทางเลือกให้ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังสามารถบริโภคผักได้ โดยจำเป็นต้องมีการศึกษาวิธีการลดปริมาณโซเดียมในพืช ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ป่วย

Table 5 Phosphorus (P) potassium (K) and sodium (Na) concentrations (mg/g) of red oak lettuce shoots grown in a hydroponic system supplied with various concentrations of KH_2PO_4 and KCl

Treatments	P concentration (mg/g)	P difference (%)	K concentration (mg/g)	K difference (%)	Na concentration (mg/g)	Na difference (%)
$\text{P}_{0.1}\text{K}_{0.5}$	3.65b	-47	50.41c	-35	1.03a	+46
$\text{P}_{0.1}\text{K}_{1.0}$	2.96c	-57	67.47b	-14	0.59b	-13
$\text{P}_{0.3}\text{K}_{0.5}$	6.85a	-0.4	69.73b	-11	0.56b	-18
$\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$	6.88a	-	78.10a	-	0.68b	-
F-test	**		**		**	
LSD _{0.05}	0.53		6.58		0.16	

Remarks: Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $p \leq 0.05$

** means significant at $p \leq 0.01$, the percentage of P, K and Na differences are the increasing (+) or decreasing

(-) of P or K or Na concentrations in red oak shoot in each treatment compared with sufficient P and K treatment

($\text{P}_{0.3}\text{K}_{1.0}$)

สรุปผลการวิจัย

ปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกัน มีผลต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของผักสลัดทั้งสองชนิดแตกต่างกัน โดยมีผลต่อความสูง และความยาวรากของสลัดกรีนโอ๊ค รวมทั้งมีผลต่อความกว้างทรงพุ่มจำนวนใบ และน้ำหนักสดของผักสลัดเรดโอ๊ค อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับ การได้รับฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่เพียงพอ การลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารทำให้การสะสมฟอสฟอรัสในสลัดกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คลดลง 52 - 65 และ 47 - 57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำให้การสะสมโพแทสเซียมในส่วนต้นของผักสลัดทั้งสองชนิดลดลง 26 - 40 และ 11 - 35 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ในขณะที่ผักสลัดเรดโอ๊คที่ได้รับธาตุอาหารทั้งสองในระดับต่ำมีการสะสมโซเดียมในส่วนต้นเพิ่มขึ้น 46 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อ การสะสมโซเดียมในสลัดกรีนโอ๊ค

เอกสารอ้างอิง

- Adams, P. 2002. Nutritional control in hydroponics. pp. 211-261. *In*: Savvas, D., H.C. Passam. (Eds.), Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Embryo Publications. Athens, Greece.
- Chimma, S., S. Sukyankij, S. Samithiarporn, S. Jewprasert and T. Panich-pat. 2019. Growth and yield response of hybrid cucumber on phosphorus fertilizer. Thai Journal of Science and Technology 9(2): 276-286. [in Thai]
- D'Imperio, M., F. Montesano, M. Renna, A. Parente, A.F. Logrieco and F. Serio. 2019. Hydroponic production of reduced-potassium swiss chard and spinach: A feasible agronomic approach to tailoring vegetables for chronic kidney disease patients. Agronomy 9(10): 672. Available:

- <https://doi.org/10.3390/agronomy9100627>.
- Diem, B. and D.L. Godnold. 1993. Potassium, calcium and magnesium antagonism inclones of *Populus trichocarpa* Plant and Soil 155: 411-414. Available: <https://doi.org/10.1007/BF00025070>.
- Jirakiattikun, Y and N. Saelim. 2009. Growth of leaf lettuce cv. Red Oak grown in hydroponics with different nutrient solutions. Thai Science and Technology Journal 17(2): 81-88. [in Thai]
- Levine, C.P. and N.S. Mattson. 2021. Potassium-deficient nutrient solution affects the yield, morphology, and tissue mineral elements for hydroponic baby leaf spinach (*Spinacia oleracea* L.). Horticulturae 7(8): 213. Available: <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080213>.
- Manantapong, K., S. Anutrakulchai, R. Kraiklang, P. Kanyawongha and A. Sriprachote. 2019. The potassium concentration decreasing in vegetable planted in hydroponic system. Thai Journal of Soils and Fertilizers 41 (2): 26-35. [in Thai]
- Manantapong, K., A. Sriprachote, S. Anutrakulchai, R. Kraiklang and P. Kanyawongha. 2022. Effects of reducing potassium concentration on the quality of cherry tomatoes grown in the hydroponics system. Khon Kaen Agriculture Journal 50(4): 1006-1018. [in Thai]
- Marek, S., A. Soukup and E. Tylova. 2019. Potassium in root growth and development. Plant 8(10): 435. Available: <https://doi.org/10.3390/plants8100435>.
- Mondal, M.F., M. Asaduzzaman, M. Ueno, M. Kawaguchi, S. Yano, T. Ban, H. Tanaka and T. Asao. 2017. Reduction of potassium (K) content in strawberry fruit through KNO₃ management of hydroponics. The Horticulture Journal 86(1): 26-36. Available: <https://doi.org/10.2503/hortj.MI-113>.
- Neocleous, D. and D. Savvas. 2019. The effects of phosphorus supply limitation on photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and mineral nutrition in lettuce grown in a recirculating nutrient solution. Scientia Horticulturae. 252: 379-387. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.007>.
- Ogawa, A., S. Taguchi and C. Kawachima. 2007. A cultivation of spinach with low potassium content for patients on dialysis. Japanese Journal of Crop Science 76(2): 232-237. Available: <https://doi.org/10.1626/jcs.76.232>.
- Ogawa, A., T. Eguchi and K. Toyofuku. 2012. Cultivation method for leafy vegetable and tomatoes with low potassium content dialysis patients Environmental Control in Biology 50(4): 407-414. Available: <https://doi.org/10.2525/ecb.50.407>.
- Onthong, J. and M. Osaki. 2006. Adaptations of tropical plants to acid soils. Tropics. 15(4): 337-347. Available: <https://doi.org/10.3759/tropics.15.337>.
- Osotsapar, Y. 2015. Plant Nutrients. Kasetsart University Press, Bangkok. [in Thai]
- Peret, B., M. Clement, L. Nussaume and T. Desnos. 2011. Root developmental adaptation to phosphate starvation:

- better safe than sorry. Trends in plant science 16(8): 442-450. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.05.006>.
- Pollock, C., D. Voss, E. Hodson and C. Crompton. 2005. Caring for Australasians with renal impairment (CARI). The CARI guidelines. Nutrition and growth in kidney disease. Nephrology 10(5): 177- 230. Available: https://doi.org/10.1111/j.14401797.2005.00506_1.x.
- Prajapati, K. and H.A. Modi. 2012. The importance of potassium in plant growth - A review. Indian journal of plant sciences 1(2-3):177-186.
- Pujos, A. and P. Morard. 1997. Effects of potassium deficiency on tomato growth and mineral nutrition at the early production stage. Plant Soil 189: 189-196.
- Puranapong, N. 2005. Handbook of Soil and Plant Analysis. Maejo University, Chiang Mai. [in Thai]
- Putcha, N. and M. Allon. 2007. Management of hyperkalemia in dialysis patients. Semin. Dial 20(5): 431-439.
- Silber, A. 2008. Chemical characteristics of soilless media. In: Raviv, M., Lieth, J.H.(Eds.), Soilless Culture: Theory and Practice. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp. 209-244.
- Siringam, K. 2014. Effect of potassium on physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* var. Romana) cultivated in hydroponic system. Phranakorn Rajabhat Research Journal 9(1): 16-3. [in Thai]
- Tadi, R., P. Jaksomsak and S. Konsaeng. 2022. Effects of decreasing potassium and phosphorus on nutrient accumulation, growth and yield of green oak grown in hydroponic system. Proceedings of The 7th National Soil and Fertilizer Conference, December 7-9, 2022, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand. pp. 7-9. [in Thai]
- Talukder, M.R., M. Asaduzzaman, M. Ueno, M. Kawaguchi, S. Yano, T. Ban, H. Tanaka and T. Asao. 2016. Low potassium content vegetable research for chronic kidney disease patients in Japan. Nephrol. 2(1): 1-8.
- Tomemori, H., K. Hamamura and K. Tanabe. 2002. Interactive effects of sodium and potassium on the growth and photosynthesis of spinach and komatsuna. Plant Prod. Sci. 5(4): 281-285.
- Tsukagoshi, S., E. Hamano, M. Hohjo and F. Ikegami. 2021. Hydroponic production of low-potassium tomato fruit for dialysis patients. Int. J. Veg. Sci. 21: 1-10.
- Wakeel, A., M. Farooq, M. Qadir and S. Schubert. 2011. Potassium substitution by sodium in plants. Crit. Rev. Plant Sci. 30(4): 401-413.
- Xu, H., M. Johkan, S. Tsukagoshi and T. Maruo. 2021. Effect of nutrient quantitative management on potassium and sodium concentration in low-potassium lettuce. Hort. J. 90 (2): 154-160.
- Zhu, Q., H. Wang, Y.Z. Shan, H.Y. Ma, H.Y. Wang, F.T. Xie and X. Ao. 2020. Physiological response of phosphorus-efficient and inefficient soybean genotypes under phosphorus-deficiency. Russ. J. Plant Physiol. 67(1): 175-184.