การผลิตผักลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในระบบไฮโดรโปนิกส์

รุจิรา ตะดิ

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

การผลิตผักลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในระบบไฮโดรโปนิกส์

รุจิรา ตะดิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การผลิตผักลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในระบบไฮโดรโปนิกส์

รุจิรา ตะดิ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิกา กอนแสง)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาสนา วิรุญรัตน์)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญนภา จักรสมศักดิ์)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)
รองอธิการบดี
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

ชื่อเรื่อง การผลิตผักลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในระบบไฮโดรโปนิกส์
ชื่อผู้เขียน นางสาวรุจิรา ตะดิ
ชื่อปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิกา กอนแสง

บทคัดย่อ

โพแทสเซียมและฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารจำเป็นสำหรับพืช รวมถึงมีผลต่อสมดุลอิเล็กโทรไลต์ในร่างกายมนุษย์ ผู้ป่วยโรคไตมีหน่วยไตที่ไม่สามารถขับแร่ธาตุที่บริโภคออกมาได้หมด ส่งผลให้เกิดการสะสมในเลือดสูง หากรับประทานผักที่มีโพแทสเซียมหรือฟอสฟอรัสสูง การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบจากการลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในสารละลายต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมของธาตุโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในผักที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโพนิกส์ที่มีการลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในฤดูปลูกที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 4 ซ้ำ แบ่งเป็น 2 การทดลองย่อย ประกอบด้วย การทดลองที่ 1.1 ผลของการลดปริมาณธาตุฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค กรรมวิธีในการทดลอง ประกอบด้วยความเข้มข้นของ KH_2PO_4 ในสารละลาย 4 ระดับ ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.6 มิลลิโมลาร์ (P0.1, P0.2, P0.3 และ P0.6 ตามลำดับ) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การลดความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสารละลายธาตุอาหารลง 1/3 เท่า (P0.2) และ 1/6 เท่า (P0.1) ทำให้การสะสมฟอสฟอรัสในส่วนต้นลดลง 64 เปอร์เซ็นต์ และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่ 1.2 เป็นการศึกษาผลของการลดปริมาณธาตุโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารผักกาดหอมกรีนโอ๊ค กรรมวิธีในการทดลอง ประกอบด้วยความเข้มข้นของ KCl ในสารละลาย 4 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 มิลลิโมลาร์ (K0.5, K1.0, K2.0 และ K4.0 ตามลำดับ) ผลการทดลองพบว่า การลดความเข้มข้นโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารลง 1/4 เท่า (K1) และ 1/8 เท่า (K0.5) ทำให้การสะสมโพแทสเซียมในส่วนต้นลดลง 44 เปอร์เซ็นต์ และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าค่า SPAD มีค่าลดลงเมื่อมีการลดความเข้มข้นโพแทสเซียม แต่ไม่ได้รับผลกระทบจากการลดความเข้มข้นฟอสฟอรัส อย่างไรก็ตามไม่พบผลกระทบต่อการเจริญเติบโต และน้ำหนักสดต้นของผักกาดหอมกรี

นโอ๊ค ในทั้งสองการทดลอง

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในฤดูปลูกที่ต่างกัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 4 ซ้ำ 4 กรรมวิธีทดลอง ที่มีการเติม KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายธาตุอาหารพืชต่างกัน ประกอบด้วย 0.1 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$), 0.1 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl ($P_{0.1}$-$K_{1.0}$), 0.3 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($P_{0.3}$-$K_{0.5}$) และ 0.3 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl ($P_{0.3}$-$K_{1.0}$) มี ดำเนินการทดลองในฤดูฝน และฤดูหนาว จากผลการทดลองในฤดูฝน พบว่า การเจริญเติบโตและน้ำหนักสดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าไม่พบความแตกต่างกันระหว่างค่า SPAD ในผักกาดหอมทั้งสองชนิด ผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค ที่ปลูกในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสในส่วนต้นต่ำที่สุด มีค่า 1.89 และ 2.96 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีการสะสมโพแทสเซียม 37.82 และ 50.41 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด ในทางกลับกันพบว่ามีการสะสมโซเดียมของผักกาดหอมเรดโอ๊คในส่วนต้นสูงที่สุด 1.03 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่พบว่าการสะสมโซเดียมของผักกาดหอมกรีนโอ๊คในส่วนต้นมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างกรรมวิธีทดลอง การเจริญเติบโตของผักในฤดูหนาว พบว่า มีการตอบสนองต่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกันในผักกาดหอมทั้งสองชนิด โดยไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ของค่า SPAD ความกว้างทรงพุ่ม และน้ำหนักสดที่ระยะเก็บเกี่ยวของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค แต่พบว่ามีความแตกต่างกันในด้านความสูง ความยาวราก และจำนวนใบ ส่วนในผักกาดหอมเรดโอ๊ค พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกรรมวิธีในด้านความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ และน้ำหนักสด โดยไม่พบความแตกต่างในด้านความสูง ความยาวรากและค่า SPAD การสะสมธาตุอาหารในการทดลองฤดูหนาว พบว่าผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ปลูกใน $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสในส่วนต้นต่ำที่สุด (3.10 มิลลิกรัมต่อกรัม) ขณะที่ผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกใน $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสในส่วนต้นต่ำที่สุด (3.54 มิลลิกรัมต่อกรัม) โดยที่มีการสะสมโพแทสเซียมในส่วนต้นน้อยที่สุด 32.60 และ 43.23 มิลลิกรัมต่อกรัม ในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ ในผักกาดหอมกรีน โอ๊คและเรดโอ๊ค ตามลำดับ สำหรับการสะสมโซเดียมในการทดลองฤดูหนาว พบว่าผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค ที่ปลูกในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีการสะสมโซเดียมในส่วนต้นสูงที่สุด ที่ 1.92 และ 2.93 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่า การลดความเข้มข้นของ KH_2PO_4 เป็น 0.1 มิลลิโมลาร์ และ KCl เป็น 0.5 มิลลิโมลาร์ ทำให้มีการสะสมโซเดียมในผักกาดหอมทั้งสองชนิดที่ปลูกในฤดูหนาว และผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในฤดูฝนมีค่าสูงที่สุด จากการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าการใช้สารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกผักกาดหอมในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ หรือ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ ทำให้การสะสมธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมลดลง โดยการสะสม

โซเดียมไม่เพิ่มขึ้น รวมทั้งไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมทั้งสองพันธุ์ในทั้งสองฤดูปลูก ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับผลิตผักฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่ำในระบบไฮโดรโพนิกส์ได้

คำสำคัญ : โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม ไฮโดรโพนิกส์ ผักกาดหอม

Title Production of low potassium and phosphorus vegetables in hydroponic system

Author Miss Rujira Tadi

Degree Master of Science in Soil Science

Advisory Committee Chairperson Assistant Professor Dr. Sawika Konsaeng

ABSTRACT

Potassium and phosphorus are essential nutrients for plants. They are also important in human body as an electrolyte balance. The renal function of chronic kidney disease patients is failure so they cannot excrete the whole minerals results in high accumulation of mineral nutrients in the blood when high in phosphorus and potassium vegetables are eaten. This study aimed to determine the effect of reducing the amount of potassium and phosphorus in solution culture on growth, yield and accumulation of potassium and phosphorus in hydroponically grown vegetables with reduced potassium and phosphorus in different growing seasons. The research included two trials.

Experiment 1 was conducted to determine the effects of reducing phosphorus and potassium content on growth, yield and nutrient accumulation in green oak lettuce. A completely randomized design (CRD) with 4 replications was applied for this experiment which was divided into 2 sub-trials. Experiment 1.1 was studied on the effects of phosphorus reduction on growth, yield and nutrient accumulation in green oak lettuce. The four treatments consisted of 0.1, 0.2, 0.3 and 0.6 mM of KH_2PO_4 concentrations in nutrient solution (P0.1, P0.2, P0.3 and P0.6, respectively). The results showed that the reducing of phosphorus concentrations in nutrient solutions by 1/3 times (P0.2) and 1/6 times (P0.1) decreased phosphorus accumulation in green oak decreased by 64 % and 21 %, respectively. Experiment 1.2 investigated the effect of reducing potassium content on growth, yield and nutrient accumulation in green oak lettuce. The treatments included four of KCl concentrations in nutrient solutions: 0.5, 1, 2 and 4 mM (K0.5, K1, K2 and K4

respectively). The results showed that the 1/4 times (K1) and 1/8 times (K0.5), the decreasing of potassium decreased its accumulation in green oak for 44 % and 26 %, respectively. The SPAD value was found to decrease when potassium concentration was reduced, but it was not affected by phosphorus concentration reduction. However, no effects on growth and fresh weight of green oak lettuce were found in both sub-trials.

Experiment 2 was carried out to investigate the effect of reducing phosphorus and potassium content on growth and nutrient accumulation in green oak and red oak in different growing seasons. The experiment was designed as completely randomized design (CRD) with four replications. There were four treatments of varying concentrations of KH_2PO_4 and KCl including 0.1 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$), 0.1 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl ($P_{0.1}$-$K_{1.0}$), 0.3 mM KH_2PO_4 + 0.5 mM KCl ($P_{0.3}$-$K_{0.5}$) และ 0.3 mM KH_2PO_4 + 1.0 mM KCl ($P_{0.3}$-$K_{1.0}$). Experiment was conducted in the rainy and winter. In the rainy season, there was a significant difference in growth and fresh weight while there was no difference among the treatments in both lettuces. Green oak and red oak lettuce grown in $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ had the lowest phosphorus accumulation in shoot which was 1.89 and 2.96 mg/g, respectively. $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ had the lowest accumulation of potassium in the upper part that were 37.82 and 50.41 mg/g, respectively. On the other hand, the sodium accumulation of red oak lettuce was found to be the highest, at 1.03 mg/g. However, it was found that the sodium accumulation of green oak lettuce in shoot was not different among the experimental treatments. Winter vegetable growth was found to respond to different concentrations of phosphorus and potassium in nutrient solutions in both types of lettuce. No significant difference was observed in SPAD values, canopy width and fresh weight at harvest of green oak lettuce while there was a difference in height, root length and number of leaves. For red oak lettuce, there was a significant difference among treatments in the canopy width, number of leaves and fresh weight. There was no difference in height, root length and SPAD value. Nutrient accumulation in winter experiments showed that green oak lettuce grown in $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ had the lowest phosphorus accumulation (3.10 mg/g) while the

lowest phosphorus accumulation of red oak lettuce was found in $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ (3.54 mg/g). The lowest accumulation of potassium in shoot were 32.60 and 43.23 mg/g in $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ in lettuce green oak and red oak, respectively. For sodium accumulation in winter experiments, green oak and red oak lettuce grown in $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ had the highest sodium accumulation in the plant which were 1.92 and 2.93 mg/g, respectively. However, the reducing of KH_2PO_4 to 0.1 mM and KCl to 0.5 mM resulted in the highest sodium accumulation in both types of lettuce grown in winter and red oak lettuce grown in the rainy season. From this study, it could be concluded that growing lettuce in nutrient solution with $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ or $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ resulted in decreasing of phosphorus and potassium accumulation without increasing of sodium. Moreover, there was no effects on growth of both lettuce varieties growing in both raining and winter. These could be used as a guideline for developing nutrient solution for low phosphorus and potassium vegetable production in hydroponic system.

Keywords : Potassium phosphorus sodium hydroponics lettuce

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิกา กอนแสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการศึกษาค้นคว้าและการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาสนา วิรุญรัตน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญนภา จักรสมศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ แนะแนวทางในการทำวิจัยและตรวจสอบความบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศ ยิ้มแย้ม ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากฝ่ายบัณฑิตศึกษา สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “ทุนศิษย์ก้นกุฏิ ประจำปีการศึกษา 2564 ”

ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดาที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลืออุปการะค่าใช้จ่ายต่างๆ รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยจนทำให้โครงงานวิจัยนี้สำเร็จ ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

รุจิรา ตะดิ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฌ

สารบัญ ..... ญ

สารบัญตาราง ..... ฐ

สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความสำคัญและที่มา 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

กรอบแนวคิดและสมมติฐานงานวิจัย 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร 4

2.1 ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังในประเทศไทย 4

2.2 ฟอสฟอรัส (Phosphorus - P) 5

2.2.1 บทบาทและความสำคัญของฟอสฟอรัส 5

2.2.2 การตอบสนองของพืชในสภาวะขาดแคลนฟอสฟอรัส 6

2.3 โพแทสเซียม (Potassium - K) 9

2.3.1 บทบาทและความสำคัญของโพแทสเซียม 9

2.3.2 การตอบสนองของพืชในสภาวะขาดแคลนโพแทสเซียม 12

2.4 โซเดียม (Sodium – Na) 14

2.4.1 บทบาทและความสำคัญของโซเดียม 14

2.5 คุณค่าทางโภชนาการของผักกาดหอม 17
2.5.1 ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค 18
2.5.2 ผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ค 19
2.6 ไฮโดรโปนิกส์ 20
2.6.1 ระบบการปลูกพืชแบบโฮโดรโพนิกส์ 21
2.6.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต 23
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย 30
3.1 การทดลองที่ 1 ผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 30
3.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในฤดูปลูกที่ต่างกัน 34
บทที่ 4 ผลการทดลอง 37
4.1 การทดลองที่ 1 ผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 37
4.1.1 การทดลองที่ 1.1 ผลของการลดปริมาณธาตุฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 37
4.1.2 การทดลองที่ 1.2 ผลของการลดปริมาณธาตุโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 41
4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในฤดูปลูกที่ต่างกัน 47
4.2.1 การทดลองที่ 2.1 การทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายแตกต่างกัน 4 ระดับ ในฤดูฝน (มิถุนายน-สิงหาคม 2565) 47

4.2.2 การทดลองที่ 2.2 การทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายแตกต่างกัน 4 ระดับ ในฤดูหนาว (ตุลาคม - ธันวาคม 2565) 57

บทที่ 5 วิจารณ์ผลการศึกษา 69

การทดลองที่ 1 ผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 69

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่ออาการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในฤดูปลูกที่ต่างกัน 71

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา 74

บรรณานุกรม 75

ประวัติผู้วิจัย 87

สารบัญตาราง

หน้า

Table 1 Concentration of chemical compositions in modified Enshi solution..... 31

Table 2 Concentration of KH_2PO_4 and KCl in solution..... 34

Table 3 Plant 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)..... 39

Table 4 Plant 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). 43

Table 5 Plant 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)..... 51

Table 6 Plant height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of red oak lettuce in hydroponic system at harvest (42 days after sowing). 52

Table 7 Plant height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of green oak lettuce in hydroponic system at harvest (42 days after sowing). 61

Table 8 Plant height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of red oak lettuce in hydroponic system at harvest (42 days after sowing). 62

สารบัญภาพ

หน้า

Figure 1 Green Oak 18

Figure 2 Red Oak 19

Figure 3 Growth of green oak lettuce at 28 and 35 days after sowing. 38

Figure 4 The accumulation of phosphorus and potassium in green oak lettuce supplied with four different levels of KH_2PO_4. 40

Figure 5 Growth of green oak lettuce by week (28 and 35 days after sowing. 42

Figure 6 The accumulation of phosphorus and potassium in green oak lettuce supplied with four different levels of potassium chloride. 44

Figure 7 Light intensity during summer (April-May 2022) 45

Figure 8 Temperature during summer (April-May 2022) 45

Figure 9 Relative humidity during summer (April-May 2022) 46

Figure 10 Growth of green oak lettuce at 21, 28 and 35 days after sowing. 48

Figure 11 Growth of red oak lettuce by week at 21, 28 and 35 days after sowing. 50

Figure 12 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in green oak planted during the rainy season. 53

Figure 13 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in red oak planted during the rainy season. 54

Figure 14 Light intensity during rainy season (June-August 2022) 55

Figure 15 Temperature during the rainy season (June-August 2022) 55

Figure 16 Relative humidity during the rainy season (June-August 2022) 56

Figure 17 Growth of green oak lettuce at 21, 28 and 35 days after sowing. 58

Figure 18 Growth of red oak lettuce at 21, 28 and 35 days after sowing. 60

Figure 19 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in green oak planted during winter. 64

Figure 20 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in red oak planted during winter. 66

Figure 21Light intensity during winter season (November-December 2022) 67

Figure 22 Temperature during the winter season (November-December 2022) 67

Figure 23 Relative humidity during the winter season (November-December 2022) ... 68

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญและที่มา

ในประเทศไทยพบผู้ป่วยโรคไตเป็นอันดับ 3 ของประเทศ โดยมีผู้ป่วยโรคไตประมาณ 8 ล้านคน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (กนกพร และคณะ, 2562) จากการรับประทานอาหารที่มีโซเดียมสูง รวมทั้งการบริโภคอาหาร เนื้อสัตว์ ผักใบเขียวและผลไม้ ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูง เนื่องจากผู้ป่วยโรคไตและผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง (Chronic Kidney Disease; CKD) หน่วยไตไม่สามารถขับแร่ธาตุออกมาได้หมด ส่งผลให้เกิดการสะสมของแร่ธาตุในเลือดสูงจนหัวใจทำงานผิดปกติ เป็นสาเหตุการเสียชีวิตแบบเฉียบพลัน จากอาการหัวใจล้มเหลว (Putcha and Allon, 2007) ซึ่งฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารจำเป็นสำหรับพืช รวมทั้งเป็นธาตุที่มีผลต่อสมดุลอิเล็กโทรไลต์ในร่างกายของมนุษย์ มีความสำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง ที่มีภาวะไตเสื่อม ส่งผลต่อการทำงานของไต หากมีการรับประทานพืชผักที่มีโพแทสเซียมหรือฟอสฟอรัสที่สูง อาจทำให้เกิดภาวะโพแทสเซียมเกิน (hyperkalemia) และภาวะฟอสเฟตเกิน (hyperphosphatemia) ไตต้องทำงานหนักในการขับแร่ธาตุ ผู้ป่วยควรเลือกบริโภคผักให้เหมาะสมทั้งเรื่องชนิดและปริมาณ เพื่อเป็นการควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่กระทบต่อโรค ทั้งนี้ หากผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังมีข้อจำกัดในการบริโภคผัก อาจทำให้ร่างกายขาดวิตามิน เกลือแร่ และโภชนาการอื่นๆ ตามมา (กนกพร และคณะ, 2562) ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในผัก ได้แก่ สภาพแวดล้อม แหล่งที่ปลูก อัตราการใส่ปุ๋ย ช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวผลผลิต และชนิดของผัก ผักที่มีฟอสฟอรัสต่ำ ได้แก่ สมุนไพร ขิง ชา ใบเตย มะนาวและอัญชัน (ณัฐพล, 2557) ผักที่มีโพแทสเซียมต่ำ ได้แก่ ผักในกลุ่มสีเขียวอ่อนหรือสีขาว ได้แก่บวบเหลี่ยม ถั่วพู หอมหัวใหญ่ และผักกาดขาว เป็นต้น (ชวลิต, 2561) ในคนปกติควรได้รับฟอสฟอรัสจากการบริโภคอาหารวันละ 800-1,000 มิลลิกรัมต่อวัน หรือ 300 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด โพแทสเซียมวันละ 2,000 -3,500 มิลลิกรัมต่อวัน หรือ 200 มิลลิกรัม โพแทสเซียมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด (Pollock *et a*l., 2005) และควรได้รับโซเดียมไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อวัน หรือ 50 มิลลิกรัม โซเดียมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด (Megan and Dominique, 2018) และควรมีระดับฟอสฟอรัสปกติในเลือด 3.5 – 5.5 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร ระดับโพแทสเซียมอยู่ในเลือด 3.5 - 5.5 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร และโดยปกติกลไกลของร่างกายจะรักษาความเข้มข้นของโซเดียมภายในเซลล์ไว้ที่ 10 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร ส่วนภายนอกเซลล์(ในเลือด)จะมีความเข้มข้นที่ 135-145 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร

ปัจจุบันการปลูกพืชในระบบไฮโดรโปนิกส์ (hydroponics) หรือการปลูกพืชไร้ดิน ได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการจัดการธาตุอาหารที่พืชต้องการได้

อย่างเหมาะสม (ดิเรก, 2550) อีกทั้งยังสามารถลดปัญหาโรคและแมลงที่ในดิน สามารถควบคุมปริมาณและคุณภาพของผักได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถผลิตผักได้ตลอดทั้งปี มีความสะอาดและปลอดภัยจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ปัจจัยของการปลูกพืชไม่ใช้ดินที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ สารละลายธาตุอาหาร เนื่องจากพืชมีการใช้สารละลายธาตุอาหารตลอดเวลา การเลือกใช้สูตรสารละลายที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญมาก เพื่อประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายและพืชยังได้ใช้ปุ๋ยในรูปอนินทรียโดยตรง ทำให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างเหมาะสมจึงสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้เร็วขึ้น (โสระยา, 2554) รวมทั้งสามารถพัฒนาไปเป็นการผลิตผักที่สามารถควบคุมปริมาณธาตุอาหารได้ เช่น ในประเทศญี่ปุ่นมีงานวิจัยที่สามารถลดปริมาณโพแทสเซียมในผักโขมและสวิสชาร์ดลงได้ 10 - 32% โดยการลดปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ลง 75% การลดลงของโพแทสเซียมทำให้ผลผลิตของสวิสชาร์ดลดลงประมาณ 1 เท่า (D'Imperio *et al*., 2019) อย่างไรก็ตาม Tomemori *et al*. (2002) พบว่า ผักปวยเล้งที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีโพแทสเซียมต่ำจะดูดใช้โซเดียมสูงกว่าปวยเล้งที่ได้รับโพแทสเซียมในปริมาณปกติ การที่พืชมีปริมาณโซเดียมสูงนั้นเนื่องจากพืชต้องนำเอาโซเดียมไปทำหน้าที่ทดแทนโพแทสเซียมที่ลดลง เพื่อให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ (กนกพร และคณะ, 2562) และการลดปริมาณฟอสฟอรัสให้อยู่ในระดับที่ต่ำหากปลูกผักในระบบไฮโดรโพนิกส์จะทำให้พืชสามารถดูดธาตุอาหารได้เลยทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดใช้ฟอสฟอรัสในกรณีที่มีฟอสฟอรัสต่ำ โดยไม่กระทบต่อการเจริญเติบโต (Adams, 2002) แต่การขาดธาตุฟอสฟอรัสจะกระตุ้นการสร้างขนราก ซึ่งฟอสเฟตจะมีผลมากต่อทั้งความยาวและความหนาแน่นของขนรากจะเพิ่มขึ้น จะเพิ่มความสามารถในการดูดซึมของราก และประสิทธิภาพการดูดซึมของขนรากยังเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อปริมาณฟอสเฟตลดลง นอกจากนี้ยังทำให้อัตราส่วนของยอดลดลง และลดการสะสมฟอสฟอรัสในพืช (Zhu *et al*., 2020) ในประเทศไทยยังมีการศึกษาค่อยข้างน้อยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาแนวทางในการลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในผัก ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตน้อยที่สุด โดยนำเอาเทคโนโลยีการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์ (hydroponic) มาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณธาตุอาหารในสารละลายที่ให้แก่พืชได้ง่ายและใช้เป็นแนวทางในการผลิตผักที่มีปริมาณโพแทสเซียม ฟอสฟอรัสและโซเดียมต่ำสำหรับเป็นทางเลือกในการบริโภคแก่ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทดสอบสูตรสารละลายธาตุอาหารที่มีการลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในการปลูกผักใบในระบบไฮโดรโปนิกส์

2. เพื่อประเมินการเจริญเติบโต และการสะสมของธาตุโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในผักใบที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์ที่มีการลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในฤดูปลูกที่แตกต่างกัน

กรอบแนวคิดและสมมติฐานงานวิจัย

การควบคุมการใช้ปริมาณธาตุอาหารในพืชในระบบไฮโดรโปนิกส์ที่ส่งผลต่อการลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในการปลูกผักสลัดที่มีผลต่อการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างจากการปลูกโดยทั่วไปแต่ส่งผลต่อการลดระดับธาตุอาหารที่ส่งผลดีแก่ผู้ป่วยโรคไต

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สูตรสารละลายธาตุอาหารที่มีการลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสสำหรับปลูกผักใบโดยไม่กระทบต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต

2. สามารถผลิตผักที่มีปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสสะสมต่ำเพื่อเป็นทางเลือกในการบริโภคผักสำหรับผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง

บทที่ 2
ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

2.1 ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังในประเทศไทย

ในประเทศไทยพบผู้ป่วยโรคไตเป็นอันดับ 3 ของประเทศ โดยมีผู้ป่วยโรคไตประมาณ 8 ล้านคน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (กนกพร และคณะ, 2562) ไต (kidney) เป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่ในการกรองของเสียออกจากร่างกายรวมทั้งแร่ธาตุ ในปัจจุบันเป็นยุคที่เสี่ยงต่อการเป็นโรคไตเสื่อมกันมาก โดยโรคไตเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญ ทำให้เกิดภาวะแทรกซ้อนทางระบบหัวใจและหลอดเลือด และเป็นสาเหตุทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตก่อนวัยอันควร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก (อารีรัตน์ และคณะ, 2564) พบโรคไตเรื้อรังประมาณร้อยละ 13.41 ในประเทศไทย พบสถิติผู้ป่วยโรคไตมีอัตราการเสียชีวิตคิดเป็นอัตราส่วน 24.4 ต่อประชากร 100,000 คน โดยพบว่ามีคนไทยป่วยเป็นโรคไตเรื้อรังร้อยละ 17.5 ของประชากรหรือประมาณ 8 ล้านคน เป็นผู้ป่วยโรคไตวาย 2 แสนคน และมีอัตราเพิ่มขึ้นปีละกว่า 7,800 คน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยโดยเฉพาะผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะที่ 5 ที่ต้องรับการบำบัดทดแทนไต เช่น การฟอกเลือด การล้างไตทางช่องท้อง หรือการปลูกถ่ายไต โรคไตเรื้อรังพบเป็นภาวะแทรกซ้อนที่สำคัญในผู้ป่วยโรคเบาหวานและผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูง เสี่ยงต่อการเป็นโรคไตเรื้อรังมากกว่าคนปกติถึง 1.6 - 1.9 เท่า หน้าที่ของไตที่สำคัญคือ การรักษาสมดุลของน้ำและสารต่างๆ ในร่างกายให้คงที่ตลอดเวลา (homeostasis) โดยอาศัยกระบวนการทำงานของหน่วยไต 3 กระบวนการ คือ กระบวนการการกรองของโกลเมอรูลัส (glomerular filtration) กระบวนการดูดกลับสาร และน้ำ (tubular reabsorption)กระบวนการหลั่งสาร (tubular secretion) ผลสุดท้ายจะขับถ่ายสาร (renal excretion) ที่ร่างกายไม่ต้องการ ไตสามารถปรับตัวได้ดีแม้ว่าไตจะเสื่อมลงร้อยละ 60-70 ไตยังทำหน้าที่ได้ตามปกติ ทำให้ไม่ปรากฏอาการแสดงในระยะที่ 1-3 ผู้ป่วยจึงไม่รู้ตัวและขาดการป้องกันโรคไตเรื้อรังที่เหมาะสมในระยะแรก (ปริมประภา และปัทมา, 2562)

ผู้ป่วยโรคไตควรหลีกเลี่ยงการรับประทานผักผลไม้ที่มีสารที่มีกรดออกซาริก (oxalic acid) ปริมาณสูง ซึ่งสามารถจับกับแคลเซียมตกตะกอนเป็นก้อนนิ่วที่ไต ทำให้เกิด acute oxalate nephropathy ผู้ป่วยมักจะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดเอว ปัสสาวะปริมาณลดลง ผลการตรวจปัสสาวะอาจพบเม็ดเลือดแดงปนร่วมกับผลึกแคลเซียมออกซาเรท (calcium oxalate crystals) ตัวอย่างที่พบได้บ่อย คือ ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง (ชวลิต, 2561) ไตต้องทำงานหนักในการขับแร่ธาตุ ผู้ป่วย

ควรเลือกบริโภคผักและผลไม้ให้เหมาะสมทั้งเรื่องชนิดและปริมาณ เพื่อเป็นการควบคุมปริมาณโพแทสเซียมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่มีผลกระทบต่อโรค นอกจากนี้ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังควรหลีกเลี่ยงการบริโภคผัก ผลไม้ที่มีปริมาณโพแทสเซียม (potassium) สูง ทำให้เกิดภาวะโพแทสเซียมเกิน (hyperkalemia) งดโปรตีนจากพืช เช่น ถั่วเมล็ดแห้ง และผลิตภัณฑ์จากถั่ว เนื่องจากโปรตีนสูง แต่คุณภาพต่ำ อาหารที่มีฟอสเฟตสูง เมล็ดพืชแห้ง ธัญพืช ทำให้เกิดภาวะฟอสเฟตเกิน (hyperphosphatemia) ได้ (นพมาศ, 2556)

2.2 ฟอสฟอรัส (Phosphorus - P)

2.2.1 บทบาทและความสำคัญของฟอสฟอรัส

"ฟอสฟอรัส หรือ ฟอสเฟต" เป็นแร่ธาตุสำคัญชนิดหนึ่ง ที่อยู่ในร่างกายปริมาณมากรองจากแคลเซียม โดยส่วนใหญ่มันจะถูกเก็บไว้ในกระดูกของเราถึง 80 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นจะถูกเก็บไว้ที่กล้ามเนื้อและเลือด โดยอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต มีหน้าที่กระตุ้นการทำงานของระบบประสาท กระตุ้นการหดตัวของกล้ามเนื้อ และเป็นโครงสร้างสำคัญของกระดูกและฟัน และช่วยให้ร่างกายนำพลังงานจากอาหารออกมาใช้ ซึ่งในคนปกติหากได้รับฟอสฟอรัสเกินก็จะถูกขับทิ้งทางไตออกมาในรูปของปัสสาวะ แต่คนที่ไตไม่สามารถทำงานได้ตามปกติหรือไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพก็จะมีการคั่งของฟอสฟอรัสในเลือด ซึ่งการที่มีฟอสฟอรัสสะสมในเลือดสูง ก็จะทำให้เกิดอาการคันตามผิวหนัง กระดูกบางและเปราะ หลอดเลือดแดงแข็งและนอกจากนี้ฟอสฟอรัสจะไปจับตัวกับแคลเซียมส่งผลให้มีก้อนแคลเซียมเกาะตามเนื้อเยื่อต่างๆซึ่งทำให้เกิดเป็นแผลเรื้อรังได้ ปกติแล้วระดับฟอสฟอรัสในเลือดอยู่ที่ 2.4-5.1 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร หากระดับฟอสฟอรัสในเลือดสูงมากกว่า 4.8 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร จะต้องมีการจำกัดฟอสฟอรัสให้ต่ำกว่า 800 มิลลิกรัมต่อวัน (เฉลี่ยต่ออาหาร 1 มื้อ ประมาณ 300 มิลลิกรัม) (ณัฐพล, 2557b) โดยอาหารที่มีฟอสฟอรัสสูงและควรจะงดหรือจำกัดปริมาณ แหล่งอาหารของฟอสฟอรัส ฟอสฟอรัสที่มีตามธรรมชาติในอาหาร กลุ่มที่มีโปรตีนสูงฟอสฟอรัสก็มักสูงตามไปด้วย ยกเว้นไข่ขาวที่โปรตีนสูงแต่ฟอสฟอรัสต่ำ พวกนี้ถ้าเรากินเข้าไปแล้วร่างกายจะดูดซึมไปใช้ได้ 40-60 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณครึ่งหนึ่งจากที่กินเข้าไปเท่านั้น เช่น ในนม ไข่แดง เมล็ดธัญพืช ถั่วเมล็ดแห้งต่างๆนั้น จะถูกร่างกายดูดซึมได้น้อยกว่าฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปสารสังเคราะห์ เช่น สารกันบูด สารปรุงรสต่าง ๆ สารปรับแต่งคุณสมบัติของอาหาร (เช่น สารให้ความข้นหนืด สารให้ความควตัว สารแต่งกลิ่นแต่งรส เป็นต้น) แต่พวกนี้ถ้าเรากินเข้าไปแล้ว ร่างกายจะดูดซึมไปใช้ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปหรือเกือบหมดเลยทีเดียว เช่น น้ำอัดลม อาหารแช่เข็ง อาหารแปรรูป อาหารหรือเบเกอรี่ที่มีการใช้ยีตส์หรือผงฟู เป็นต้น เพราะฉะนั้นหากจำเป็นที่จะต้องรับประทานอาหารที่มีฟอสฟอรัสสูงก็ขอให้เลือกรูปแบบที่มีฟอสฟอรัสตามธรรมชาติจะดีกว่ารูปแบบสังเคราะห์ ระดับฟอสฟอรัสในร่างกาย ระดับฟอสฟอรัสปกติในเลือด 3.5 – 5.5 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร ระดับ

ฟอสฟอรัสต่ำในเลือด < 3.5 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร อ่อนเพลีย เบื่ออาหาร กล้ามเนื้ออ่อนแรง และระดับฟอสฟอรัสสูงในเลือด > 5.5 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร คันตามผิวหนัง หลอดเลือดแดงแข็ง มีก้อนแคลเซียมเกาะตามเนื้อเยื่อ ภาวะต่อมพาราไทรอยด์โต กระดูกบางและเปราะ (อุปถัมภ์, 2551)

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต โดยเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นในทุกระยะการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช ธาตุฟอสฟอรัสพบเป็นองค์ประกอบของพืชถึงร้อยละ 0.2-0.8 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบสำคัญของกรดนิวคลีอิก เอนไซม์ โคเอนไซม์ นิวคลีโอไทด์ และฟอสโฟลิปิด (Satyaprakash *et al*., 2017) นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึม สรีรวิทยา และพัฒนาการของพืชด้วย เช่น การสังเคราะห์ด้วยแสง เมแทบอลิซึมของคาร์บอน การสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ และการยืดยาวของราก เป็นต้น ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ที่ดูดซึมโดยพืชจะถูกสะสมไว้ในเมล็ดพืชในรูปของกรดไฟทิก (Phytic acid) ซึ่งเป็นรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ (Ingle and Padole, 2017) ฟอสฟอรัสที่พบในดินมีอยู่ในปริมาณ ร้อยละ 0.5 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) โดยมักพบในรูปของฟอสเฟต (Phosphate) ซึ่งเป็นรูปที่ถูกออกซิไดส์อย่างสมบูรณ์ ในจำนวนของฟอสฟอรัสที่พบในดินนี้มีธาตุฟอสฟอรัสเพียงหนึ่งส่วนในสิบส่วนเท่านั้นที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ในดินปรากฏอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยสร้างพันธะเป็นสารประกอบฟอสเฟตอนินทรีย์อยู่กับธาตุเหล็ก อะลูมิเนียมในดินกรด และแคลเซียมในดินด่าง หรืออยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟตอินทรีย์ เช่น น้ำตาลฟอสเฟต (Sugar phosphate) กรดไฟทิก พอลิฟอสเฟต (Polyphosphate) และฟอสโฟเนต (Phosphonate) เป็นต้น พืชใช้ฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน (Phosphate anion) โดยเฉพาะออร์โทฟอสเฟต (Orthophosphate) ได้แก่ โมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) และไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$) เป็นรูปที่ถูกพืชดูดซึมไปใช้งานได้มากที่สุด(ขนิษฐา และวราภรณ์, 2020) ซึ่งมีอยู่น้อยมาก ทำให้พืชมีโอกาสที่จะเผชิญกับการขาดแคลนฟอสฟอรัสได้ง่าย พืชที่ขาดฟอสฟอรัสจะมีอาการลำต้นแคระแกร็น ใบแก่เป็นสีม่วงแล้วกลายเป็นสีน้ำตาล ไม่ออกดอกและติดผล อย่างไรก็ตาม พืชและจุลินทรีย์บางชนิดมีกลไกที่สามารถละลายฟอสเฟตทั้งฟอสเฟตอินทรีย์ และฟอสเฟตอนินทรีย์ให้ได้ฟอสเฟตไอออนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งองค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของการ ขาดแคลนฟอสฟอรัสในพืช และการแก้ปัญหาด้วยการใช้แบคทีเรียละลายฟอสเฟตจะเป็นประโยชน์ในการนำ ไปประยุกต์ใช้ทางการเกษตร เพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชเศรษฐกิจต่อไป

2.2.2 การตอบสนองของพืชในสภาวะขาดแคลนฟอสฟอรัส

การที่ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอสเฟตอนินทรีย์ ซึ่งเป็นรูปที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ประโยชน์ได้น้อยและเคลื่อนที่ได้ยากโดยปริมาณฟอสเฟตอนินทรีย์ในดินมีอยู่เพียงประมาณ 1-10 ไมโครโมลาร์ในสารละลายดิน ทำให้พืชเกิดสภาวะขาดแคลนฟอสฟอรัสได้ การที่ฟอสเฟตเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ยากเพราะจะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำกับไอออนประจุบวก เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก ใน

สภาวะที่เป็นกรด และแคลเซียมในสภาวะที่เป็นด่าง (Peret *et al*., 2011) นอกจากนั้นการขาดฟอสฟอรัสยังทำให้พืชขาดโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมได้ด้วย (Onthong and Osaki, 2006) ฟอสฟอรัสจึงเป็นปัจจัยจำกัดของการเจริญเติบโตและพัฒนาการในพืช ดังนั้นพืชจึงต้องมีการปรับตัวทั้งด้านสรีรวิทยาและสัณฐานวิทยา เพื่อลดการใช้ฟอสเฟตและเพิ่มการนำฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์และนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น การยับยั้งการเจริญเติบโตของรากแก้ว เพิ่มการสร้างรากแขนง เพิ่มจำนวนขนราก เพื่อเพิ่มการนำฟอสเฟตไปใช้ โครงสร้างของรากพืชมีการปรับเปลี่ยนไปตามปริมาณฟอสเฟต เกิดการเปลี่ยนอัตราการเจริญเติบโตของรากต่อยอด (Root-to-shoot growth ratio) ซึ่งเป็นการตอบสนองโดยทั่วไปของพืชเมื่อมีการขาดแคลนธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสเฟต หรือกำมะถัน ทำให้น้ำหนักแห้งของรากเพิ่มขึ้นหรือมีการเจริญเติบโตของรากมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่ารากแก้วจะแตกรากแขนงมากขึ้นและมีขนรากมากขึ้น ทำให้รากแผ่ขยายไปในดินชั้นบนที่มีฟอสเฟตสะสมอยู่ได้ดีขึ้น ทั้งนี้การขาดธาตุอาหารที่จำเป็น เช่น เหล็ก สังกะสี แมงกานีส และฟอสฟอรัส จะกระตุ้นการสร้างขนราก ซึ่งฟอสเฟตจะมีผลมากต่อทั้งความยาวและความหนาแน่นของขนราก ความหนาแน่นของขนรากจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณฟอสเฟตที่นำไปใช้ได้ในดินลดลง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซึมของรากและประสิทธิภาพการดูดซึมของขนรากยังเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มความหนาแน่นของขนรากเกิดจากการลดความยาวของเซลล์ในชั้นอีพิเดอร์มิสเมื่อปริมาณฟอสเฟตลดลง (Peret *et al*., 2011) ซึ่งทำให้มีจำนวนขนรากมากขึ้นต่อหน่วยความยาวของรากและขนรากยาวขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ชีวมวลของยอดลดลงและลดการสะสมฟอสฟอรัสในพืช (Zhu *et al*., 2020)

นอกจากนี้ในสภาวะที่ขาดฟอสฟอรัส กระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชจะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน เมื่อในดินมีฟอสเฟตมาก ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและกิจกรรมของเอนไซม์ที่ไฮโดรไลซ์น้ำตาลในรากจะเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ ATP ในรากลดลง เมื่อฟอสฟอรัสที่นำไปใช้ได้ในดินต่ำลง ลดการเจริญของปมและลดกิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรจีเนสที่ปมรากถั่วเหลือง ถั่วโคลเวอร์ขาว ที่เจริญเติบโตในสภาวะที่ฟอสฟอรัสจำกัดจะมีความเข้มข้นของกรดอะมิโนในเนื้อเยื่อรากสูงขึ้น รวมทั้งยังส่งผลต่อการปรับแรงดันออสโมติกของรากและการควบคุมการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการต้านอนุมูลอิสระ หมวกรากเป็นบริเวณที่รับสัญญาณจากฟอสฟอรัสที่อยู่ภายนอก แรงดันออสโมติกของของเหลวในเซลล์ของหมวกรากจะขึ้นกับปริมาณฟอสฟอรัส การขาดฟอสฟอรัสจะเพิ่มการไหลของโปรตอนออกจากราก ทำให้ไรโซสเฟียร์เป็นกรด ซึ่งจะทำให้ธาตุอาหารต่างๆ ในดินอยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ได้มากขึ้น (Zhu *et al*., 2020) เมื่อพืชเผชิญกับสภาวะขาดแคลนฟอสฟอรัส การหลั่งกรดออกจากรากจะเพิ่มขึ้น เช่น การหลั่งกรดซิตริกและ กรดมาลิกจะเพิ่มขึ้นในบริเวณรากของ *Brassica napus*

ทำให้ดูดซับฟอสฟอรัสจากหินฟอสเฟตได้ดีขึ้น ใน Raghanus sativus จะหลั่งกรดมาลิกและกรดซักซินิกเพิ่มขึ้น 60 และ 15 เท่า (Zhang *et al*., 1997) ถั่วเหลือง จีโนไทป์ที่เจริญเติบโตได้ดีในดินที่ขาดแคลนฟอสฟอรัส จะยังมีการดูดซึมฟอสเฟตเพิ่มขึ้นและสังเคราะห์น้ำตาล ที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นในสภาวะดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบกับถั่วเหลืองจีโนไทป์ที่เจริญเติบโตได้ไม่ดีในสภาวะเดียวกัน (Zhu *et al*., 2020) พืชบางชนิดปรับตัวโดยการอยู่ร่วมกับไมคอไรซาเพื่อเพิ่มการดูดซึมฟอสเฟตไอออน ส่วนในกลุ่มของพืช ที่ไม่อยู่ร่วมกับไมคอไรซาในบางวงศ์ (Family) เช่น Proteaceae, Casuarinaceae, Fabaceae และ Myricaceae จะสร้างรากกลุ่ม (Cluster root) ที่รากแขนง เพื่อเพิ่มการดูดซึมฟอสเฟต (Peret *et al*., 2011) รากกลุ่มเป็นรากที่แตกแขนงในลักษณะคล้ายแปรงล้างขวด ซึ่งแตกออกมาจากชั้นเพอริไซเคิลของรากแขนง เป็นการปรับตัวที่สำคัญของพืชเพื่อตอบสนองต่อสภาวะที่ขาดแคลนฟอสฟอรัส (ขนิษฐา และวราภรณ์, 2020)

2.3 โพแทสเซียม (Potassium - K)

2.3.1 บทบาทและความสำคัญของโพแทสเซียม

โพแทสเซียม (K) เป็นแร่ธาตุที่จำเป็นมีมากเป็นอันดับ 3 ในร่างกาย รองจากแคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นแร่ธาตุที่พบได้ในอาหารทั่วๆไป ช่วยทำให้การทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจและระบบประสาทปกติ ช่วยรักษาระดับสมดุลอิเล็กโทรไรต์และค่าพีเอช (pH) ของระบบของเหลวในร่างกาย ควบคุมการทำงานของเอนไซม์และการไหลเวียนของของเหลว ทำหน้าที่รักษาสมดุลน้ำและเกลือแร่ (Talukder et al., 2016) ซึ่งโพแทสเซียมประมาณร้อยละ 98 ถูกเก็บสะสมอยู่ภายในเซลล์ต่างๆ (intracellular) โดยเฉพาะเซลล์กล้ามเนื้อลายเป็นหลัก และอาจพบได้ในเซลล์เม็ดเลือดแดง หรือเซลล์ตับ ส่วนที่เหลือกระจายอยู่ภายนอกเซลล์ (extracellular) เช่น ในกระแสเลือด เป็นต้น โพแทสเซียมมีความสามารถในการเข้าออกเซลล์ได้อย่างอิสระขึ้นกับความต้องการของร่างกาย มีหน้าที่ทางสรีรวิทยาหลายประการในเซลล์ ได้แก่ การช่วยในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและไกลโคเจน กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ (Viera and Wouk, 2015) การเจริญเติบโตของร่างกาย และที่สำคัญที่สุดคือตัวกำหนดศักย์ทำงาน (action potential) ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ส่งผลให้เกิดกระบวนการต่างๆ นำไปสู่การตอบสนองต่อสิ่งเร้า เช่น การส่งกระแสประสาท การหดตัวของกล้ามเนื้อ เป็นต้น ระดับโพแทสเซียมในร่างกายขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การรับประทานอาหาร การขจัดออกจากทางเดินอาหาร ผลจากฮอร์โมนชนิดต่างๆ ระดับโพแทสเซียมที่ต้องการต่อวันอยู่ที่ประมาณ 100 มิลลิอิควิวาเลนท์ เพื่อป้องกันการเกิดโรคความดันโลหิตสูงและโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบหัวใจและหลอดเลือด โดยทั่วไปควรรับประทานอาหารที่มีโพแทสเซียมประมาณ 50-150 มิลลิอิควิวาเลนท์ และจะมีการขับออกผ่านทางอุจจาระเพียง 10-20 มิลลิอิควิวาเลนท์ต่อวัน ทั้งนี้อาจมีการสูญเสียโพแทสเซียมจากทางเดินอาหารมากขึ้นในผู้ป่วยที่มีอาการท้องเสีย และผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของเลือดมีผลทำให้ระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมในเลือดเพิ่มขึ้นได้ สาเหตุของการเกิดภาวะโพแทสเซียมในเลือดสูงเกิดจากการกำจัดโพแทสเซียมออกจากร่างกายได้น้อยลง (impaired potassium excretion) เป็นสาเหตุที่พบได้บ่อยที่สุด ภาวะนี้สามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุร่วมกัน โดยเฉพาะผู้ป่วยที่มีปัญหาโรคไต หรือไตทำงานบกพร่อง ร่วมกับภาวะน้ำตาลในเลือดสูง และมีการใช้ยาที่มีผลข้างเคียงทำให้ระดับโพแทสเซียมสูงได้ เช่น ยาลดความดันโลหิตกลุ่ม ACEI ยากลุ่ม ARB ยากลุ่ม non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) และยาขับปัสสาวะกลุ่ม potassium-sparing เป็นต้น (Brophy, 2014) จากรายงานของ ชวลิต (2561) พบว่า ปริมาณโพแทสเซียมในผักจะแบ่งออก 3 ระดับ ดังนี้ 1) ผักที่มีโพแทสเซียมสูง (กลุ่มผักสีเข้ม) มีปริมาณ โพแทสเซียม 200-400 มิลลิกรัม 100 กรัมน้ำหนักสด ขึ้นไป ได้แก่ ถั่วเมล็ดแห้ง นมและผลิตภัณฑ์จากนม ทุเรียน กล้วย ลำไย ผลไม้แห้งต่างๆ เช่น ลูกเกด ลูกพรุน แครอท มะเขือเทศ หน่อไม้ฝรั่ง คะน้า ผักชี มันฝรั่ง 2) ผักที่มีโพแทสเซียมปานกลาง 100-200 มิลลิกรัม 100 กรัม

น้ำหนักสด ได้แก่ สับปะรด ฝรั่ง แอปเปิล เงาะ ส้ม องุ่น ลิ้นจี่ แคนตาลูป ส้มโอ มะม่วงดิบ มะเขือยาว หอมหัวใหญ่ ผักบุ้งจีน มะละกอดิบ ถั่วพู (ฝักอ่อน) พริกหวาน อาหาร และ 3) ผักที่มีโพแทสเซียมต่ำ (กลุ่มผักสีซีด) ต้องมีโพแทสเซียม ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม 100 กรัมน้ำหนักสด ได้แก่ ชมพู่ องุ่นเขียว แตงโม บวบเหลี่ยม เห็ดหูหนู ฟักเขียว แฟง ผักกาดขาว กะหล่าปลี แตงกวา ซึ่งผันแปรตามแหล่งผลิต จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจัย ที่มีผลต่อปริมาณโพแทสเซียมในผัก ได้แก่ สภาพ แวดล้อม แหล่งที่ปลูก ชนิด และอัตราการใส่ปุ๋ย ช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวผลผลิต และชนิดของผัก ซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาณโพแทสเซียม โดยผักกลุ่มสีเข้มต้องการโพแทสเซียมที่สูงกว่าผักกลุ่มสีซีด จึงทำให้มีการสะสมในผักและผลไม้สีเข้มมีปริมาณโพแทสเซียมสูง จึงเป็นข้อจำกัดและสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังไม่สามารถบริโภคผัก และผลไม้ได้ ทำให้ร่างกายขาดวิตามิน เกลือแร่ และโภชนาการอื่นๆ ตามมา (กนกพร และคณะ, 2562) ผู้ป่วยที่เป็นโรคไตเรื้อรังควรใส่ใจในการเลือกรับประทานผักผลไม้ ซึ่งเป็นกลุ่มอาหารหลักที่มีผลต่อแร่ธาตุโพแทสเซียมในเลือด การเลือกรับประทานอาหารที่มีโพแทสเซียมต่ำ จะช่วยลดการคั่งของโพแทสเซียมในเลือด และช่วยรักษาสภาวะน้ำในร่างกายให้อยู่ในระดับปกติ ลดภาวะบวมน้ำ รวมทั้งป้องกันการเกิดภาวะหัวใจล้มเหลว ผู้ที่เป็นโรคไตเรื้อรังประสิทธิภาพในการขับโพแทสเซียมจะลดลง ซึ่งทำให้เกิดการคั่งของโพแทสเซียมในเลือดได้ระดับโพแทสเซียมปกติในเลือด 3.5-5.0 มิลลิอิควิวาเลนท์ต่อลิตร ระดับโพแทสเซียมต่ำในเลือด < 3.5 มิลลิอิควิวาเลนท์ต่อลิตร จะมีอาการซึม อ่อนเพลีย คลื่นไส้ เบื่ออาหาร ตะคริว และระดับโพแทสเซียมสูงในเลือด > 5.0 มิลลิอิควิวาเลนท์ต่อลิตร จะเกิดอาการคั่งของน้ำในร่างกาย หายใจลำบาก หัวใจเต้นเร็วผิดปกติ (ณัฐพล, 2557a) หากไตทำงานเป็นปกติจะสามารถขับโพแทสเซียมออกได้สูงถึงร้อยละ 90 ต่อวันของปริมาณที่ร่างกายรับเข้าไป แต่ในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง (chronic kidney disease; CKD) ไตจะไม่สามารถขับโพแทสเซียมออกมาได้หมด เพราะว่าหน่วยไตถูกทำลายลงอย่างต่อเนื่อง จนไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ จึงสะสมโพแทสเซียมทำให้เกิดภาวะโพแทสเซียมในเลือดสูง ส่งผลต่อการทำงานของหัวใจและเป็นสาเหตุการ เสียชีวิตแบบเฉียบพลันเนื่องจากหัวใจล้มเหลว (Putcha and Allon, 2007) โดยปกติเราควรได้รับโพแทสเซียมจากการบริโภคอาหารวันละประมาณ 2,000-3,000 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อวัน แต่สำหรับ ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะที่ 3-4 ควรได้รับไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อวัน ส่วนผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะที่ 5 ไม่ควรเกิน 1,500 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อวัน (Pollock *et al*., 2005) เพื่อการได้รับโภชนาการที่เหมาะสม ดังนั้นผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังควรบริโภคผักและผลไม้ วันละ 200-240 กรัม แบ่งเป็น 2 มื้อๆ ละ 100-120 กรัม โดยผักที่บริโภคควรมีระดับโพแทสเซียม ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม 100 กรัมน้ำหนักสด (ชวลิต, 2561)

โพแทสเซียมยังเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช โดยพืชจะดูดใช้โพแทสเซียมในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่น รองมาจากไนโตรเจน ธาตุโพแทสเซียมในดินที่พืชนำเอาไปใช้เป็นประโยชน์ได้ มีต้นกำเนิดมาจากการสลายตัวของหินและแร่มากมายหลายชนิดในดิน โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปอนุมูลบวก

หรือโพแทสเซียมไอออน เท่านั้นที่พืชจะดึงดูดไปใช้เป็นประโยชน์ได้ถ้าธาตุโพแทสเซียมยังคงอยู่ในรูปของสารประกอบยังไม่แตกตัวออกมาเป็นอนุมูลบวก พืชก็ยังดึงดูดไปใช้เป็นประโยชน์อะไรไม่ได้ อนุมูลโพแทสเซียมในดินอาจจะอยู่ในน้ำในดิน หรือดูดยึดอยู่ที่พื้นผิวของอนุภาคดิน ส่วนใหญ่จะดูดยึดที่พื้นผิวของอนุภาคดินที่มีเนื้อดินละเอียด เช่น ดินเหนียว จึงมีปริมาณของธาตุนี้สูงกว่าดินพวกเนื้อหยาบ เช่น ดินทรายและดินร่วนปนทรายหรือดินที่เป็นกรดมาก ถึงแม้โพแทสเซียมไอออนจะดูดยึดอยู่ที่อนุภาคดินเหนียว รากพืชก็สามารถดึงดูดธาตุนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายๆ โพแทสเซียมเป็นธาตุที่มีความสำคัญที่ช่วยสร้างอาหารให้กับลำต้น เพื่อช่วยให้ลำต้นเจริญเติบโต แข็งแรง ออกผลผลิตได้ดีและมีคุณภาพ กระตุ้นการทำงานของ enzyme ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์แสง การหายใจ การสังเคราะห์แป้ง น้ำตาลและ โปรตีน เป็นต้น ควบคุมแรงดันภายในเซลล์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดน้ำ และการปิดเปิดของปากใบรักษาระดับ pH ในเซลล์ให้อยู่ระหว่าง 6-7 กระตุ้นการทำงานของ nitrate reductase เพื่อเปลี่ยน NO_3^- เป็น NH_4^+ สำหรับการสร้างกรดอะมิโน และโปรตีนช่วยเคลื่อนย้ายสารที่ได้รับจากการสังเคราะห์แสงไปยังแหล่งสะสมช่วยให้ผนังเซลล์หนา เนื้อเยื่อพืชมีเสถียรภาพ ผลผลิตเก็บรักษาได้นาน พืชต้านทานต่อโรค และ แมลง ทั้งยังมีส่วนสำคัญสำหรับคุณภาพผลผลิตทางการ เกษตร เช่น สีสัน ความกรอบ รสชาติ กลิ่น ขนาด และระยะเวลาในการเก็บรักษา (ยงยุทธ, 2552) วิธีการใส่ธาตุโพแทสเซียมควรจะใส่ครั้งละน้อย ๆ แต่บ่อยครั้งหรืออาจจะใส่ในรูปของปุ๋ยชนิดน้ำที่ฉีดให้ทางใบ และการเผาฟางก็เป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มธาตุโพแทสเซียมให้แก่ดิน ในเซลล์ของพืช โพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างที่สำคัญของเอนไซม์กว่า 30 ชนิด ทำให้เปลือกลำต้นแข็งแรง ไม่หักโค่นง่าย ช่วยในขบวนการสร้างแป้งและน้ำตาลตลอดจนการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาลไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน การแบ่งเซลล์ นอกจากนี้ยังช่วยให้พืชมีความต้านทานต่อโรคดีขึ้นเป็นธาตุที่สามารถเคลื่อน ย้ายจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่งของพืชได้รวดเร็ว โดยเฉพาะในขณะที่พืชเริ่มสร้างดอกและเมล็ดโพแทสเซียมจะถูกดึงไปใช้ทันที ในรากพืชพวกธัญพืชธาตุนี้อาจไหลกลับไปสู่ดินได้โดยง่ายในขณะที่พืชแก่และ เซลล์รากเริ่มเสื่อมการปฏิบัติงาน ธาตุนี้อาจถูกฝนชะล้างไปจากใบได้ในขณะฝนตกธาตุโพแทสเซียมในสารละลายของดิน มักอยู่ในสมดุลกับส่วนที่ถูกดินยึดไว้ และส่วนที่อยู่ในแร่ที่มีอยู่ในดิน พืชอาจดูดกินได้ในปริมาณมากเกินความต้องการโดยที่พืชไม่เป็นอันตราย และไม่ได้ใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น ธาตุโพแทสเซียมเป็นธาตุที่สะสมอยู่ทั่วไปในดินและมักละลายในน้ำหรือของเหลวในเนื้อเยื้อได้ดี หน้าที่ของโพแทสเซียมจะต่างจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสโดยไม่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตโดยตรง แต่ทำหน้าที่ในการรักษาสมดุลน้ำในเนื้อเยื้อพืชซึ่งป้องกันไม่ให้เกิดใบเหี่ยวและช่วยให้การคายน้ำของใบพืชเป็นไปอย่างปกติ ธาตุโพแทสเซียมละลายน้ำได้ดี และมีกระจายตัวอยู่ทั่วไปที่ผิวดินและส่วนที่อยู่ลึกลงไปเล็กน้อย ปริมาณของโพแทสเซียมในดินจะเพิ่มขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการสลายตัวของหินในชั้นดิน

เกิดขึ้น หรือมีการทำงานของจุลินทรีย์บางชนิดเท่านั้น พืชต้องการธาตุโพแทสเซียมประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์

2.3.2 การตอบสนองของพืชในสภาวะขาดแคลนโพแทสเซียม

พืชขาดโพแทสเซียม จะส่งผลต่ออัตราการเติบโตและผลผลิตลดลง (Singh *et al*., 2013) โดยพบเนื้อเยื่อตาย ในใบล่างก่อน สาเหตุการขาดธาตุโพแทสเซียมมีหลายประการ เช่น ธรรมชาติของดินมีโพแทสเซียมต่ำโดยเฉพาะในดินที่เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดที่เป็น หินทรายหรือตะกอนอายุมาก การสูญเสียหน้าดิน จากการกร่อน การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในปริมาณที่ต่ำกว่าที่ติดไปกับผลผลิต ซึ่งพบว่ามีการใส่ปุ๋ย โพแทสเซียมในอัตราต่ำกว่าที่ติดไปกับผลผลิต ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ของผลผลิตทั่วโลก (Smil, 1999; Wulff *et al*., 1998) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลง ของสภาพแวดล้อม เช่น การขังน้ำความแห้งแล้ง อุณหภูมิดิน ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้พืชขาดโพแทสเซียม (Mengel and Kirby, 2001) ปริมาณโพแทสเซียมในพืชที่ปลูกในดินต่างกันหรือมีการจัดการดินต่างกันทำให้ การสะสมโพแทสเซียมในผลผลิตพืชมีปริมาณ แตกต่างกัน พืชที่ปลูกในดินที่ขาดโพแทสเซียมหรือเติบโตในสภาพแวดล้อมที่พืชไม่สามารถดึง โพแทสเซียมมาใช้ได้ จะส่งผลให้ปริมาณผลผลิตต่ำ ผลผลิตไม่ได้คุณภาพ ทั้งขนาด รูปร่าง รสชาติ อายุการเก็บรักษา ตลอดจนมีผลต่อการสะสมโภชนสารต่าง ๆ (Cui *et al*., 2020; Stone and Weaver, 2021) พืชที่ขาดโพแทสเซียมจึงเครียดง่ายและมีความสามารถดึงน้ำไปใช้ได้น้อย ขณะที่พืชที่มีปริมาณโพแทสเซียมเหมาะสม ช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการใช้น้ำสูงขึ้น (Ghourab *et al*., 2000) เมื่อพืชขาดโพแทสเซียมจะทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดน้อยลงและได้ ATP ลดลงด้วย ทำให้พืชมีจำนวนใบลดลง และมีขนาดใบที่เล็กลง (Hasanuzzaman *et al*., 2018) การที่พืช ขาดโพแทสเซียมยังส่งผลให้การเคลื่อนย้าย อิเล็กตรอนในคลอโรพลาสต์เกิดขึ้นมากเกินไป อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนใน บริเวณนั้น เกิดเป็นอนุมูลอิสระพวกออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive oxygen species, ROS) (ยงยุทธ, 2559) และเข้าทำลายคลอโรพลาสต์ (Cakmak, 2005) ซึ่งเป็นอวัยวะเซลล์ที่มี สารคลอโรฟิลล์บรรจุอยู่ ทำให้ใบพืชเกิดภาวะ พร่องคลอโรฟิลล์ และอาจเกิดภาวะเนื้อเยื่อตาย การให้โพแทสเซียมกับพืชปริมาณที่เหมาะสม และทันท่วงที จะช่วยลดการขนส่งอิเล็กตรอนเข้าไปในคลอโรพลาสต์และยับยั้งการทำงาน ของเอนไซม์ NADPH oxidase และเอนไซม์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ROS (Romheld and Kirkby, 2010; Wang *et al*., 2013) ดังนั้นถ้าโพแทสเซียมในพืชไม่เพียงพอ พืชจะหยุดการสร้าง ATP การเคลื่อนย้าย น้ำตาลจะชะงัก ทำให้อวัยวะที่ใช้เก็บน้ำตาล เช่น เมล็ด ผล ราก จะฝ่อลีบ หรือมีข้อปล้องสั้น แต่ถ้าพืชมีโพแทสเซียมเพียงพอจะช่วยให้กระบวนการเคลื่อนย้ายเป็นไปได้อย่างปกติ (Wang *et al*., 2013) เมื่อมีโพแทสเซียมไม่เพียงพอทำให้มีผลต่อการเปิด-ปิดปากใบ ส่งผลให้การเคลื่อนย้ายของ ไนเตรต แคลเซียม ฟอสเฟต แมกนีเซียม กรดอะมิโน และน้ำไปสะสมที่ผลผลิตลดลง (Thomas and Thomas, 2009) คุณค่าของ สารอาหาร ความฉ่ำความแน่นเนื้อของผลผลิตจึงต่ำ

(Woldemariam *et al*., 2018) ดังนั้นพืชที่ขาดโพแทสเซียมจึงไม่สังเคราะห์โปรตีนแม้จะมีไนโตรเจนมากเพียงใดก็ตาม นอกจากนี้การขาดโพแทสเซียมยังทำให้มีการสะสมสารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์โปรตีนแทน เช่น เอไมด์ (amides) กรดอะมิโน (amino acid) และไนเตรต (nitrate) (Patil, 2011) ซึ่งสารตั้งต้นเหล่านี้ถ้าสะสมมากเกินไป อาจเป็นพิษต่อพืชและผู้บริโภคได้ แต่เมื่อ พืชได้รับโพแทสเซียมในปริมาณที่มากขึ้น จะนำสารตั้งต้นที่สะสมไว้เหล่านี้ไปใช้สร้างโปรตีนได้ ในภายหลัง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ความเครียดจากการขาดโพแทสเซียมและความเครียดต่าง ๆ ที่เกิดจากปัจจัยภายนอกได้ โดยการส่งสัญญาณทั้งหมดเกิดขึ้นภายในพืชเอง การที่มีโพแทสเซียมอย่างพอเพียงในพืช จึงเป็นผลให้พืชเพิ่มความทนต่อความเครียดได้ ระดับหนึ่งและลดปริมาณ ROS ให้อยู่ในปริมาณ ปกติ (Hasanuzzaman *et al*., 2018) แต่ถ้าพืชตกอยู่ในสภาวะขาดโพแทสเซียมหรือความเครียดรุนแรงหรือยาวนานเกินไปการถ่ายทอดสัญญาณจะมากและสร้าง ROS ในปริมาณที่มากทำให้พืชเครียดจากสภาพออกซิเดชันได้ (oxidative stress) หากสถานการณ์ยังยืดเยื้อ ต่อไปเนื้อเยื่อจะถูกทำลาย สารต่าง ๆ รั่วไหล อวัยวะภายในเซลล์เป็นอันตราย กระบวนการ เมแทบอลิซึมหยุดทำงาน และพืชตายในที่สุด (ปุญญิศา, 2562)

2.4 โซเดียม (Sodium – Na)

2.4.1 บทบาทและความสำคัญของโซเดียม

โซเดียมเป็นแร่ธาตุธรรมชาติที่ร่างกายต้องการ ที่ร่างกายไม่สามารถผลิตโซเดียมเองได้ จำเป็นต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น โดยจัดเป็นแร่ธาตุที่แตกตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญของของเหลวภายนอกเซลล์ และมีอิทธิพลต่อการกระจายของน้ำในร่างกาย เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างกระดูกและฟัน เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของน้ำย่อยในทางเดินอาหาร และช่วยป้องกันอาการอ่อนเพลียจากความร้อน ช่วยให้กล้ามเนื้อและเส้นประสาททำงานได้อย่างเป็นปกติ ซึ่งโซเดียมในร่างกายส่วนใหญ่อยู่ในลักษณะที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ เป็นไอออนประจุบวก (cation) ที่มีอยู่มากที่สุดในของเหลวภายนอกเซลล์ โดยจะพบที่ประมาณร้อยละ 50 ส่วนที่เหลือก็จะพบในกระดูกร้อยละ 40 และพบในน้ำภายในเซลล์ร้อยละ 10 ซึ่งโซเดียมในร่างกายจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) โซเดียมที่สามารถการแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable sodium) ซึ่งโซเดียมประเภทนี้จะมีอยู่ ร้อยละ 71 ของโซเดียมทั้งหมดโดยอยู่ในน้ำเลือด น้ำภายนอกเซลล์ที่ไม่ใช่น้ำเลือด น้ำที่อยู่ระหว่างเซลล์เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และเนื้อเยื่อกระดูก 2) โซเดียมที่ไม่มีการแลกเปลี่ยน (Nonexchangeable sodium) ซึ่งจะมีอยู่ร้อยละ 29 ของโซเดียมทั้งหมดโดยส่วนใหญ่อยู่ที่กระดูก โซเดียมทำหน้าที่ในการปรับแรงดันภายในและภายนอกเซลล์ ช่วยควบคุมการกระจายตัวของน้ำ ทำให้เซลล์ไม่เกิดอาการบวมน้ำ และป้องกันไม่ให้ร่างกายอยู่ในภาวะเสียน้ำมากเกินไป ช่วยควบคุมระดับโพแทสเซียมและแร่ธาตุอื่นๆ ที่อยู่ทั้งภายนอกและภายในเซลล์ให้อยู่ในสภาพสมดุล ช่วยให้ร่างกายควบคุมสมดุลของกรดและด่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำตาลกลูโคส และกรดอมิโน ในทางเดินอาหาร และช่วยดูดกลับแร่ธาตุสำคัญต่อร่างกายกลับมาที่หลอดไตได้เป็นอย่างดี ร่างกายของคนเราสามารถดูดซึมโซเดียมได้ดีในรูปของเกลือคลอไรด์ที่อยู่ในอาหารประมาณร้อยละ 95 ของโซเดียมที่กินเข้าไป โดยจะดูดซึมได้ดีในส่วนของลำไส้เล็กตอนต้น โดยเมื่อโซเดียมได้ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้วก็จะมีการส่ง ไปที่ไต เพื่อให้ไตทำหน้าที่กรองและส่งโซเดียมกลับไปในเลือดในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งโดยปกติแล้วโซดียมที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายประมาณร้อยละ 90-95 จะถูกขับออกมาทางปัสสาวะ และมีที่ขับออกมาทางอุจจาระและผิวหนังเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ก็มีฮอร์โมนชนิดหนึ่งที่จะทำหน้าที่ในการควบคุมความเข้มข้นของโซเดียมในของเหลวนอกเซลล์โดยตรง เรียกว่าอัลโดสเทอโรน

ไตทำหน้าที่ขับถ่ายโซเดียมโดยกรองผ่านโกลเมอรูลัส (glomerulus) ปริมาณของโซเดียมส่วนเกินจะถูกกรองผ่านออกไปพร้อมกับน้ำ ขณะเดียวกันบริเวณท่อไตจะมีการดูดกลับของโซเดียม

พร้อมกับน้ำเข้าสู่ร่างกายใหม่ตลอดความยาวของท่อไต การดูดกลับจะเกิดมากที่สุดบริเวณส่วนต้นของท่อไต ฮอร์โมนอัลโดสเตอโรน (aldosterone) จะออกฤทธิ์ที่ท่อไต ช่วยให้มีการดูดกลับของโซเดียมและขับโพแทสเซียมออกที่ท่อไตส่วนปลายฮอร์โมนอัลโดสเตอโรนและฮอร์โมนที่ยับยั้งการขับปัสสาวะ (antidiuretic hormone) ควบคุมปริมาณของโซเดียมและรักษาภาวะสมดุลระหว่างโซเดียมและน้ำ โซเดียมยังมีหน้าที่ที่สำคัญ คือ รักษาระดับความเข้มข้นของออสโมลาริตีในของเหลวภายนอกเซลล์ ในขณะที่โพแทสเซียมรักษาระดับของออสโมลาริตีของของเหลวภายในเซลล์ออสโมลาริตีของของของเหลวภายนอกและภายในเซลล์จะเท่ากันด้วยความสมดุล โดยการให้น้ำผ่านเข้าหรือออกจากเซลล์ ปริมาณน้ำภายนอกเซลล์จะต้องมีเพียงพอ โดยเฉพาะส่วนของของเหลวในหลอดเลือดเพื่อให้เลือดไหลเวียนนำอาหารและออกซิเจนไปเลี้ยงเซลล์ในอวัยวะต่าง ๆ ได้ สำหรับในภาวะปกติร่างกายจะรักษาความสมดุลของการครองธาตุโซเดียม เช่น เมื่อร่างกายได้รับโซเดียมมากเกินความต้องการร่างกายจะขับออกทางไต และเมื่อร่างกายได้รับโซเดียมน้อยเกินไปจะมีการดูดซึมกลับของโซเดียมเข้าสู่ร่างกายเพื่อรักษาสมดุล โซเดียมสามารถควบคุมระบบความดันโลหิต การทำงานของเซลล์ประสาทและกล้ามเนื้อ ตลอดจนถึงการดูดซึมสารอาหารและเกลือแร่ในไตและลำไส้เล็ก หากโซเดียมในร่างกายสูง ก็จะทำให้เลือดข้น แล้วส่งผลให้มีการดึงน้ำจากในเซลล์ออกมาในกระแสเลือด และทำให้เกิดความดันโลหิตสูงตามมา การกินโซเดียมในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยควบคุมและลดระดับความดันโลหิต รวมถึงช่วยลดความเสี่ยง การเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังต่างๆ ได้ อาหารที่มีปริมาณโซเดียมสูงอาจเสี่ยงทำให้ไตพัง เมื่อรับประทานอาหารที่มีปริมาณโซเดียมสูง อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกาย โดยเฉพาะผลเสียต่อไตที่ทำหน้าที่ในการขับของเสียออกจากร่างกาย ไตต้องทำงานหนักขึ้น ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดโรคไตเรื้อรัง และเกิดภาวะไตวายในอนาคตได้ หัวใจก็ต้องทำงานหนักขึ้นเช่นกัน จึงเสี่ยงต่อการเกิดภาวะหัวใจล้มเหลวได้ โซเดียมจะทำให้ร่างกายบวม โดยเฉพาะตรงบริเวณ ใบหน้า มือ เท้า ขา เนื่องจากโซเดียมดึงน้ำออกมารอบ ๆ เซลล์ ขณะเดียวกัน ก็จะทำให้ผิวเหี่ยวและแห้งกร้าน เพราะมีการดึงน้ำออกจากเซลล์ผิว การศึกษาวิจัยในประเทศบราซิล พบว่ามนุษย์สามารถมีชีวิตอยู่ได้ตั้งแต่ระดับการบริโภคโซเดียมเพียง 0.2 กรัมต่อวัน (10 มิลลิโมลต่อวัน)จนถึงการบริโภคโซเดียมที่สูงมากถึง 10.3 กรัมต่อวัน (450 มิลลิโมลต่อวัน) นอกจากนี้ร่างกายยังสามารถกำจัดโซเดียมส่วนเกินได้ 3 รูปแบบคือ เหงื่อ ปัสสาวะ และอุจจาระ (ส่วนใหญ่จะขับออกทางปัสสาวะ) โดยการขับออกเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมปริมาณของโซเดียม ที่บริโภคเข้าไป โดยทั่วไปร่างกายต้องการโซเดียมประมาณ 1,500 มิลลิกรัมต่อวัน แต่ในชีวิตประจำวันของเราอาจจะบริโภคโซเดียมมากกว่านั้น โดย

ปริมาณโซเดียมสูงสุดที่บริโภคแล้วไม่อันตราย คือ ไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อวัน หรือเกลือประมาณ 1 ช้อนชา ผู้ที่บริโภคโซเดียมมากกว่า 4,600 มิลลิกรัมต่อวัน (เกลือ 2 ช้อนชา) มีอัตราการขับครีเอตินิน (creatinine) ลดลงและภาวะโปรตีนรั่วในปัสสาวะสูงขึ้น การได้รับปริมาณโซเดียมเกินความจำเป็นจะก่อให้เกิดโรคต่างๆ ตามมามากมาย เช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคไต โรคหัวใจและหลอดเลือด เป็นต้น ซึ่งอาหารมื้อหลักไม่ควรให้โซเดียมเกิน 600 มิลลิกรัม./วัน ส่วนอาหารว่างไม่ควรมีโซเดียมเกิน 200 มิลลิกรัมต่อวัน อาหารเกือบทุกชนิดจะมีโซเดียมเป็นองค์ประกอบ แต่จะมีปริมาณมากน้อยแตกต่างกันขึ้นกับชนิดอาหารและการปรุงแต่ง ดังนั้นจึงสามารถแบ่งลักษณะแหล่งอาหารที่มีโซเดียมที่ร่างกายจะได้รับเป็น 3 ลักษณะ คือ 1) อาหารตามธรรมชาติ เช่น เกลือ สัตว์น้ำมีเปลือก (กุ้ง ปู) เนื้อหมู เนื้อวัว นม ผัก และผลไม้ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งอาหารแต่ละชนิดมีปริมาณโซเดียมที่แตกต่างกัน โดยอาหารประเภทน้ำนม และเนื้อสัตว์จะมีโซเดียมมากกว่าอาหารประเภทผักและผลไม้ 2) การบริโภคอาหารสำเร็งรูปและอาหารที่ใช้เกลือในการถนอมอาหาร เช่น ปลากระป๋อง ปลาเค็ม ไข่เค็ม อาหารแปรรูปต่างๆ เช่น เบคอน ลูกชิ้น แฮม ไส้กรอก แหนม อาหารสำเร็จรูปจำพวกบะหมี่ โจ๊ก รวมทั้งขนมขบเคี้ยวต่างๆ 3) การเติมเครื่องปรุงรสต่างๆ ในอาหาร เช่น เกลือ น้ำปลา ซีอิ้วดำ ซีอิ้ว

ภาวะที่ร่างกายขาดโซเดียม โดยปกติกลไกของร่างกายจะรักษาความเข้มข้นของโซเดียมภายในเซลล์ไว้ที่ 10 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร ส่วนภายนอกเซลล์(ในเลือด)จะมีความเข้มข้นที่ 135-145 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร แต่หากระดับโซเดียมในเลือดน้อยกว่า 135 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร จะเรียกภาวะนี้ว่าภาวะโซเดียมในเลือดต่ำ (hyponatremia)สำหรับค่าที่น้อยกว่า 100 มิลลิอีควิวาเลนท์ต่อลิตร จะทำให้เสียชีวิตได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นจากร่างกายมีการสูญเสียโซเดียมไปพร้อมกับการสูญเสียน้ำโดยการสูญเสียทางผิวหนัง เช่น การเสียเหงื่อมาก การถูกไฟไหม้หรือน้ำร้อนลวก การสูญเสียทางระบบทางเดินอาหาร เช่น อาเจียนอย่างรุนแรง อุจจาระร่วง หรือกินยาระบายติดต่อกันเป็นเวลานาน การสูญเสียทางไต เช่น การได้รับยาขับปัสสาวะเป็นเวลานาน โรคไตที่เกิดจากประสิทธิภาพการทำงานลดลงหรือต่อมหมวกไตทำงานน้อยลง หรือความผิดปกติของระบบปัสสาวะ ร่างกายมีระดับโซเดียมในเลือดลดลงเนื่องจากร่างกายไม่สามารถขับถ่ายน้ำออกได้ตามปกติ เช่น โรคหัวใจล้มเหลวอย่างรุนแรง โรคไตวาย และโรคตับ เป็นต้น (จันทร์ธิรา และศิริพรรณ, 2559)

โซเดียมเป็นธาตุที่มักพบในน้ำและเป็นปัญหา ซึ่งเป็นธาตุที่พืชดูดไปใช้น้อยมาก ดังนั้นถ้าพบในน้ำในปริมาณมากก็จะเกิดการสะสมและเป็นพิษต่อพืชโดยเฉพาะในระบบปิดที่มีการนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ (closed system) ปริมาณโซเดียมในสารละลายจะมีความเป็นพิษต่อพืชแต่ละชนิดไม่เท่ากัน เช่น โซเดียมอิออน ที่ความเข้มข้น 50 ppm ในสารละลายจะเป็นพิษต่อผักสลัด สตรอว์เบอร์รี่

และกุหลาบ แต่สำหรับมะเขือเทศ สามารถทนความเข้มข้นของโซเดียมอิออนได้ถึง 200 ppm หรือมากกว่า จากปัญหาการสะสมของเกลือที่พืชต้องการในปริมาณน้อยนี้ จึงต้องมีการจัดการเกี่ยวกับธาตุอาหาร เมื่อใช้น้ำที่มีเกลือแร่เหล่านี้ละลายอยู่มากจะยุ่งยากกว่าน้ำที่มีเกลือละลายอยู่น้อย โดยเฉพาะระบบที่มีการหมุนเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ระบบ NFT ส่วนระบบที่ไม่มีการนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่ เช่น การปลูกในวัสดุปลูกและระบายน้ำทิ้ง จะสามารถนำน้ำที่มีเกลือเหล่านี้มาใช้ได้แต่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำที่ระบายออกให้มากขึ้นเพื่อชะเกลือที่สะสมในวัสดุปลูก ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองสารละลาย

2.5 คุณค่าทางโภชนาการของผักกาดหอม

ผักกาดหอม (LETTUCE : Lactuca sativa L.) อยู่ ในวงศ์ Asteraceae (Compositae) ผักกาดหอมเป็นพืช ที่นิยมบริโภคสดและประกอบอาหารมากที่สุด ประกอบด้วย น้ำ 95 % คาร์โบไฮเดรท 1-2 % โปรตีน 1-2 % และไขมัน 0.25 % ผักกาดหอมเป็นพืชอายุสั้นฤดูเดียว ลำต้นอวบสั้น มีลักษณะและสี แตกต่างกันขึ้นกับแต่ละพันธุ์ ผักกาดหอมนิยมนำมาใช้บริโภคอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีรสชาติดี ประกอบด้วยสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ แก่ร่างกายหลายชนิด (อริสรา และคณะ, 2562) ประกอบด้วย แคลเซียม เหล็ก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต รวมทั้งนี้ยังประกอบด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด เช่น วิตามินเอ วิตามินซี วิตามินอี วิตามินเค โฟเลต ฟลาโวนอยด์ กรดโฟลิค แคโรทีนอยด์ ลูทีน ซีแซนทีน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสรรพคุณทางเภสัชกรรมที่ช่วยบรรเทาความกระวนกระวาย ขับปัสสาวะและเสมหะได้

Figure 1 Green Oak

2.5.1 ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

ชื่อไทย ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

ชื่อวิทยาศาสตร์ Lactuca sativa cv.crispa L.

สกุล Lactuca

ชื่อภาษาอังกฤษ lettuce (green oak)

ถิ่นก าเนิด ทวีปเอเชียและยุโรป

ชื่ออื่นๆ ผักสลัดกรีนโอ๊ค

ลักษณะโดยทั่วไปผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ใบมีเขียวอ่อน หรือเขียวเข้ม (ตามลักษณะของสายพันธุ์) ขอบใบหยัก เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย และยุโรป เป็นพืช ฤดูเดียว มีลำต้นอวบสั้น ช่วงข้อถี่ ใบจะเจริญ จากข้อเป็นกลุ่ม มีระบบรากแก้วที่สามารถเจริญลงไปในดินได้อย่างรวดเร็ว ช่อดอกเป็น แบบ Panicle สูง 2-4 ฟุต ประกอบด้วย ดอก 10 – 25 ดอกต่อช่อ เป็นดอกสมบูรณ์เพศกลีบดอกสี เหลือง หรือขาวปนเหลือง ดอกจะบานช่วงเช้า โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ สภาพอากาศที่เหมาะสมสำหรับ ผักกาดหอมกรีนโอ๊ค เป็นพืชที่ต้องการสภาพอากาศเย็น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 10 – 24 องศาเซลเซียส การปลูกในสภาพ ภูมิอากาศสูง การเจริญเติบโตทางใบจะลดลง และพืชสร้างสารคล้ายน้ำนม หรือยางมาก เส้นใยสูง เหนียว และมีรสขม ดินที่เหมาะสมต่อการปลูกควรร่วนซุย มีความอุดมสมบูรณ์ และมีอินทรียวัตถุสูง หน้าดินลึก และอุ้มน้ำได้ดีปานกลาง สภาพความเป็น กรด-ด่างของดินอยู่ระหว่าง 6-6.5 พื้นที่ปลูกควรโล่ง และได้รับแสงแดดอย่างเต็มที่ เนื่องจากใบผักกาดหอมมีลักษณะบาง ไม่ทน ต่อฝน ดังนั้น ในช่วงฤดูฝนควรปลูกใต้โรงเรือนการใช้ประโยชน์และคุณค่าทางอาหาร ผักกาดหอมกรีนโอ๊คเป็นพืช ที่นิยมบริโภคสด โดยเฉพาะในสลัด หรือกินกับยำ นำมาตกแต่งในจานอาหาร ผักกาดหอมกรีนโอ๊คมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก และมีวิตามินบี วิตามินซีสูง อีกทั้งยังมีไฟเบอร์ ที่ช่วยบรรเทาอาการท้องผูก (วรพรรณ และศิริประภา, 2561)

Figure 2 Red Oak

2.5.2 ผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ค

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ค

ชื่อไทย ผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ค

ชื่อวิทยาศาสตร์ Lactuca sativa cv.Crispa L.

สกุล Lactuca

ชื่อภาษาอังกฤษ Lettuce (red oak)

ถิ่นกำเนิด ทวีปเอเชียและยุโรป

ชื่ออื่นๆ ผักสลัดเรดโอ๊ค

ลักษณะโดยทั่วไปผักกาดหอมเรดโอ๊ค ใบมีแดงเข้ม ขอบใบกลมมน ก้านใบด้านในเป็นสีเขียวอ่อน ลักษณะพุ่มกลม เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรป มีลำต้นอวบสั้น ช่วงข้อถี่ ใบจะเจริญ มีระบบราก แก้วที่สามารถเจริญลงไปในดินได้อย่างรวดเร็ว ช่อดอกเป็นแบบ Panicle สูง 2-4 ฟุต ประกอบด้วย ดอก 10 - 25 ดอกต่อช่อ เป็นดอกสมบูรณ์เพศกลีบดอกสีเหลือง หรือขาวปนเหลือง ดอกจะบานช่วง 4 เช้า โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ ผักกาดหอมเรดโอ๊ค เป็นสายพันธุ์ที่มีสีที่เข้ม และน้ำหนักที่ดี การทดสอบการปลูกเรดโอ๊ค สายพันธุ์นี้ในช่วงฤดูร้อน ได้น้ำหนักเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 150 - 180 กรัม/ต้น การใช้ประโยชน์และคุณค่าทางอาหารพืชที่นิยมบริโภคสด โดยเฉพาะในสลัด หรือกินกับยำ นำมาตกแต่งในจานอาหาร ผักกาดหอมเรดโอ๊ค มีกากใยอาหารมากมาย ย่อยง่าย บำรุงสายตา กล้ามเนื้อป้องกันโรคปากนกกระจอก ล้างผนังลำไส้ กำจัดพวกไขมันมีธาตุเหล็ก และวิตามินซีสูง (วรพรรณ และศิริประภา, 2561)

2.6 ไฮโดรโปนิกส์

ไฮโดรโพนิกส์ (Hydroponics) เป็นระบบการปลูกพืชที่ไม่ใช้วัสดุปลูกแต่จะปลูกพืชลงในสารละลายธาตุอาหารพืชโดยให้รากพืชสัมผัสกับสารอาหารโดยตรง เพื่อเป็นการลดข้อจำกัดและปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับดิน หรือพื้นที่การปลูกโดยการสร้างและควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก ซึ่งคำว่า “Hydroponics” มาจากการรวมคำในภาษากรีกสองคำ คือคำว่า “Hydro” หมายถึง “น้ำ” และ “Ponos” หมายถึง “งาน” ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วความหมายคือ “Water-working” หมายถึง “การทำงานของน้ำ” หรือ การทำงานของน้ำที่มีสารละลายธาตุอาหารผ่านรากพืช เพื่อให้พืชได้รับสารอาหาร หรือสารละลายธาตุอาหารพืชที่พืชต้องการจากทางรากพืช (ดิเรก, 2550) โดยปกติแล้วการที่พืชจะเจริญเติบโตได้ดีนั้น ต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมหลายอย่าง เช่น แสงแดด อุณหภูมิ น้ำ และธาตุอาหารพืช (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2558) การที่พืชจะนำธาตุอาหารพืชไปใช้ประโยชน์ได้นั้นจะต้องคำนึงถึงเรื่องความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของดินหรือสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ปลูกพืช การปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์พืชจะได้รับธาตุอาหารในรูปสารละลาย เรียกว่า“สารละลายธาตุอาหารพืช” ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ทันทีเพราะมี การปรับค่าการนำไฟฟ้า(Electrical Conductivity : EC) ซึ่งมีค่าที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 1.1-1.6 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ อายุของพืช สภาพแวดล้อมในการปลูกขณะนั้น และ pH ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชอยู่ตลอดเวลา โดยปกติค่า pH ที่ใช้ในการปลูกพืชมีค่าระหว่าง 5.5 - 7.0 (วนายุทธ และคณะ, 2564) การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโพนิกส์จะต้องควบคุมอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารพืชให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชด้วย และเป็นการปลูกพืชที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ระบบไฮโดรโพนิกส์นั้นรากพืชจะมีการดูดซับไอออนได้โดยตรง การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างรากพืชกับสารละลายเพื่อนำเอาไอออนของธาตุอาหารเข้าสู่พืช เกิดขึ้นเหมือนกันทั้งในกรณีของสารละลายของดินและสารละลายธาตุอาหาร เมื่อพิจารณาทางสรีรวิทยา เนื่องจากสารละลายธาตุอาหารเป็นสารละลายที่เตรียมขึ้นจากปุ๋ยอนินทรีย์ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ที่มีส่วนประกอบคล้ายกับสารละลายในดิน และเป็นไปตามความต้องการของพืชมากกว่าที่ได้จากดิน และการดูดธาตุอาหารของรากและน้ำไม่ว่าจะเป็นจากดินหรือจากระบบไฮโดรโพนิกส์ก็จะมีลักษณะและการนำไปใช้ประโยชน์ของพืชที่เหมือนกัน การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโพนิกส์เป็นวิธีการปลูกแบบธรรมชาติเหมือนการปลูกในดิน แต่จะเป็นการปลูกที่ใช้เทคโนโลยีและการจัดการที่ดีกว่า ทำให้ศักยภาพในการผลิตดีกว่า (กานต์พิชชา, 2555) และยังพบว่าพืชที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกส์ เช่น มะเขือเทศและพริกหวานมีวิตามินต่าง ๆ เช่น ไทอะมีน (Thiamine) ไรโบฟลาวิน (Riboflavin) ไนอะซีน (Niacin) ไพริด๊อกซิน (Pyridoxine) วิตามินซีและวิตามินอีสูงกว่าพืชที่ปลูกในดิน ในบางกรณีสูงกว่าเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ และแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ก็สูงกว่าด้วย (ดิเรก, 2550)

นอกจากนั้นการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโพนิกส์ยังใช้พื้นที่ในการปลูกที่ไม่มากเหมือนกับการปลูกลงดิน การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ สามารถทำได้ง่ายกว่าปลูกผักลงดิน (สกรณ์ และคณะ, 2563) สามารถควบคุมกระบวนการผลิต และลดการใช้สารเคมีทางการเกษตร ส่งผลให้ได้ผลผลิตผักที่มีคุณภาพ และยังเป็นการผลิตผักที่สามารถทำได้ในสภาพพื้นที่ที่ไม่เหมาะสม (มลฑา และคณะ, 2561) พืชหลายชนิดจะให้ผลผลิตได้มากในเวลาที่น้อยกว่าเดิม และบางครั้งก็มีคุณภาพที่ดีกว่าเดิมด้วย (มัฆวาล, 2557) นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำน้อยมาก เพราะมีการใช้ภาชนะหรือระบบวนน้ำแบบปิด เพื่อหมุนเวียนน้ำ เมื่อเทียบกับการเกษตรแบบเดิมแล้ว นับว่าใช้น้ำเพียงส่วนน้อยนิดเท่านั้น (ณัฐิกาและธีระวัฒน์, 2559) ธาตุอาหารที่เป็นวัตถุดิบในการให้ต้นพืชเจริญเติบโตในกระบวนการสร้างสารอาหารโดยกระบวนการสังเคราะห์แสงวัตถุดิบที่ใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เมื่อได้รับแสงบนคลอโรฟิลด์ จะได้สารคาร์โบไฮเดรต และออกซิเจนจะเห็นได้ว่าธาตุอาหารที่พืชใช้ในกระบวนการดังกล่าว คือ คาร์บอน (C) จากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ออกซิเจนจากน้ำ (H_2O) และในส่วนของคลอโรฟิลล์ในพืชมีธาตุอื่นๆ เป็นองค์ประกอบ เช่น ธาตุในโตรเจน (N) และแมกนีเซียม (Mg) ซึ่งเราสามารถจำแนกธาตุอาหารตามปริมาณความต้องการในปริมาณที่ต่างกันในการใช้ของพืช ซึ่งหากใช้ไม่เหมาะสมก็จะทำให้พืชเติบโตไม่ปกติ นอกจากนี้ การให้ธาตุอาหารให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม ถ้าให้อย่างใดอย่างหนึ่งมากหรือน้อยพืชก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (ศูนย์เกษตรกรรมบางไทรม 2558)

2.6.1 ระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิกส์

ระบบการปลูกพืชตามวิธีการให้สารละลายธาตุอาหารแก่พืช เป็นการปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture) ใช้ได้ดีในที่มีแดดจัด วิธีการหลักคือ การนำรากพืชมาจุ่มในสารละลายโดยตรง สามารถแบ่งออกเป็น 4 ระบบคือ

1.1 ระบบ NFT (Nutrient Film Technique) การปลูกแบบนี้จะเป็นการปลูกพืชโดยรากแช่อยู่ในสารละลายโดยตรง สารละลายธาตุอาหารจะไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (หนาประมาณ 2-3 มิลิเมตร) ในรางปลูกพืชกว้างตั้งแต่ 5-35 เซนติเมตร สูงประมาณ 5-10 เซนติเมตร ความกว้างรางขึ้นอยู่กับชนิดพืชที่ปลูกความยาวของรางตั้งแต่ 5-20 เมตร การไหลของสารละลายอาจเป็นแบบต่อเนื่องหรือแบบสลับก็ได้ โดยทั่วไปสารละลายจะไหลแบบต่อเนื่องอัตราไหลอยู่ในช่วง 1-2 ลิตร/นาที/ราง โดยจะมีปั๊มดูดสารละลายให้ไหลผ่านรางและรากพืชและเวียนกลับมายังถังเก็บสารละลาย (วรากร, 2558)

1.2 ระบบ DFT (Deep Flow Technique) เป็นระบบที่ปลูกพืชโดยรากแช่อยู่ในสารละลายลึกประมาณ 15- 20 เซนติเมตร โดยจะมีการปลูกพืชบนแผ่นโฟมหรือวัสดุที่ลอยน้ำได้ เพื่อยึดลำต้นแต่จะปล่อยให้รากเป็นอิสระในน้ำ ระบบนี้ไม่มีความลาดเอียง เป็นระบบที่มีการหมุนเวียนสารละลายโดยการใช้ปั๊มดูดสารละลายจากถังพักขึ้นมาใช้ใหม่ในระบบ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับระบบน้ำที่ใช้ในการผลิตผัก ระบบนี้อาจมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบไฮโดรโพนิกส์ลอยน้ำ (Floating Hydroponic Systems) การปลูกระบบนี้ให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชในภาชนะหรือรางปลูกในระดับลึก คือ น้ำจะมีมากกว่า NFT (สุภกิจ, 2552)

1.3 ระบบ DRFT (Dynamic Root Floating Technique) คือ การปลูกพืชโดยให้รากแช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารโดยตรงและให้อากาศไหลวนผ่านรากพืชอย่างต่อเนื่องที่ระดับความลึกประมาณ 4 เซนติเมตร โดยที่สารละลายธาตุอาหารจะไหลลงสู่ถังบรรจุ จากนั้นจึงไหลเวียนขึ้นไปในถาดปลูกด้วยปั๊มน้ำขณะที่สารละลายไหลเวียนขึ้นไปด้านหัวถาดปลูกจะผ่านหัวพ่นอากาศเพื่อเติมอากาศให้สารละลาย และไหลผ่านรากพืชตามถาดปลูกมาสู่ด้านท้ายถาดปลูกจะผ่านสะดือปรับน้ำ (Nutrient Level Adjust) ซึ่งทำหน้าที่ปรับระดับความสูงต่ำของสารละลายในถาดปลูก (โสระยา, 2548)

1.4 ระบบ FAD (Flood and Drain) คือ การปลูกพืชที่มีรูปแบบผสมผสานระว่าง NFT และ DFT เป็นการให้สารละลายธาตุอาหารพืชท่วมภาชนะปลูกและรากพืชอยู่ระยะเวลาหนึ่ง แล้วค่อยๆ ระบายออกระยะเวลาหนึ่ง แล้วจึงให้สารละลายท่วมภาชนะอีกครั้ง สลับเช่นนี้เป็นระยะๆ อย่างต่อเนื่อง (ดิเรก, 2550)

การจัดการน้ำในระบบสารละลายธาตุอาหารพืช ควรรักษาปริมาณน้ำในระบบปลูกให้คงที่ตลอดเวลาเพื่อให้ผักสามารถเจริญเติบโตได้ดี ผักจะใช้น้ำในอัตราที่สูงกว่าตัวธาตุอาหารพืช ถ้าปริมาณ น้ำลดลงจะทำให้ความเข้มข้นและปริมาณธาตุอาหารพืชแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำจะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแปลงที่ปลูก ปริมาณและชนิดของผัก และสภาพภูมิอากาศภายนอก (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2558)

2.6.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต

ปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการเจริญเติบโตของผักสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอก ซึ่งปัจจัยทั้งสองนี้ต่างมีอิทธิพลร่วมกัน คือ ปัจจัยภายในจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตการเจริญเติบโต ส่วนปัจจัยภายนอกจะเป็นตัวกำหนดระดับของการเจริญเติบโต ที่ผลให้พืชสามารถเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์

1. ปัจจัยภายใน ได้แก่ พันธุกรรม และสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2558)

1.1 ด้านพันธุกรรม (Genetic) ซึ่งพันธุกรรมจะเป็นตัวกำหนดลักษณะต่างๆ ของพืช ที่เรียกว่า ยีน (gene) เช่น การเจริญเติบโตของพืช สี ความสูง ความสามารถในการผลิต การควบคุมยีนสามารถเปลี่ยนไปตามสิ่งแวดล้อม ทั้งยีนและสภาพแวดล้อม จึงมีผลต่อพันธุกรรมของพืช ดังนั้นในการปรับปรุงพันธุกรรมพืชให้ได้ลักษณะตามต้องการจะต้องแยกความแตกต่างทางพันธุกรรมออกจากความแตกต่างทางสภาพแวดล้อมให้ได้

1.2 สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Bioregulator) มีทั้งที่พืชสร้างขึ้นเอง (Plant hormones) และที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งฮอร์โมนที่พืชสร้างขึ้นนี้จะมีบทบาทต่อการกระตุ้น ยับยั้ง หรือเปลี่ยนแปลงสรีรวิทยาของพืช

2. ปัจจัยภายนอกหรือสภาพแวดล้อม เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ปัจจัยภายนอกที่สำคัญ ได้แก่

2.1 แสง เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชผักเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์อาหารจากแร่ธาตุและน้ำที่ดูดขึ้นมาให้เป็นอาหารที่พืชผักนำไปใช้ในการเสริมสร้างส่วนต่างๆ นอกจากนี้แสงยังมีอิทธิพลต่อการงอกของเมล็ด การออกดอกและเกี่ยวข้องกับขบวนการต่างๆ ภายในพืชซึ่งขบวนการต่างๆ เหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับความเข้มของแสง (light intensity) ช่วงแสง (light duration) และคุณภาพของแสง (light quality)

2.2 อุณหภูมิ มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของพืชเริ่มต้นตั้งแต่การงอกของเมล็ด การแบ่งและขยายขนาดของเซลล์ การสังเคราะห์ด้วยแสง การหายใจ การคายน้ำ และกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ ดังนั้นอัตราการเจริญเติบโต การออกดอก และผล จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยตรง และยังมีผลต่อขบวนการดูดธาตุอาหารและน้ำด้วย อัตราสูงสุดของการสังเคราะห์แสงจะผันแปรไปตามระดับอุณหภูมิและความเข้มของแสง พืชแต่ละชนิดต้องการอุณหภูมิที่ใช้ในการเจริญเติบโตแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพืชนั้น ๆ

2.3 ความชื้นสัมพัทธ์และปริมาณน้ำที่ใช้ ความเหมาะสมของสภาพอากาศต่อพืชที่เลือกปลูกและคุณภาพน้ำที่ใช้

2.4 ลม การระบายอากาศที่ดีทำให้พืชมีการแลกเปลี่ยนก๊าซ และการคายน้ำ

2.5 คุณภาพน้ำ มีความสำคัญมากในการปลูกพืชด้วยวิธีนี้ เพราะน้ำเป็นตัวทำละลายธาตุอาหาร มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาทางชีววิทยา รักษาอุณหภูมิของต้นพืชให้คงที่ ลำเลียงอาหารและธาตุอาหารต่างๆ ในพืช พืชที่ปลูกได้รับธาตุอาหารจากสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งจะต้องใช้น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ

2.6 ออกซิเจน ปริมาณออกซิเจนในน้ำนั้นมีมากพอในอุณหภูมิต่ำ และได้โดยการไหลตกของน้ำขากลับลงถัง หรือในรางปลูกเอง และอาจใช้ปั๊มช่วยในกรณีน้ำในถังอุณหภูมิสูงเกินไป อุณหภูมิน้ำในถังไม่ควรเกิน 35 องศาเซลเซียส (ควรรักษาให้อุณหภูมิต่ำไว้ก่อน) ถังน้ำควรมีที่กันฝนกันแดดได้ดี

2.7 สภาพแวดล้อม ควรมีการถ่ายเทอากาศที่ดี ถ้าอุณหภูมิอากาศสูงความชื้นต่ำ พืชจะคายน้ำมากเกินไปพืชจะเหี่ยวเฉา ช่วงที่มีอากาศร้อนควรจะพรางแสง หรือให้น้ำทางใบ ฝนจะทำความเสียหายกับรากพืชได้ ควรมีที่กันฝน ฝุ่นจะจับใบทำให้การสังเคราะห์แสง และคายน้ำได้ไม่ดี การใช้สเปรย์น้ำฉีดจะได้ประโยชน์ทั้งสองทาง คือลดการคายน้ำและล้างใบพืช (ภิญญาพร, 2552)

3. ธาตุอาหารพืช

ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชคือน้ำ และธาตุอาหาร เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ผู้ปลูกจัดหาให้แก่พืชโดยตรง โดยการเตรียมสารละลายธาตุอาหารซึ่งสามารถควบคุมปริมาณธาตุอาหาร แต่ละชนิดให้เหมาะสมต่อ ความต้องการของพืชแต่ละชนิดได้ โดยทั่วไปธาตุอาหารที่พืชต้องการมีทั้งสิ้น 16 ธาตุ ซึ่ง 3 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ได้จากน้ำและอากาศ ส่วนอีก 13 ธาตุ จะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามปริมาณที่พืชต้องการ คือธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมากหรือ มหาธาตุ และธาตุที่พืชต้องการในปริมาณน้อย หรือจุลธาตุ (อาพา, 2553) ธาตุที่พืชต้องการในปริมาณมาก หรือมหาธาตุ (macronutrient elements) คือ ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและพืชที่มีความต้องการในปริมาณมากเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ มีทั้งหมด 6 ธาตุ ได้แก่

3.1 ไนโตรเจน เป็นธาตุที่สำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเจริญเติบโตของพืช เพราะไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน โปรตีน นิวคลีโอไทด์ และ คลอโรฟิลล์ ซึ่งสาร เหล่านี้เป็นสารประกอบที่สำคัญมากต่อขบวนการเมตาโบลิซึมของพืช พืชที่ได้รับ ไนโตรเจนเพียงพอ จะมีการเจริญเติบโตดี ใบมีสีเขียวเข้ม ในพืชผักไนโตรเจนส่วนใหญ่มีส่วนสำคัญในการเพิ่มคุณภาพ เพราะเป็นตัวทำให้ผักมีลักษณะอวบน้ำ พืชผักรับประทานจึงต้องการไนโตรเจนสูง เพื่อให้ต้นและใบมี ความกรอบ มีกากหรือเส้นใยน้อย ซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคต้องการ (อาพา, 2553)

3.2 ฟอสฟอรัส (P) ฟอสฟอรัสมีหน้าที่เกี่ยวกับการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งเป็น กระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญมาก พลังงานที่ได้จากการสังเคราะห์แสงและเมตาโบลิซึมของ สารประกอบคาร์โบไฮเดรตจะถูกเก็บไว้ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต สำหรับใช้ในการเจริญเติบโตของพืช ฟอสฟอรัสทำให้การแบ่งเซลล์ และการพัฒนาของส่วนที่พืชเจริญเติบโตของพืชเป็นไปได้ดี ฟอสฟอรัสยังช่วยให้พืชออกดอกและแก่เร็ว ทำให้พืชมีความแข็งแรงและต้านทานต่อโรคแมลง สำหรับพืชผักฟอสฟอรัสทำให้พืชตั้งตัวได้เร็วโดยเฉพาะระยะแรกๆ ของการเจริญเติบโต (อาพา, 2553)

3.3 โพแทสเซียม (K) โพแทสเซียมมีหน้าที่เกี่ยวกับการทางานด้านสรีรวิทยาของพืช เป็นธาตุจำเป็นในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตและการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาลในพืช จึงเป็นธาตุที่จำเป็นมากต่อพืชผักประเภทหัว นอกจากนี้โพแทสเซียมยังควบคุมการปิดเปิดของปากใบและ กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ (อาพา, 2553)

3.4 แคลเซียม (Ca) แคลเซียมเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ หน้าที่หลัก ภายใน พืชจึงเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของเนื้อเยื่อเซลล์พืช นอกจากนั้นยังมีบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์อีกด้วย (อาพา, 2553)

3.5 แมกนีเซียม (Mg) แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ นอกจากนี้ยังมีบทบาทในการดูดซึมธาตุอาหาร และการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารของพืช (อาพา, 2553)

3.6 กามะถัน (S) กำมะถันมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีนและกรดอะมิโน บางชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิสเทอีน (cysteine) และเมทไธโอนีน (methionine) นอกจากนั้นกำมะถันยังมีผลทางอ้อมต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ของพืชด้วย (นพดล, 2550)

ส่วนธาตุที่ต้องการในปริมาณน้อย หรือจุลธาตุ (micronutrient element) คือ ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่พืชต้องการในปริมาณน้อยเปรียบเทียบกับธาตุอื่นๆ ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ ต้องระมัดระวังการควบคุมปริมาณธาตุกลุ่มนี้เป็นพิเศษกว่าธาตุในกลุ่มมหาธาตุ เพราะ ความเป็นพิษและอาการขาดมีความเข้มข้นต่างกันค่อนข้างแคบ นอกจากนั้น การประเมินอาการขาด ทำได้ค่อนข้างยากอีกด้วย มีทั้งหมด 7 ธาตุ ได้แก่

3.7 เหล็ก (Fe) เป็นธาตุที่ไม่ค่อยมีการเคลื่อนย้ายในพืช เหล็กเป็นส่วนประกอบ ของเฟอริดอกซิน ซึ่งสำคัญในขบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนของพืช นอกจากนี้ยังเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ (นพดล, 2550)

3.8 แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง และ การทำงานร่วมกับธาตุอื่น เช่น เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียม (นพดล, 2550)

3.9 สังกะสี (Zn) เป็นธาตุจำเป็นต่อการสังเคราะห์ IAA ซึ่งเกี่ยวข้องกับการ ขยายตัวของเซลล์ มีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด และยังมีบทบาทในการสร้างแป้งของพืช (นพดล, 2550)

3.10 ทองแดง (Cu) เป็นธาตุที่มีความจำเป็นเนื่องจากเป็นองค์ประกอบของ โปรตีน ช่วยในกระบวนการหายใจ และการส่งเสริมให้พืชนำเหล็กมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น (นพดล, 2550)

3.11 โบรอน (B) มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ และการเคลื่อนย้าย คาร์โบไฮเดรต การสร้างกรดอะมิโน และโปรตีน การงอกและการเจริญเติบโตของละอองเกสรตัวผู้ และ กิจกรรมต่างๆ ของเซลล์ (นพดล, 2550)

3.12 โมลิบดีนัม (Mo) เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ 2 ชนิด คือ ไนโตรจีเนส (nitrogenase) ซึ่งสำคัญต่อการตรึงไนโตเจนในอากาศ และไนเตรทรีดักเตส (nitrate reductase) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการรีดิวสีไนเตรทให้เป็นไนไตรท์ (นพดล, 2550)

3.13 คลอรีน (Cl) เป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณที่น้อยมาก แต่ก็มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากธาตุคลอรีนช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาของเอนไซม์บางชนิด และช่วยในกระบวนการเมตาบอลิซึ่งของพืช และช่วยในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (นพดล, 2550)

สารละลายธาตุอาหาร นับเป็นหัวใจสำคัญของการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโปนิกส์ เพราะพืชจะได้รับธาตุอาหารต่างๆ จากสารละลายธาตุอาหารซึ่งผู้ปลูกเตรียมจากการนำปุ๋ย หรือสารเคมีมาละลายน้ำ จึงสามารถกำหนดปริมาณธาตุอาหารให้เป็นไปตามที่พืชต้องการได้ ปัจจุบันสารละลายธาตุอาหาร มีอยู่หลายสูตรขึ้นอยู่กับชนิดพืชที่ปลูก ฤดูปลูก แสง อุณหภูมิขณะที่ปลูก สถานที่ปลูก ตลอดจนวัตถุประสงค์ของการปลูก ช่วงความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชแต่ละชนิดในสารละลายธาตุอาหารพืช แต่ละชนิดในสารละลายธาตุอาหารที่ใช้กัน (วรพรรณ และศิริปะภาม, 2561)

4. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)

ธาตุอาหารพืชที่อยู่ในรูปองค์ประกอบทางเคมี เมื่อนำมาละลายในน้ำจะแตกตัวเป็นอิออนของธาตุ ค่าการนำไฟฟ้าเป็นการวัดปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้ เกลือที่ละลายน้ำได้ เมื่ออยู่ในน้ำจะแตกตัวให้ไอออนบวก และไอออนลบซึ่งนำไฟฟ้าได้ ค่าการนำไฟฟ้าจะผันแปรตามชนิดของไอออนบวก และไอออนลบ หรือปริมาณเกลือในสารละลาย และอุณหภูมิของสารละลาย โดยสามารถวัดเป็นค่าความนำกระแสไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) มีหน่วยเป็นโมห์ (Mho) แต่ค่าของการนำไฟฟ้านี้ค่อนข้างน้อยมากจึงมีการวัดเป็นหน่วยมิลลิโมห์ หรือนิยมอ่านค่าเป็นมิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (mS/cm) เป็นค่าที่ได้จากการวัดการนำกระแสไฟฟ้าจากพื้นที่หนึ่งคิวบิกเซนติเมตรของสารละลายธาตุอาหาร ค่า EC เป็นค่ารวมของการนำไฟฟ้าของน้ำกับธาตุอาหารทั้งหมด แต่ไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารแต่ละธาตุได้ ซึ่งความเข้มข้นของธาตุอาหารเหล่านี้เปลี่ยนไปตามเวลาเนื่องจากพืชนำไปใช้หรือเกิดการตกตะกอน ดังนั้นในการปลูกพืชจึงควรเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารเมื่อค่า EC สูงหรือต่ำกว่ามาตรฐานที่ต้องการใช้มากอย่างผิดปกติ (ดิเรก, 2547)

การควบคุมค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity : EC) ของสารละลายธาตุอาหารพืช การที่ต้องควบคุมค่า EC เนื่องจากต้องการให้มีปริมาณสารอาหารครบตามที่พืชต้องการ แต่เป็นการควบคุมค่ารวมของการนำไฟฟ้าของสารละลายธาตุอาหารทั้งหมดที่อยู่ในถัง ไม่ใช่ปริมาณที่แท้จริงของธาตุใดธาตุหนึ่ง ซึ่งธาตุที่ถูกใช้น้อยอาจตกตะกอนหรือก่อให้เกิดปัญหาดังนั้น จึงควรมีการเปลี่ยนสารอาหาร เป็นระยะ ๆ เช่น ทุก 2-3 สัปดาห์ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2558)

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า EC

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า EC มีหลายอย่าง เช่น ชนิดของพืช ระยะการเติบโต ความเข้มของแสง และขนาดของถังที่บรรจุสารอาหารพืช สภาพภูมิอากาศก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า EC เมื่อมีสภาพอากาศที่ร้อนจะทำให้พืชต้องการความเข้มข้นของสารละลายที่น้อยลง เนื่องจากพืชจะดูดน้ำมากกว่าธาตุอาหาร ในขณะที่ถ้าอากาศมีความชื้นพืชก็มีแนวโน้มที่จะดูดธาตุอาหารมากกว่าน้ำ ดังนั้น พืชจึงต้องการสารละลายที่มีความเข้มข้นมากขึ้น

4.2 การควบคุม EC ของสารละลายธาตุอาหารพืช

โดยทั่วไปเมื่อพืชยังเล็กจะมีความต้องการ EC ที่ต่ำ และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อพืชมีความเจริญเติบโตที่มากขึ้น และพืชแต่ละชนิดมีความต้องการ ค่า EC แตกต่างกัน เช่น

- ผักสลัด มีความต้องการสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC ระหว่าง 0.5 – 2.0 mS/cm
- แตงกวา มีความต้องการสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC ระหว่าง 1.5 – 2.0 mS/cm
- ผักและไม้ดอก มีความต้องการสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC ระหว่าง 1.8 – 2.0 mS/cm
- มะเขือเทศ มีความต้องการสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC ระหว่าง 2.5 – 3.5 mS/cm
- แคนตาลูป มีความต้องการสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC ระหว่าง 4.0 – 6.0 mS/cm

ค่า EC ที่สูงจะทำให้ปริมาณน้ำตาลในผลสูง เนื่องจากทำให้พืชเกิดความเครียด (stress)

เครื่องมือที่ใช้วัดค่าการนำไฟฟ้า(Electrical Conductivity meter) เรียกว่า EC meter ก่อนใช้ควรปรับความเที่ยงตรงเสียก่อน โดยปรับที่ปุ่มของเครื่อง ในสารละลายมาตรฐาน ซึ่งค่าที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสารละลาย กล่าวคือ ยิ่งสารละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่า EC ก็จะสูงขึ้นตามด้วย

5. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลาย

ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของสารละลายที่ใช้ในการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งค่าความเป็นกรดด่างของวัสดุปลูกไม่มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของพืชปลูก แต่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช และควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในวัสดุปลูก ทั้งนี้เพราะสภาพ pH ที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อ availability ของธาตุอาหารที่พืชจะนำไปใช้ หากสารละลายมีสภาพเป็นด่าง (มี pH มากกว่า 7) จะทำให้เกิดการตกตะกอนของธาตุต่างๆ หลายชนิด เช่น เหล็ก แมงกานีส ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม มีผลให้ต้นพืชไม่สามารถนำสารอาหารเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ และหากปล่อยทิ้งไว้ให้ต้นพืชขาดแคลนธาตุอาหารอาจส่งผลให้ต้นพืชตายได้ พืชส่วนมากมีความต้องการ pH เป็นกรดอ่อน หรือค่อนไปในด้านเป็นกรดเล็กน้อย คือ อยู่ระหว่าง 5.0 – 6.5 ในสภาพเป็นกรดจะไม่ทำให้ธาตุอาหารต่างๆ เกิดการตกตะกอน โดยธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปของอิออนที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายธาตุอาหารพืช คือ pH meter ก่อนใช้ ควรปรับเครื่องมือให้มีความเที่ยงตรงก่อน โดยใช้น้ำยามาตรฐานหรือที่เรียกว่า “สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน” (Buffer Solution) (ถวัลย์, 2534)

5.1. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH

สาเหตุที่ทำให้ค่าของ pH ในสารละลายเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการที่รากพืชดูดธาตุอาหารในสารละลายธาตุอาหารพืชแล้วปล่อยไฮโดรเจน (H^+) และ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) สู่สารละลายธาตุอาหารพืช ทำให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไป ควรรักษาค่า pH ของสารละลายให้มีค่า pH = 6 แต่ในคำแนะนำของบางประเทศ เช่น ประเทศญี่ปุ่นจะควบคุมให้สารละลายมีค่าpH = 5.5 และ 6.5 ประเทศเบลเยี่ยม จะควบคุมให้สารละลายมีค่า pH = 5.0 และ 5.5 การปรับเพิ่มค่าของ pH ในกรณีที่สารละลายธาตุอาหารพืชมีความเป็นกรดมากเกิน เราสามารถปรับขึ้นได้โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) หรือ แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) สารใดสารหนึ่งลงไปในสารละลายธาตุอาหารพืช การปรับลดค่าของ pH ในกรณีที่สารละลายธาตุอาหารพืชมีความเป็นด่างมากเกิน เราสามารถปรับได้โดยการเติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือ กรดอซิติก (CH_3COOH) สารใดสารหนึ่งลงไปในสารละลายธาตุอาหารพืช

5.2. การควบคุม pH ของสารละลายธาตุอาหารพืช

การรักษาหรือควบคุมค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารพืช โดย pH = 7 หมายถึง สารละลายมีความเป็นกลาง pH ต่ำกว่า 7 หมายถึง สารละลายมีความเป็นกรด และ pH สูงกว่า7 หมายถึง สารละลายมีความเป็นด่าง ต้องมีการควบคุม pH เนื่องจากจะมีผลให้ผักสามารถดูดใช้ปุ๋ยหรือสารอาหารได้ดี เพราะค่า pH หรือ ความเป็นกรดเป็นด่างในสารละลายจะเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงสถานะของธาตุอาหารที่จะอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ ถ้าค่า pH สูงหรือต่ำเกินไป ธาตุอาหารพืชบางชนิดอาจอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์หรืออาจทำให้เกิดการตกตะกอน

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาแนวทางในการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในผักสลัด โดยใช้เทคโนโลยีการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์ (hydroponic) แบบ DFT (Deep Flow Technique) ในโรงเรือน ทำการทดลองในพื้นที่ของสาขาวิชาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึง มกราคม พ.ศ. 2566 การทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การทดลองที่ 1 ผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค

เตรียมต้นกล้าเพาะเมล็ดผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ลงบนแผ่นฟองน้ำที่ตัดสำเร็จขนาด 1 x 1 นิ้ว และเจาะตรงกลางก้อนฟองน้ำสำหรับใส่เมล็ด นำฟองน้ำใส่ถาดและรดน้ำให้ชุ่ม วางไว้ในที่ร่ม เมื่ออายุ 3 วันหลังเพาะ เมล็ดจะเริ่มงอกให้นำออกมาวางที่แสงแดดรำไร และรักษาระดับน้ำในถาดพลาสติกครึ่งหนึ่งของฟองน้ำ เมื่อผักสลัดอายุครบ 7 วันหลังเพาะเมล็ด ย้ายต้นกล้าลงในสารละลายธาตุอาหารดัดแปลงจากสูตร Enshi solution (Mondal *et al*., 2017) ความเข้มข้น 1/2 เท่าของสูตรปกติ เมื่อต้นกล้าอายุ 21 วัน ย้ายต้นกล้าจำนวน 6 ต้น ลงในถังพลาสติกขนาด 31 x 46 x 18 เซนติเมตร ที่บรรจุสารละลายธาตุอาหาร ความเข้มข้นตามสูตรปกติ **(Table 1)** ปริมาตร 10 ลิตร ระยะปลูก 5x5 เซนติเมตร ตามกรรมวิธีทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 4 ซ้ำ แบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง ประกอบด้วย การทดลองที่ 1.1 ผลของระดับฟอสฟอรัสในสารละลายธาตุอาหารต่อคุณภาพและปริมาณผักกาดหอมกรีนโอ๊ค กรรมวิธีการทดลอง ได้แก่ ความเข้มข้นของ KH_2PO_4 ในสารละลาย 4 ระดับ ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.6 mM (P0.1, P0.2, P0.3 และ P0.6 ตามลำดับ) และการทดลองที่ 1.2 ผลของระดับโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารต่อคุณภาพและปริมาณผักกาดหอมกรีนโอ๊ค กรรมวิธีการทดลอง ได้แก่ ความเข้มข้นของ KCl ในสารละลาย 4 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 mM (K0.5, K1.0, K2.0 และ K4.0 ตามลำดับ) เปลี่ยนสารละลายทุกสัปดาห์ วัดค่าการนำไฟฟ้า (EC: electrical conductivity) ด้วย EC meter และปรับ pH ด้วย ST Series pH Pen Meters ในสารละลายธาตุอาหารให้อยู่ที่ระดับ 6.2-6.5 ด้วยกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 5 % ตลอดการทดลอง

Table 1 Concentration of chemical compositions in modified Enshi solution

Chemical compositions	Concentration in nutrient solution (mM)	
	Full strength	Half strength
KCl	4.0†	2.0
KH_2PO_4	0.6‡	0.3
$Ca(NO_3)_2.4H_2O$	4.0	2.0
$MgSO_4$	1.0	0.5
H_3BO_3	0.025	0.0125
$MnSO_4.5H_2O$	0.004	0.002
$ZnSO_4$, $7H_2O$	0.0004	0.0002
$CuSO_4.5H_2O$	0.0001	0.00005
$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$	0.00002	0.00001

† Concentration of KCl in experiment 1.1

‡ Concentration of KH_2PO_4 in experiment 1.2

การบันทึกข้อมูล

บันทึกข้อมูลสภาพอากาศ ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ในระหว่างดำเนินการทดลอง เมื่อต้นผักกาดหอมกรีนโอ๊ค มีอายุ 28, 35 และ 42 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการบันทึก วัดความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม นับจำนวนใบ วัดความยาวราก และวัดค่า SPAD บนใบ โดยใช้เครื่อง chlorophyll meter SPAD-502Plus และในวันที่เก็บเกี่ยวผลผลิต (42 วันหลังเพาะเมล็ด) บันทึกน้ำหนักสดต้นและราก นำผักไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และ น้ำกลั่น ตามลำดับ หั่นตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ นำต้นผักสลัดอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง

การวิเคราะห์ธาตุอาหารในพืช

การย่อยสลายตัวอย่างพืชโดยใช้กรดผสมไนตริกและเปอร์คลอริก การย่อยสลายตัวอย่างพืชโดยวิธีนี้ใช้ได้กับฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและโซเดียม

ชั่งตัวอย่างพืชที่บดละเอียดและอบแห้งที่ 70 องศาเซลเซียส แล้ว ประมาณ 1.00XX กรัม ลงในขวดชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมกรดผสมไนทริก-เปอร์คลอริก (HNO_3 : $HClO_4$) (อัตราส่วน 3:1) จำนวน 20 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 ชั่วโมง หรือทิ้งค้างคืนในตู้ดูดควัน นำไปตั้งบนเตาย่อยตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายตัวอย่างใสและเห็นควันเป็นสีขาวของ ClO_2 จึงยกลงทิ้งให้เย็น ปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml โดยเทใส่ขวดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร ใช่น้ำกลั่นล้างขวดชมพู่หลายๆครั้ง นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 เก็นไว้ในขวดพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร เก็บสารละลายที่ย่อยได้ไปวิเคราะห์หาฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและโซเดียม ในลำดับต่อไป ควรทำ blank และ control sample พร้อมตัวอย่าง

การวัดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายตัวอย่างพืช

ปิเปตสารละลายที่ย่อยได้ 1-5 มิลลิลิตร เทลงในขวดปริมาตร 25 มิลลิลิตร เติมสารละลายวาเนโดโมลิบเดตลงไป 5 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 25 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน เตรียมสารละลายตัวเปรียบเทียบ (blank) และสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายฟอสฟอรัส 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 0, 1, 2, 3, 4, 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร 6 ใบ ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 25 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน เรียงตามความเข้มข้นของฟอสฟอรัส วางทิ้งไว้นาน 30 นาที โดยเปิดอุ่นเครื่องสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ ประมาณ 15 นาที ปรับให้เครื่องอ่านค่าการดูดกลืนแสง(absorbance) ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน, ตัวเปรียบเทียบตามลำดับความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างพืช บันทึกผลที่ได้ (กรมวิชาการเกษตร, 2551) และคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในตัวอย่างพืช

การคำนวณ

%P ในพืช = $\frac{(S-B) \times V \times d.f \times 100}{W \times 10^6}$

S = ความเข้มข้นของ P ในสารละลายตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B = ความเข้มข้นของ P ในสารละลาย blank (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลายทั้งหมดหลังย่อยในที่นี่คือ 100 มิลลิลิตร (มิลลิลิตร)

d.f = อัตราส่วนการเจือจาง (dilution factor)

: ปริมาตรสุทธิของสารละลาย / ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

การวัดปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายตัวอย่างพืช

วิเคราะห์ความเข้มข้นของ K โดยทำให้สารละลายตัวอย่างเจือจางลง 80 เท่า ด้วย 0.5 M HCl เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายโพแทสเซียมมา 0, 1, 2, 3, 4, 5 มิลลิลิตร เจือจางลง 80 เท่า เขย่าสารละลายให้เข้ากัน เรียงตามความเข้มข้นของโพแทสเซียม เปิดอุ่นเครื่อง atomic absorption spectrophotometer ประมาณ 30 นาที จากนั้นวัดค่าการปลดปล่อยแสงด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (emission) เจือจาง blank ด้วยอัตราส่วนเดียวกัน แล้วนำไปวัดด้วยวิธีเดียวกัน หาความเข้มข้นของโพแทสเซียมจากกราฟมาตรฐานและนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน และคำนวณหาปริมาณโพแทสเซียมในตัวอย่างพืช (นงลักษณ์, 2548

การคำนวณ

%K = $\frac{(S-B) \times V \times d.f \times 100}{W \times 10^6}$

S = ความเข้มข้นของ K ในสารละลายตัวอย่างจากกราฟ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B = ความเข้มข้นของ K ในสารละลาย blank (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลายทั้งหมดหลังย่อยในที่นี่คือ 100 มิลลิลิตร (มิลลิลิตร)

d.f = อัตราส่วนการเจือจาง dilution factor (ปริมาตรทั้งหมด/ปริมาตรตัวอย่าง)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (g)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Stasistix for windows และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ค่า Least significant difference (LSD) ที่ $P<0.05$

3.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในฤดูปลูกที่ต่างกัน

เตรียมต้นกล้าผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 4 ซ้ำ (6 ต้น/ซ้ำ) 4 กรรมวิธีทดลอง ดำเนินการทดลองเป็น 2 ช่วงการทดลอง ในช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม 2565 และช่วงฤดูหนาว ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม 2565 เมื่อต้นกล้าอายุ 21 วัน ย้ายต้นกล้าจำนวน 6 ต้น ลงในถังพลาสติกสีดำ ขนาด 31x46.5x18 เซนติเมตร ที่บรรจุสารละลายธาตุอาหาร 10 ลิตร โดยมีระยะปลูก 5x5 เซนติเมตร ในระบบไฮโดรโพนิกส์ แบบ DFT (deep flow technique) และเริ่มให้สารละลายธาตุอาหารที่ดัดแปลงจาก สูตร Enshi solution (Mondal *et al*., 2017) ประกอบด้วย 4 mM $Ca(NO_3)_2.4H_2O$, 1 mM $MgSO_4$, 0.025 H_3BO_3, 0.004 mM $MnSO_4.5H_2O$, 0.0004 mM $ZnSO_4$, $7H_2O$, 0.0001 mM $CuSO_4.5H_2O$, 0.00002 $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ ที่ได้รับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายธาตุอาหารแตกต่างกันตามตำรับการทดลอง 4 ระดับ **(Table 2)** เปลี่ยนสารละลายทุกสัปดาห์ วัดค่าการนำไฟฟ้า (EC: electrical conductivity) ด้วย EC meter และปรับ pH ด้วย ST Series pH Pen Meters ในสารละลายธาตุอาหารให้อยู่ที่ระดับ 6.2-6.5 ด้วย กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 5 % ตลอดการทดลอง

Table 2 Concentration of KH_2PO_4 and KCl in solution

กรรมวิธี	ความเข้มข้นของ **KH_2PO_4 (mM)**	ความเข้มข้นของ **KCl (mM)**
P0.1-K0.5	0.1	0.5
P0.1-K1.0	0.1	1.0
P0.3-K0.5	0.3	0.5
P0.3-K1.0	0.3	1.0

การบันทึกข้อมูล

บันทึกความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตลอดระยะเวลาการทดลอง เมื่อต้นผักกาดหอมมีอายุ 21, 28, 35 และ 42 วันหลังเพาะเมล็ด ทำการบันทึก วัดความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม นับจำนวนใบ วัดความยาวราก และวัดค่า SPAD บนใบ โดยใช้เครื่อง chlorophyll meter SPAD-502Plus และในวันที่เก็บเกี่ยวผลผลิต (42 วันหลังเพาะเมล็ด) บันทึกน้ำหนักสดต้นและราก นำผักไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา และ น้ำกลั่น ตามลำดับ หั่นตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ นำต้นผักสลัดอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้งแล้วจึงนำมาบดละเอียด (กนกพร และคณะ, 2562)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในตัวอย่างพืช

การย่อยสลายตัวอย่างพืช การวิเคราะห์ธาตุฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ดำเนินการเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์โซเดียม

การวัดปริมาณโซเดียมในสารละลายตัวอย่างพืช

วิเคราะห์ความเข้มข้นของโซเดียมโดยทำให้สารละลายตัวอย่างเจือจางลง 10 เท่า ด้วย 0.5 M HCl เตรียมสารละลายมาตรฐานโซเดียม 0, 2, 4, 6, 8, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายโซเดียมมา 0, 1, 2, 3, 4, 5 มิลลิลิตร เจือจางลง 10 เท่า เขย่าสารละลายให้เข้ากัน เรียงตามความเข้มข้นของโซเดียม เปิดอุ่นเครื่อง atomic absorption spectrophotometer ประมาณ 30 นาที จากนั้นวัดค่าการปลดปล่อยแสงด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (emission) เจือจาง blank ด้วยอัตราส่วนเดียวกัน แล้วนำไปวัดด้วยวิธีเดียวกัน หาความเข้มข้นของโซเดียมและคำนวณหาปริมาณโพแทสเซียมในตัวอย่างพืช (กรมวิชาการเกษตร, 2551)

การคำนวณ

$$\%Na = \frac{(S-B) \times V \times d.f \times 100}{W \times 10^6}$$

S = ความเข้มข้นของ K ในสารละลายตัวอย่างจากกราฟ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B = ความเข้มข้นของ K ในสารละลาย blank (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลายทั้งหมดหลังย่อยในที่นี่คือ 100 มิลลิลิตร (มิลลิลิตร)

d.f = อัตราส่วนการเจือจาง dilution factor (ปริมาตรทั้งหมด/ปริมาตรตัวอย่าง)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Stasistix for windows และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ค่า Least significant difference (LSD) ที่ $P<0.05$

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 การทดลองที่ 1 ผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค

4.1.1 การทดลองที่ 1.1 ผลของการลดปริมาณธาตุฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค

1) การเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค (28 และ 35 วันหลังปลูก)

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 แตกต่างกัน 4 ระดับ **(Figure 3)** พบว่า

เมื่อต้นผักกาดหอมกรีนโอ๊คมีอายุ 28 วันหลังปลูก ความสูงต้น และความกว้างทรงพุ่ม มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในกรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 0.1 มิลลิโมลาร์ มีความสูงมากที่สุด (6.92 เซนติเมตร) และความกว้างทรงพุ่มมากที่สุด (11.99 เซนติเมตร) กรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 0.6 มิลลิโมลาร์ มีความสูงน้อยที่สุด (5.87 เซนติเมตร) และความกว้างทรงพุ่มน้อยที่สุด (9.54 เซนติเมตร) ขณะที่จำนวนใบ (5.13 - 5.67 ใบ) ความยาวราก (7.61 - 7.83 เซนติเมตร)และค่า SPAD (19.63 - 21.60 หน่วย) ไม่ได้รับผลกระทบจากการลดความเข้มข้นของ KH_2PO_4

เมื่อต้นผักกาดหอมกรีนโอ๊คมีอายุ 35 วันหลังปลูก พบว่า ความสูง 10.23 - 11.25 เซนติเมตร ความยาวราก 10.00 - 11.17 เซนติเมตร และค่า SPAD 20.88 - 22.90 หน่วย ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ทั้งนี้พบว่า ความกว้างทรงพุ่ม และจำนวนใบ มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยความกว้างทรงพุ่ม และจำนวนใบ ที่ได้รับ KH_2PO_4 0.1 มิลลิโมลาร์ มีค่ามากที่สุด (18.82 เซนติเมตร) และ (8.42 ใบ)

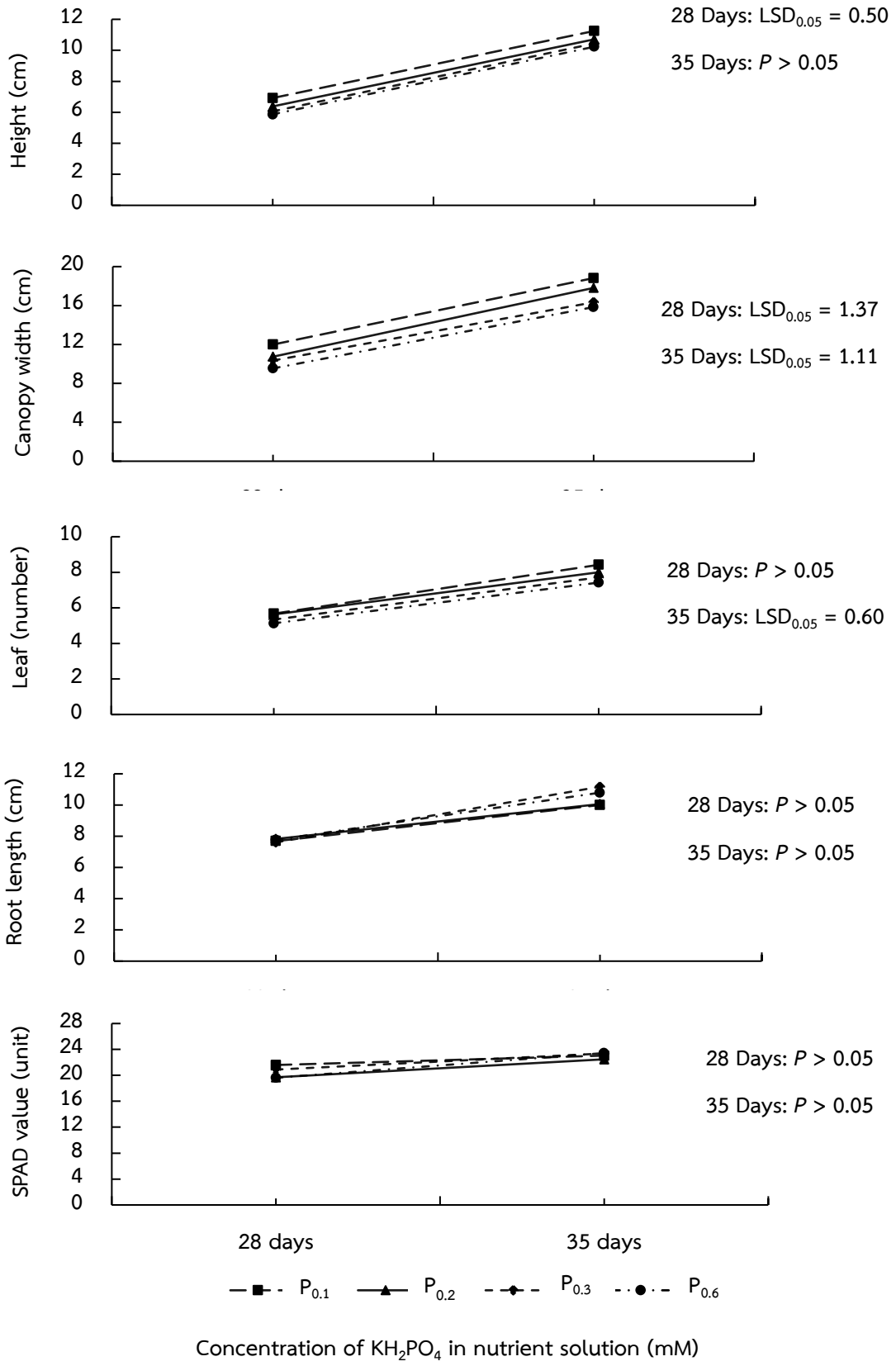


Figure 3 Growth of green oak lettuce at 28 and 35 days after sowing.

2) การเจริญเติบโตและผลผลิตที่ระยะเก็บเกี่ยว (42 วันหลังปลูก)

การเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ KH_2PO_4 ต่างๆ ในระยะเก็บเกี่ยว พบว่า ความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ และความยาวราก ไม่ได้รับผลกระทบจากระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 ในสารละลายที่ต่างกัน ผักกาดหอมมีความสูง 13.71 - 14.67 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 22.63 – 23.88 เซนติเมตร จำนวนใบ 11.79 - 12.37 ใบ และความยาวราก 10.21 - 11.09 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าค่า SPAD ที่วัดจากใบมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัส โดยมีค่า 20.88 - 22.90 หน่วย อย่างไรก็ตามพบความแตกต่างกันทางสถิติของน้ำหนักสดต้นที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ KH_2PO_4 ต่างกันโดยกรรมวิธี $P_{0.2}$ มีน้ำหนัก 46.67 กรัม ซึ่งมากกว่า กรรมวิธี $P_{0.6}$ ซึ่งมีน้ำหนัก 36.67 กรัม ส่วนต้นผักกาดหอมปลูกในสารละลายที่มี KH_2PO_4 กรรมวิธีที่ $P_{0.1}$ และ $P_{0.3}$ มิลลิโมลาร์ มีน้ำหนักสดไม่แตกต่างกันทางสถิติ (41.54 และ 43.04 กรัม) **(Table 3)**

Table 3 Plant 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)
$P_{0.1}$	14.54	22.82	12.37	10.34	22.90	41.54ab
$P_{0.2}$	14.67	23.88	12.08	10.21	20.88	46.67a
$P_{0.3}$	14.13	23.28	11.79	11.09	21.35	43.04ab
$P_{0.6}$	13.71	22.63	11.79	10.42	22.08	36.67b
Analysis of variance						
***P*-value**	ns	ns	ns	ns	ns	*
LSD $_{0.05}$	-	-	-	-	-	9.75

Different lowercase letters designate a significant difference between means for KH_2PO_4 concentration in nutrient solution with LSD at $P<0.05$

ns means non-significant difference, * and *** means significant at $P < 0.05$ and 0.001, respectively

3) การสะสมธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

จากการทดลองการสะสมฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในต้นผักกาดหอมกรีนโอ๊ค พบว่า การสะสมฟอสฟอรัสในส่วนต้นมีความแตกต่างกันทางสถิติ ในกรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 ความเข้มข้น 0.3 และ 0.6 มิลลิโมลาร์ มีการสะสมมากที่สุด (4.58 และ 4.40 มิลลิกรัมต่อกรัม) ทั้งนี้การสะสมฟอสฟอรัสในส่วนต้นลดลง 21 เปอร์เซ็นต์ และ 64 เปอร์เซ็นต์ (3.60 และ 1.66 มิลลิกรัมต่อกรัม) เมื่อลดความเข้มข้นในสารละลายธาตุอาหารลง 1/3 เท่า (0.2 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4) และ 1/6 เท่า (0.1 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4) ในขณะที่การลดสารละลาย KH_2PO_4 .ในทุกกรรมวิธีไม่ส่งผลต่อการสะสมของโพแทสเซียมในส่วนต้นกรีนโอ๊ค โดยมีค่าอยู่ในช่วง 58.78 - 69.32 มิลลิกรัมต่อกรัม **(Figure 4)**

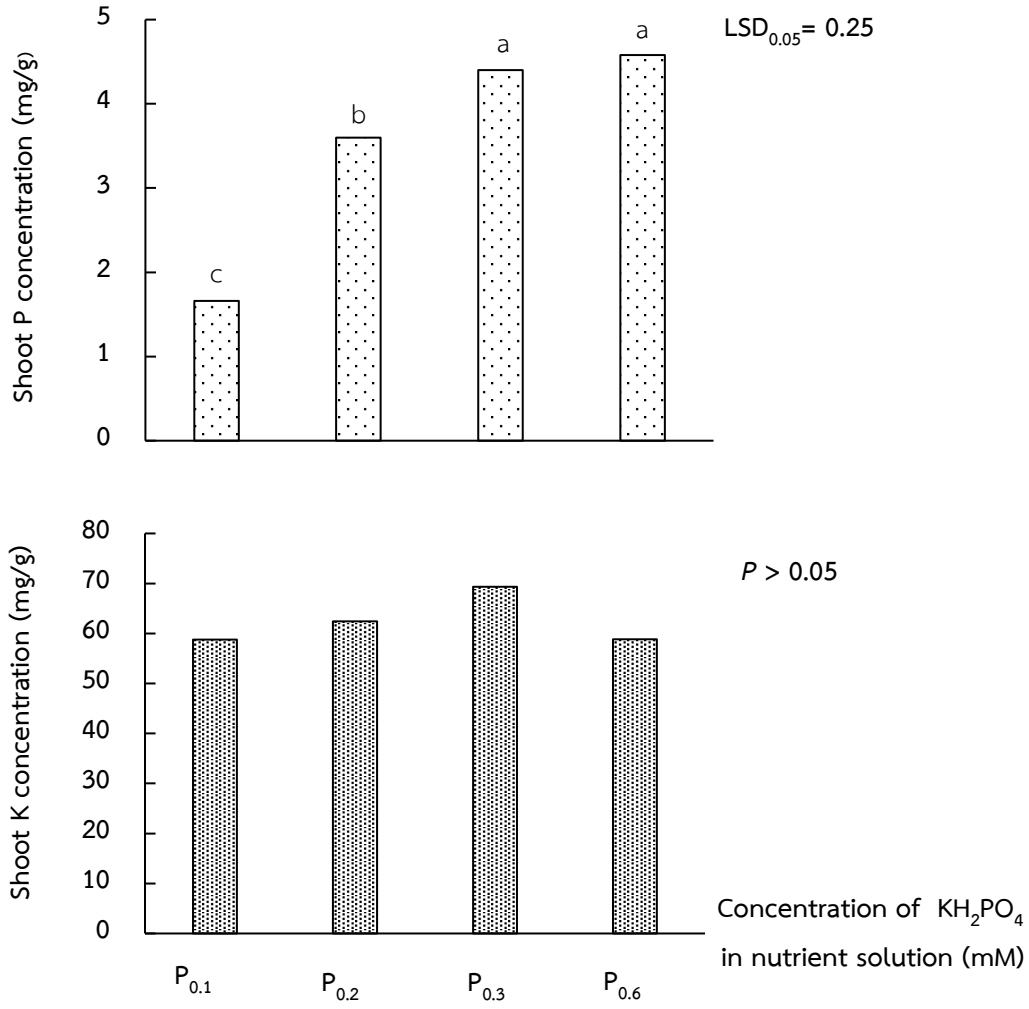


Figure 4 The accumulation of phosphorus and potassium in green oak lettuce supplied with four different levels of KH_2PO_4.

4.1.2 การทดลองที่ 1.2 ผลของการลดปริมาณธาตุโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค

1) การเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค (28 และ 35 วันหลังปลูก)

Figure 5 แสดงค่าเฉลี่ยของความสูง ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก และค่า SPAD ของผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ KCl ในสารละลายต่างกัน 4 ระดับ พบว่า

เมื่อผักกาดหอมกรีนโอ๊ค อายุ 28 วันหลังปลูก ความสูง จำนวนใบ และค่า SPAD มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ได้รับความเข้มข้น KCl 1.0 มิลลิโมลาร์ มีความสูงที่สุด (6.58 เซนติเมตร) แต่เมื่อได้รับ KCl 4.0 มิลลิโมลาร์ มีความสูงน้อยที่สุด (5.52 เซนติเมตร) จำนวนใบที่ความเข้มข้น KCl 2.0 มิลลิโมลาร์ มีใบมากที่สุด (5.67 ใบ) ส่วน KCl 4.0 มิลลิโมลาร์ มีค่าน้อยที่สุด (4.75 ใบ) และค่า SPAD ที่ KCl 4.0 มิลลิโมลาร์ มีค่ามากที่สุด (21.97 หน่วย) ส่วน KCl 1.0 มิลลิโมลาร์ มีค่าน้อยที่สุด (17.94 หน่วย) ขณะที่ความกว้างทรงพุ่ม (8.74 - 10.27 เซนติเมตร) และ ความยาวราก (6.15 - 7.63 เซนติเมตร) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

จากการทดลองการลดระดับความเข้มข้นของสารละลาย KCl ในทุกระดับไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค เมื่ออายุ 35 วันหลังปลูก โดยมีค่าเฉลี่ยของความสูง (9.36 - 10.67 เซนติเมตร) ความกว้างทรงพุ่ม (14.04 - 16.19 เซนติเมตร) จำนวนใบ (6.84 - 7.34 ใบ) ความยาวราก (8.33 - 9.33 เซนติเมตร) และค่า SPAD (22.79 - 23.38 หน่วย)

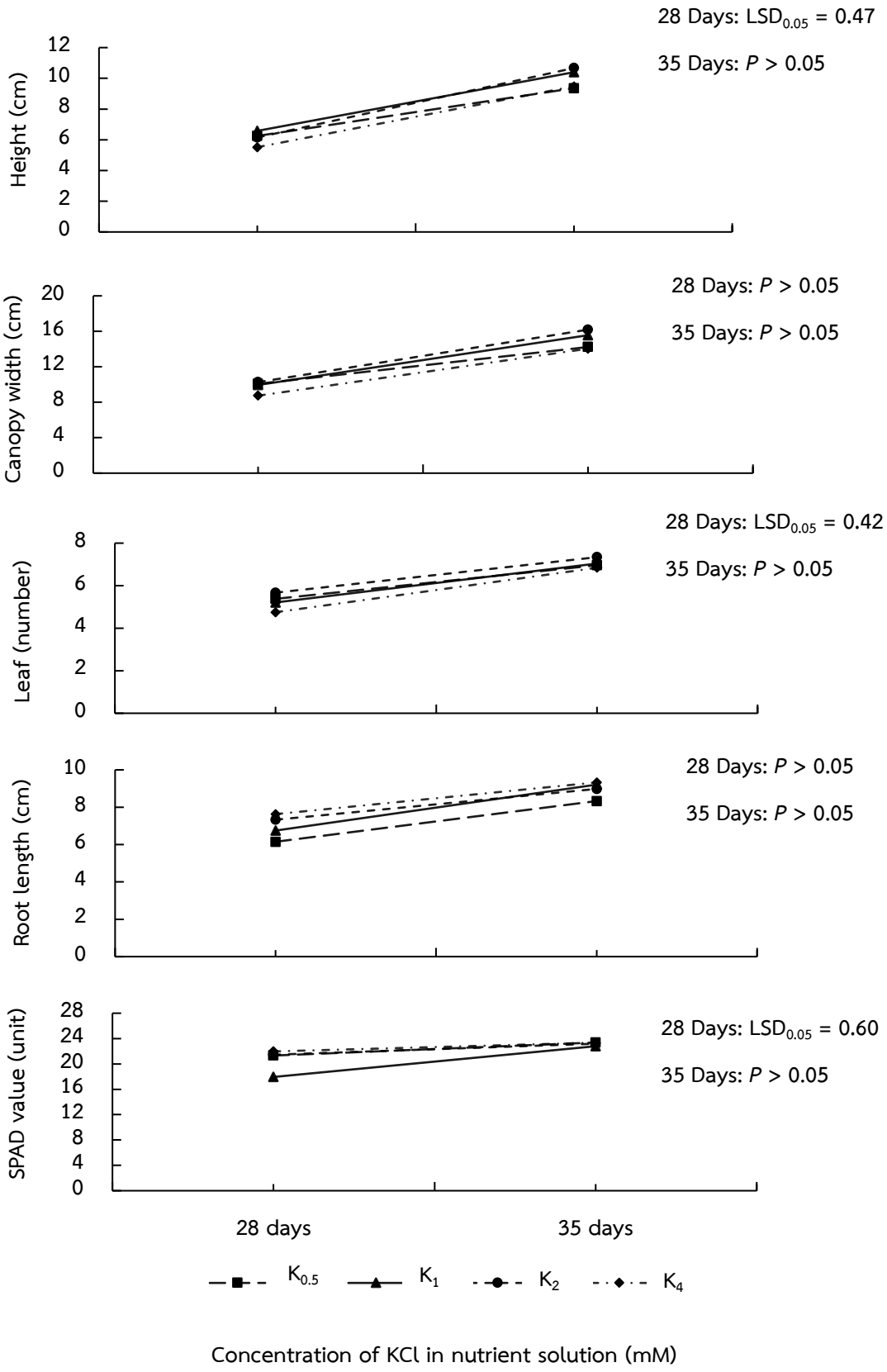


Figure 5 Growth of green oak lettuce by week (28 and 35 days after sowing.

2) การเจริญเติบโตและผลผลิตที่ระยะเก็บเกี่ยว (42 วันหลังปลูก)

จากการศึกษาพบว่า การเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ได้รับ KCl ในระดับต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 42 วัน ได้แก่ ความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก และน้ำหนักสดต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีความสูงต้น 12.83 - 14.39 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 22.32 – 23.79 เซนติเมตร จำนวนใบ 11.17 - 12.79 ใบ ความยาวราก 11.19 – 12.17 เซนติเมตร น้ำหนักสดต้น 36.00 - 43.50 กรัม ทั้งนี้พบค่า SPAD ที่วัดจากใบผักกาดหอมมีความแตกต่างกันทางสถิติ กรรมวิธี K_4 มีค่ามากที่สุด (24.04 หน่วย) ขณะที่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของค่า SPAD จากกรรมวิธี $K0_{.5}$, K_1,และ K_2 ซึ่งมีค่า 20.99 - 21.56 หน่วย **(Table 4)**

Table 4 Plant 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)
$K_{0.5}$	13.83	22.32	11.67	11.19	21.56b	36.00
K_1	14.17	23.79	12.21	11.50	21.38b	40.77
K_2	14.39	23.62	12.79	11.96	20.99b	43.50
K_4	12.83	23.04	11.17	12.17	24.06a	36.46
Analysis of variance						
***P*-value**	ns	ns	ns	ns	*	ns
LSD $_{0.05}$	-	-	-	-	1.98	-

Different lowercase letters designate a significant difference between means for KCl concentration in nutrient solution with LSD at $P<0.05$

ns means non-significant difference, * and *** means significant at $P < 0.05$ and 0.001, respectively

3) การสะสมธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

ผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ได้รับโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 มิลลิโมลาร์ มีการสะสมโพแทสเซียมมากที่สุด เท่ากับ 66.78 และ 62.86 มิลลิกรัมต่อกรัม การลดความเข้มข้นในสารละลายธาตุอาหารลง 1/4 เท่า (1.0 มิลลิโมลาร์) และ 1/8 เท่า (0.5 มิลลิโมลาร์) ทำให้การสะสมโพแทสเซียมในส่วนต้นลดลง 26 เปอร์เซ็นต์ และ 44 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความเข้มข้นโพแทสเซียม 45.98 และ 34.77 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนการสะสมฟอสฟอรัสในผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ได้รับโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 มิลลิโมลาร์ มีการสะสมฟอสฟอรัสมากที่สุด 5.44 มิลลิกรัมต่อกรัม และ ความเข้มข้น 4.0 มิลลิโมลาร์ มีการสะสมฟอสฟอรัสน้อยที่สุด 4.82 มิลลิกรัมต่อกรัม **(Figure 6)**

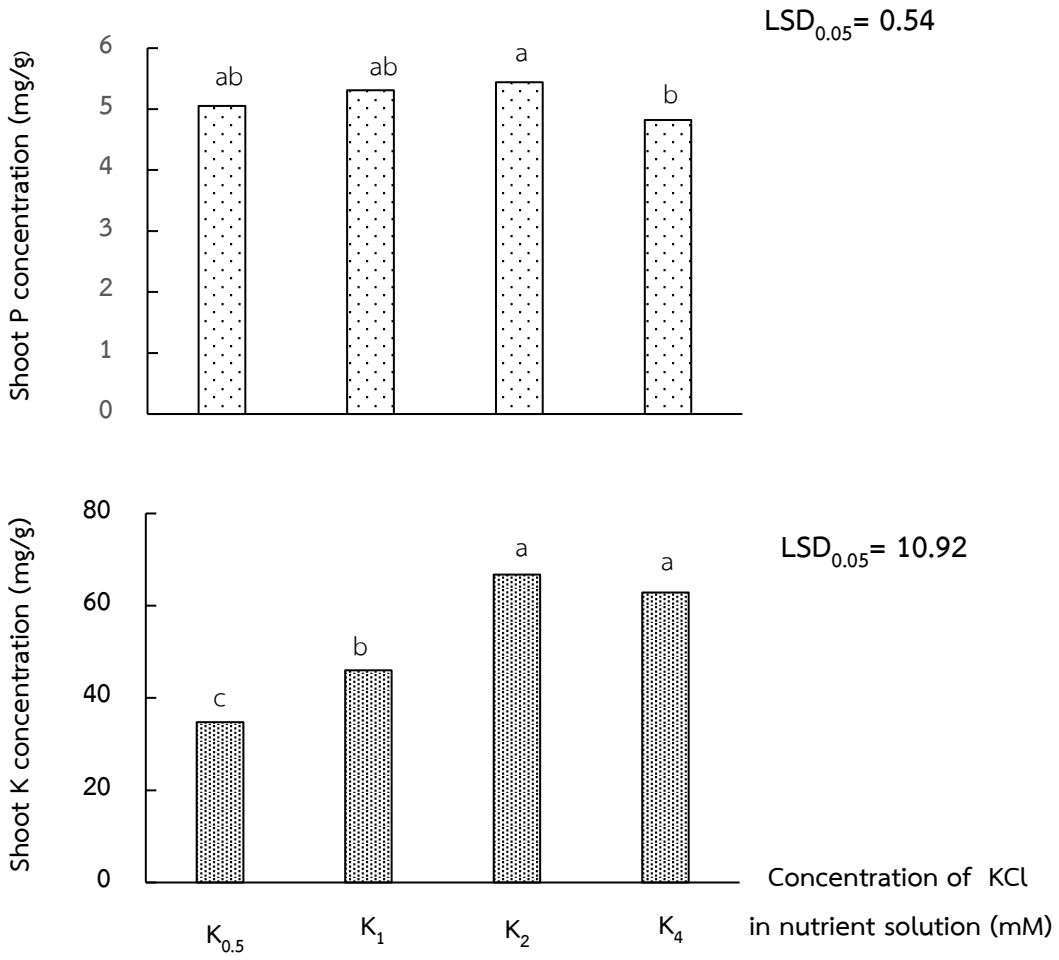


Figure 6 The accumulation of phosphorus and potassium in green oak lettuce supplied with four different levels of potassium chloride.

4) สภาพอากาศ

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ได้บันทึกสภาพอากาศ ในช่วงฤดูร้อน (ช่วงเดือนเมษายน - เดือนพฤษภาคม 2565) ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตลอดระยะการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 42 วัน พบว่า มีความเข้มแสง เฉลี่ย 593.83 วัตต์ต่อตารางเมตรโดยประมาณ **(Figure 7)** มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดที่ 23.68 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ 32.90 องศาเซลเซียส **(Figure 8)** และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่ำสุดที่ 55.53 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงสุดที่ 95.93 เปอร์เซ็นต์ **(Figure 9)**

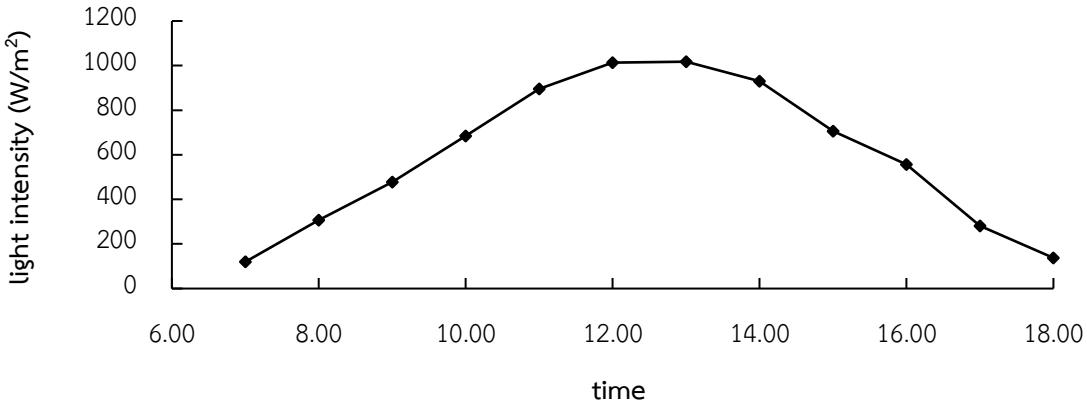


Figure 7 Light intensity during summer (April-May 2022)

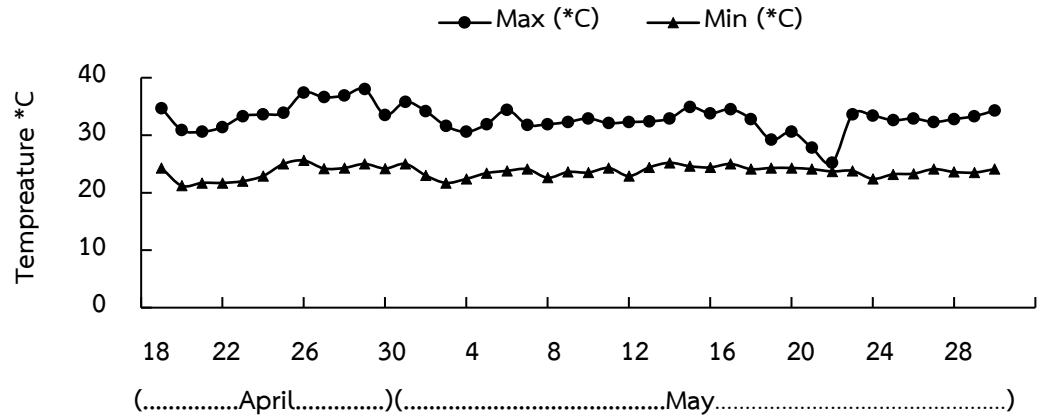


Figure 8 Temperature during summer (April-May 2022)

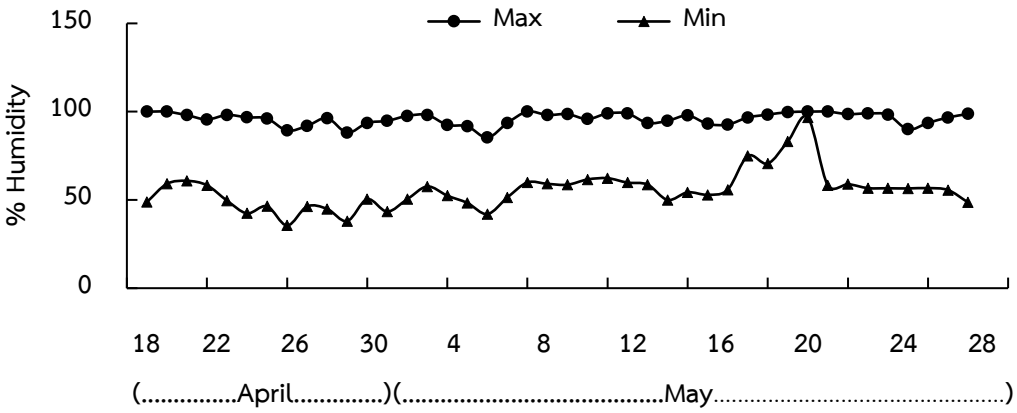


Figure 9 Relative humidity during summer (April-May 2022)

4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในฤดูปลูกที่ต่างกัน

4.2.1 การทดลองที่ 2.1 การทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายแตกต่างกัน 4 ระดับ ในฤดูฝน (มิถุนายน-สิงหาคม 2565)

1) การเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ช่วงฤดูฝน (21, 28 และ 35 วันหลังปลูก)

จากการทดสอบสารละลายธาตุอาหารในระดับต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ประกอบด้วย ความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก และค่า SPAD **(Figure 10)** พบว่า

เมื่อผักกาดหอมกรีนโอ๊คอายุ 21 วันหลังปลูก ความสูงต้น มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ และ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ มีความสูงที่สุด (7.13 และ 7.21เซนติเมตร) ส่วนความกว้างทรงพุ่ม (6.59 - 7.08 เซนติเมตร) จำนวนใบ (4.08 - 4.29 ใบ) ความยาวราก (6.75 - 7.92 เซนติเมตร) และค่า SPAD (10.99 - 12.53 หน่วย) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

เมื่อผักกาดหอมกรีนโอ๊คอายุ 28 วันหลังปลูก ความสูงต้น (7.54 - 7.84 เซนติเมตร) ความกว้างทรงพุ่ม (13.00 - 14.73 เซนติเมตร) จำนวนใบ (5.17 - 5.63 ใบ) และความยาวราก (8.17 - 9.58 เซนติเมตร) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ค่า SPAD กรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 0.3 มิลลิโมลาร์ทั้ง 2 กรรมวิธี ($P_{0.3}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$) มีค่ามากที่สุด (18.38 และ 19.04 หน่วย)

เมื่อผักกาดหอมกรีนโอ๊คอายุ 35 วันหลังปลูก ในกรรมวิธีที่ $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ และ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ มีความสูงที่สุด (10.67 และ 10.50 เซนติเมตร) ความกว้างทรงพุ่มมากที่สุด (21.21 และ 20.29 เซนติเมตร) และมีจำนวนใบมากที่สุด (7.96 และ 7.58 ใบ) ตามลำดับ มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ความยาวราก (8.46 - 11.29 เซนติเมตร) และค่า SPAD (19.80 - 20.67 หน่วย) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

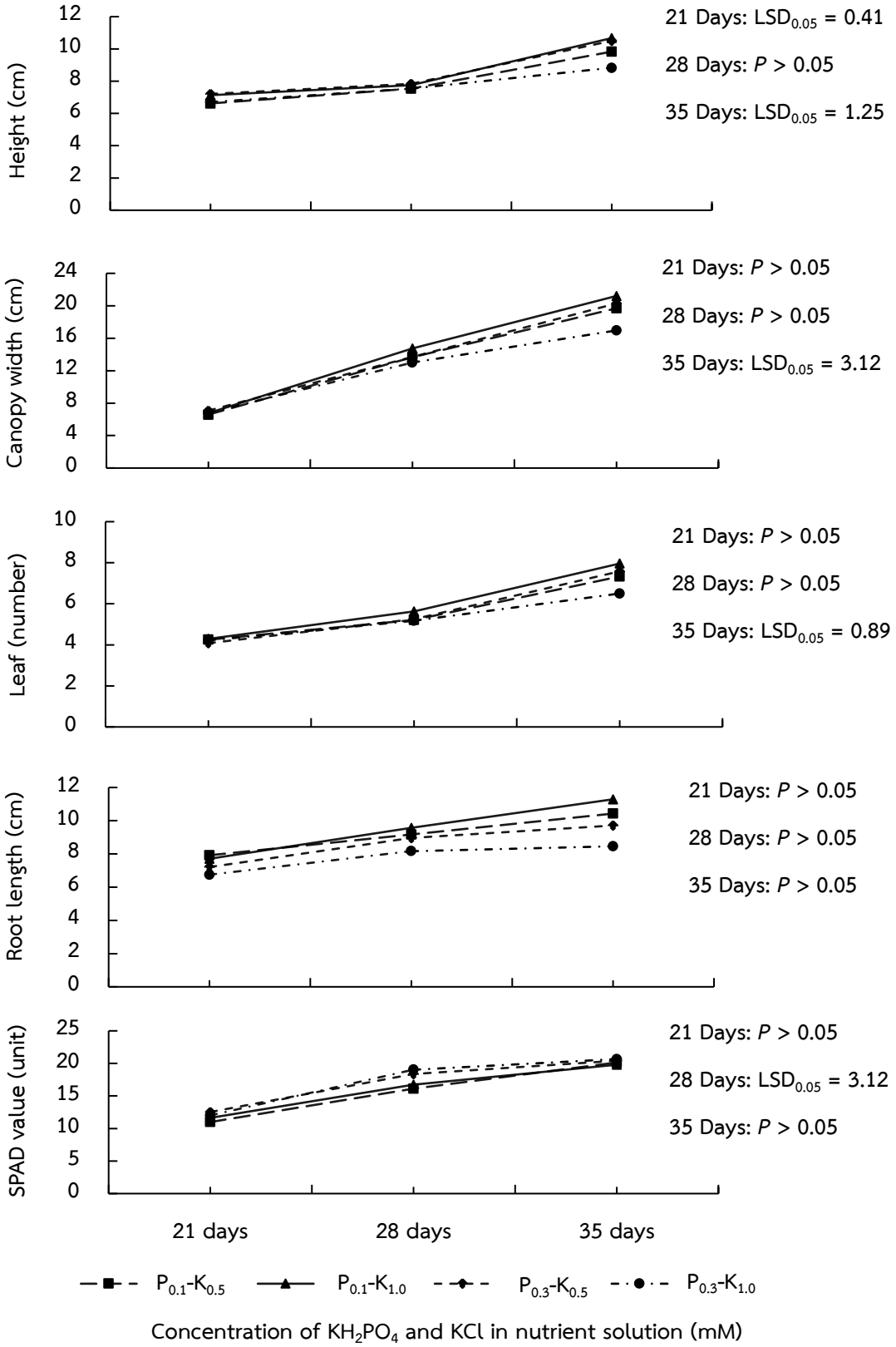


Figure 10 Growth of green oak lettuce at 21, 28 and 35 days after sowing.

2) การเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊ค ช่วงฤดูฝน (21, 28 และ 35 วันหลังปลูก)

การเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊ค ในสารละลายที่มีการลดระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายที่แตกต่างกัน **(Figure 11)** พบว่า

เมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 21 วันหลังปลูก การเจริญเติบโตไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีความสูง 5.83 - 6.04 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 5.61 - 6.00 เซนติเมตร จำนวนใบ 3.25 - 3.42 ใบ ความยาวราก 7.00 - 7.67 เซนติเมตร และค่า SPAD 18.99 - 19.25 หน่วย

เมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 28 วันหลังปลูก มีความสูง 7.38 – 7.54 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 10.54 – 11.88 เซนติเมตร จำนวนใบ 4.42 – 4.63 ใบ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ความยาวราก กรรมวิธี $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ ยาวที่สุด 10.25 เซนติเมตร และค่า SPAD กรรมวิธี $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ มีค่าน้อยที่สุด 28.37 หน่วย มีความแตกต่างกันทางสถิติ

เมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 35 วันหลังปลูก ความสูง จำนวนใบ และความยาวราก มีความแตกต่างกันทางสถิติ ความสูง กรรมวิธีที่มี KH_2PO_4 และ KCl สูง ($P_{0.3}$-$K_{1.0}$) มีค่ามากที่สุด (9.42 เซนติเมตร) จำนวนใบ กรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 สูง (0.3 มิลลิโมลาร์) ทั้ง 2 กรรมวิธี มีค่ามากที่สุด (7.50 และ 7.38 ใบ) และ ความยาวราก กรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 และ KCl ต่ำ ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$) มีค่ามากที่สุด (15.21 เซนติเมตร) การลดระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ไม่ส่งผลต่อความกว้างทรงพุ่ม (17.60 - 18.50 เซนติเมตร) และค่า SPAD (29.00 - 30.79 หน่วย)

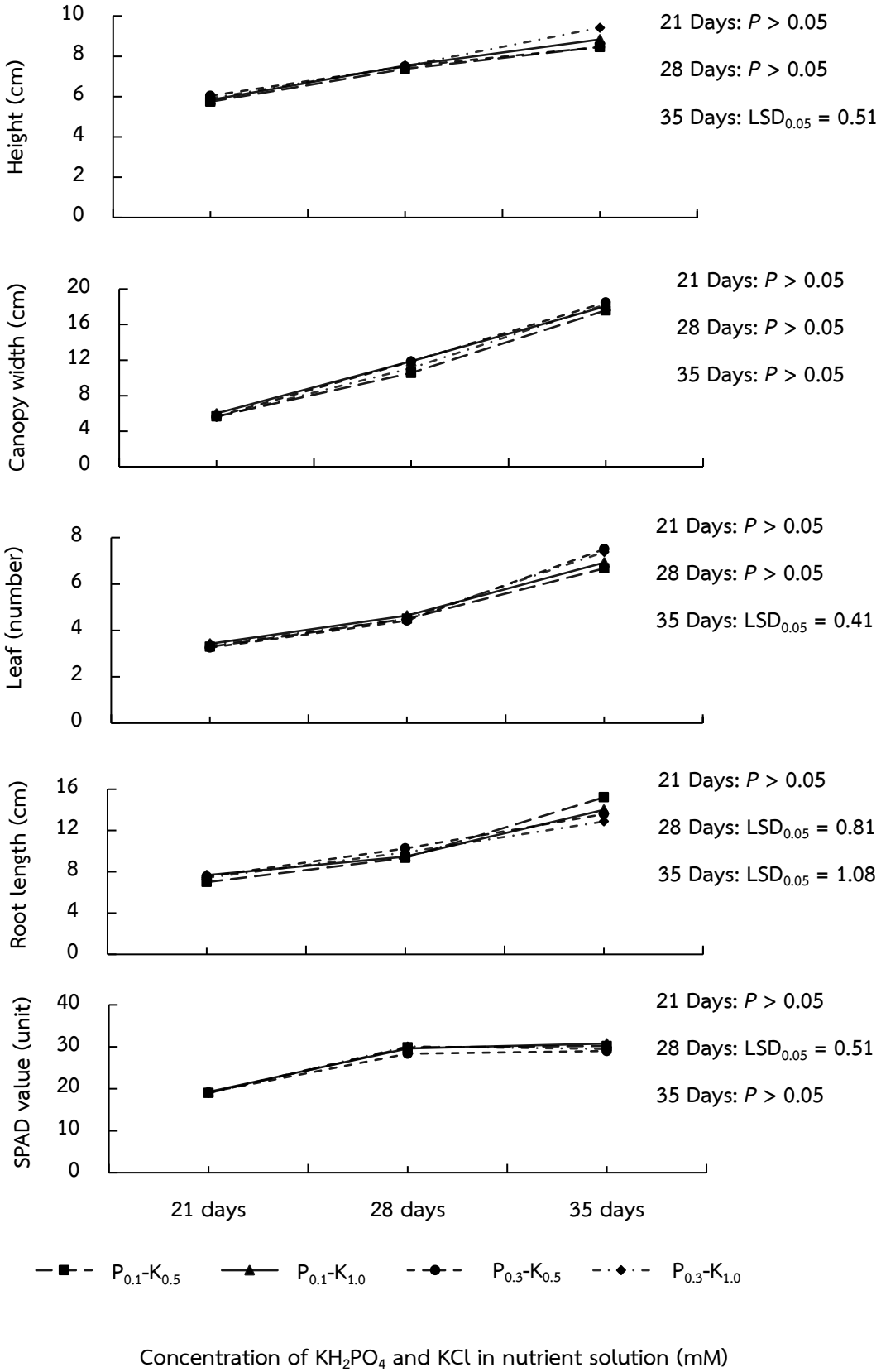


Figure 11 Growth of red oak lettuce by week at 21, 28 and 35 days after sowing.

3) การเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ระยะเก็บเกี่ยว ช่วงฤดูฝน (42 วันหลังปลูก)

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายต่างกัน 4 ระดับ ช่วงฤดูฝน ระหว่างเดือนมิถุนายน ถึงสิงหาคม 2565

พบว่าความเข้มข้นของ KH_2PO_4 หรือ KCl ที่ลดลงส่งผลกระทบต่อความสูง และความยาวรากของสลัดกรีนโอ๊ค กรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ และ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ มีความสูง 12.46 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่า $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ (10.87 เซนติเมตร) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนความยาวรากของกรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 0.1 มิลลิโมลาร์ ทั้ง 2 กรรมวิธี ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.1}$-$K_{1.0}$) มีความยาวรากมากที่สุด (13.72 และ 14.63 เซนติเมตร) ขณะที่ไม่มีผลต่อความกว้างทรงพุ่ม (21.81 - 23.39 เซนติเมตร) จำนวนใบ (10.59 - 11.89 ใบ) ค่า SPAD (24.97 - 26.28 หน่วย) และน้ำหนักสดต้น (36.83 - 43.97 กรัม) **(Table 5)**

Table 5 Plant 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)
$P_{0.1}$-$K_{0.5}$	11.78ab	22.37	11.54a	13.72a	25.94	43.97
$P_{0.1}$-$K_{1.0}$	12.46a	22.40	11.89a	14.63a	24.97	39.83
$P_{0.3}$-$K_{0.5}$	12.46a	23.39	11.83a	11.13b	25.58	46.00
$P_{0.3}$-$K_{1.0}$	10.87b	21.81	10.59b	11.34b	26.28	36.83
Analysis of variance						
***P*-value**	*	ns	*	**	ns	ns
LSD $_{0.05}$	1.17	-	0.76	0.94	-	-

Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $P<0.05$
ns means non-significant difference, * and *** means significant at $P < 0.05$ and 0.001, respectively

4) การเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ระยะเก็บเกี่ยว ช่วงฤดูฝน (42 วันหลังปลูก)

การเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊ค พบว่า ความสูง ความยาวราก และค่า SPAD ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยผักกาดหอมเรดโอ๊คมีความสูง 12.32 - 12.83 เซนติเมตร ความยาวราก 23.25 - 26.12 เซนติเมตร ค่า SPAD 37.98 - 40.17 หน่วย ทั้งนี้พบว่า ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ และน้ำหนักสดต้นมีความแตกต่างทางสถิติระหว่างแต่ละกรรมวิธีทดลอง ความกว้างทรงพุ่ม ในกรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ มีค่ามากที่สุด (21.58 เซนติเมตร) ส่วน $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีจำนวนใบมากที่สุด (11.61 และ 11.66 ใบ) นอกจากนี้ยังพบว่ากรรมวิธีทดลองที่มีการลดระดับความเข้มข้น KH_2PO_4 หรือ KCl ทำให้น้ำหนักสดต้นลดลง 25.9-32.8 เปอร์เซ็นต์ **(Table 6)**

Table 6 Plant height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of red oak lettuce in 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
Analysis of variance						
***P*-value**	ns	*	*	ns	ns	**
LSD $_{0.05}$	-	1.36	0.64	-	-	6.28

Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $P<0.05$
ns means non-significant difference, * and *** means significant at $P < 0.05$ and 0.001, respectively

5) การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและโซเดียมในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ช่วงฤดูฝน

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คในสารละลายที่มีระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายต่างกัน 4 ระดับ พบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกันทำให้เกิดการสะสมธาตุฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในผักกาดหอมกรีนโอ๊คมีความแตกต่างกันทางสถิติ การให้ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสมากที่สุด (5.39 และ 5.31 มิลลิกรัมต่อกรัม) ต้นที่ได้รับ $P_{0.1}K_{1.0}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสน้อยที่สุด (1.89 มิลลิกรัมต่อกรัม) สำหรับการสะสมโพแทสเซียม กรรมวิธี $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีการสะสมโพแทสเซียมมากที่สุด 63.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าทุกกรรมวิธี ซึ่งมีค่าระหว่าง 37.82 - 46.96 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้พบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารไม่มีผลต่อการสะสมโซเดียมในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.50 - 0.55 มิลลิกรัมต่อกรัม **(Figure 12)**

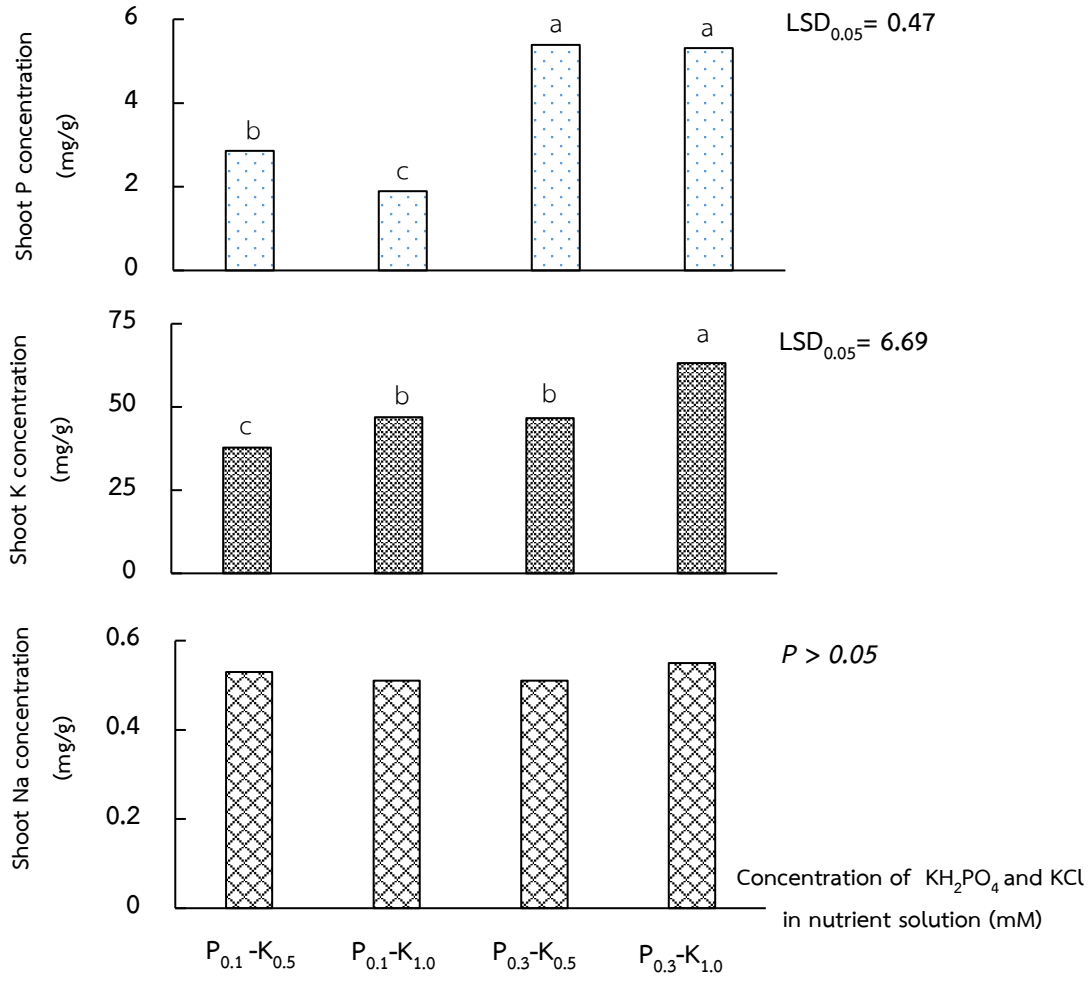


Figure 12 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in green oak planted during the rainy season.

6) การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและโซเดียมในผักกาดหอมเรดโอ๊ค ช่วงฤดูฝน

พบว่า กรรมวิธีที่มีการให้ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในระดับที่ต่างกันส่งผลให้การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโซเดียม มีความแตกต่างกันทางสถิติ พบว่า การให้ฟอสฟอรัสในสารละลายระดับเพียงพอ ($P_{0.3}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$) ผักกาดหอมเรดโอ๊คจะมีการสะสมฟอสฟอรัสสูง 6.85 และ 6.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การสะสมโพแทสเซียมจะเห็นได้ว่าการได้รับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในระดับเพียงพอ ($P_{0.3}$-$K_{1.0}$) มีการสะสมโพแทสเซียมสูงที่สุด (78.10 มิลลิกรัมต่อกรัม) อย่างไรก็ตามพบว่าการให้ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่ำ ในกรรมวิธี ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$) ทำให้มีการมีการสะสมโซเดียมในปริมาณมากที่สุด 1.03 มิลลิกรัมต่อกรัม และสูงกว่าทุกกรรมวิธีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ **(Figure 13)**

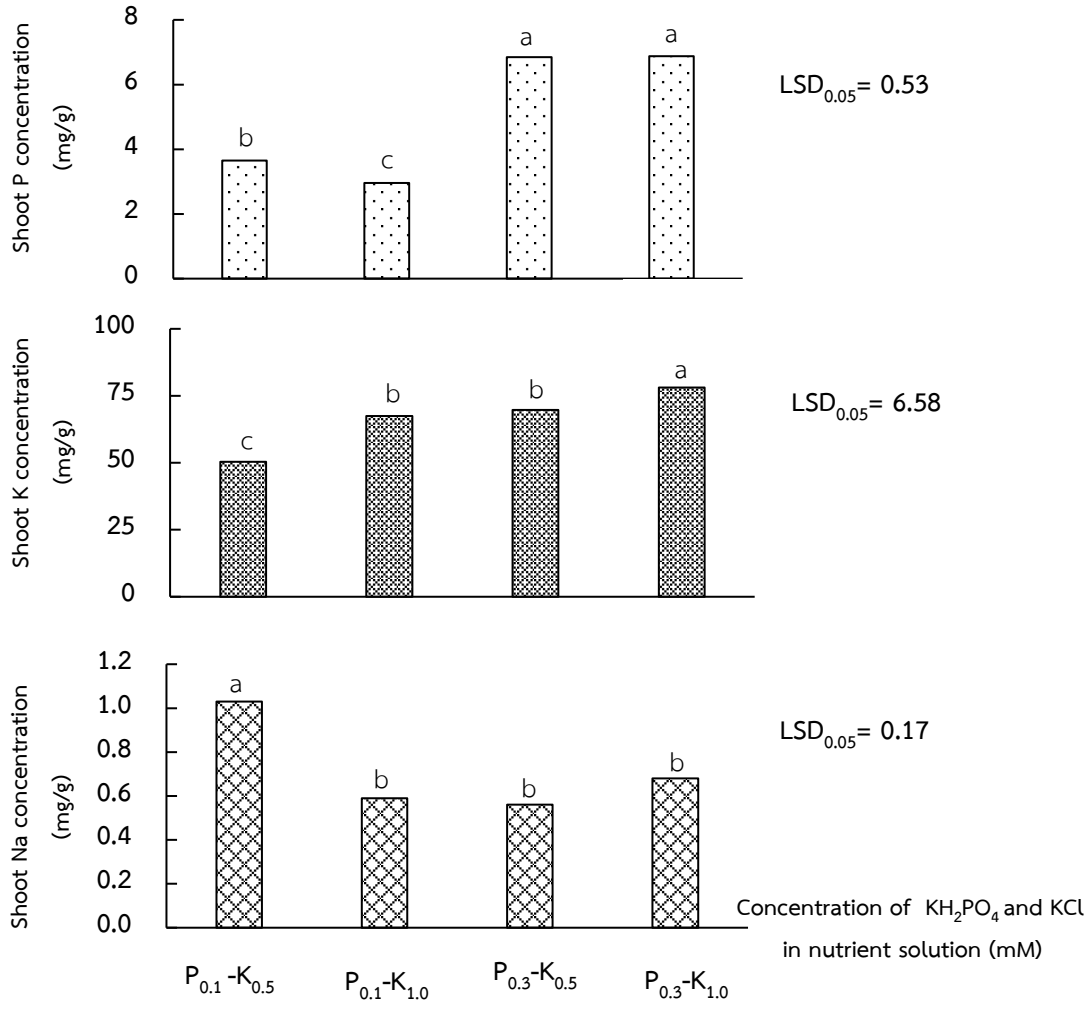


Figure 13 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in red oak planted during the rainy season.

4) สภาพอากาศ

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ได้บันทึกสภาพอากาศ ในช่วงฤดูฝน (ช่วงเดือนมิถุนายน - เดือนสิงหาคม 2565) ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตลอดระยะการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 42 วัน พบว่า มีความเข้มแสง เฉลี่ย 642.97 วัตต์ต่อตารางเมตรโดยประมาณ **(Figure 14)** มีอุณหภูมิ เฉลี่ยต่ำสุดที่ 24.06 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ เฉลี่ยสูงสุดที่ 31.70 องศาเซลเซียส **(Figure 15)** และมีความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ยต่ำสุดที่ 58.68 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ยสูงสุดที่ 95.49 เปอร์เซ็นต์ **(Figure 16)**

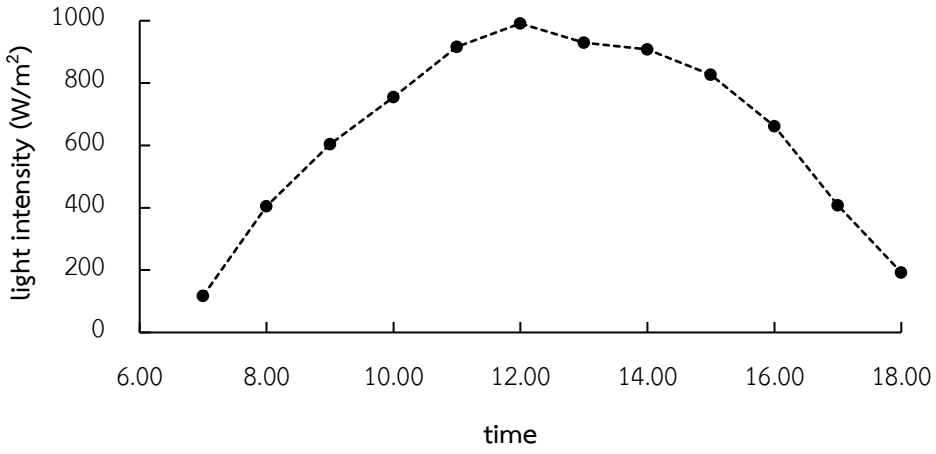


Figure 14 Light intensity during rainy season (June-August 2022)

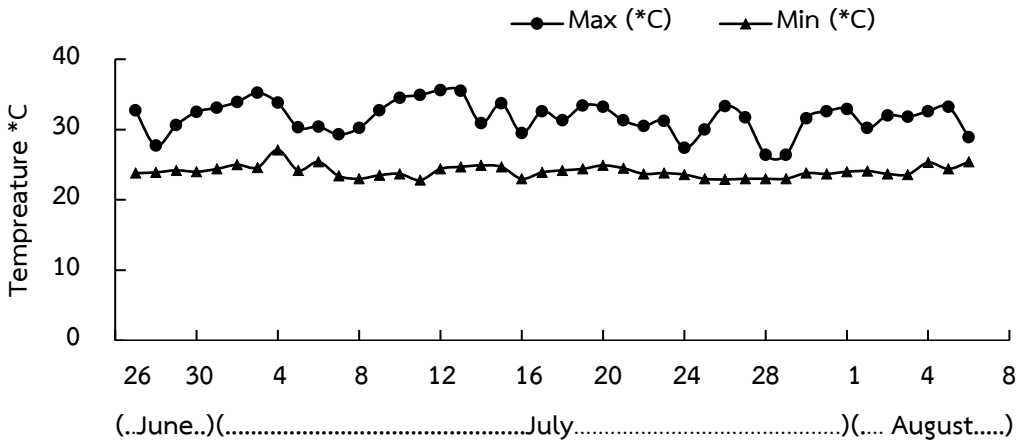


Figure 15 Temperature during the rainy season (June-August 2022)

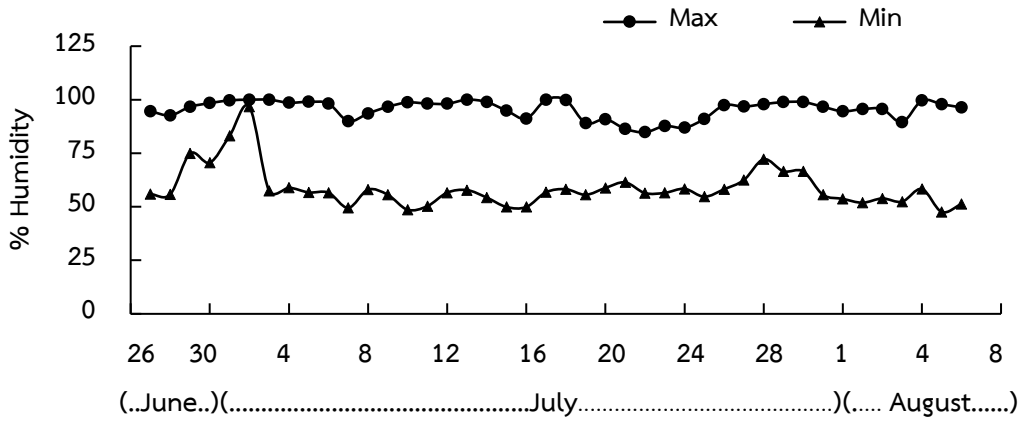


Figure 16 Relative humidity during the rainy season (June-August 2022)

4.2.2 การทดลองที่ 2.2 การทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ในสารละลายแตกต่างกัน 4 ระดับ ในฤดูหนาว (ตุลาคม - ธันวาคม 2565)

1) การเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ช่วงฤดูหนาว (21, 28 และ 35 วันหลังปลูก)

จากการทดลองการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ด้านความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก และค่า SPAD **(Figure 17)** พบว่า

เมื่อผักกาดหอมกรีนโอ๊คอายุ 21 วันหลังปลูก กรรมวิธี $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีความสูง 3.92 เซนติเมตร และความยาวราก 8.79 เซนติเมตร มากที่สุด ความกว้างทรงพุ่ม (5.88 - 6.54 เซนติเมตร) จำนวนใบ (3.50 - 3.83 ใบ) และค่า SPAD (9.88 - 10.47 หน่วย) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

เมื่อผักกาดหอมกรีนโอ๊คอายุ 28 วันหลังปลูก กรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีความสูง (5.38 เซนติเมตร) ความกว้างทรงพุ่ม (10.73 เซนติเมตร) และความยาวราก (13.13 เซนติเมตร) ซึ่งมีค่ามากที่สุด ส่วนจำนวนใบ (4.58 - 4.92 ใบ) และค่า SPAD (11.77 - 12.17 หน่วย) ไม่มีความแตกต่างกัน

เมื่อผักกาดหอมกรีนโอ๊คอายุ 35 วันหลังปลูก การเจริญเติบโตมีความแตกต่างกันทางสถิติทุกด้าน ในความเข้มข้นกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ ส่งผลต่อการเจริญเติบโตมากที่สุด โดยมีความสูง 10.75 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 21.08 เซนติเมตร จำนวนใบ 6.92 ใบ ความยาวราก 17.96 เซนติเมตร และ ค่า SPAD 16.86 หน่วย

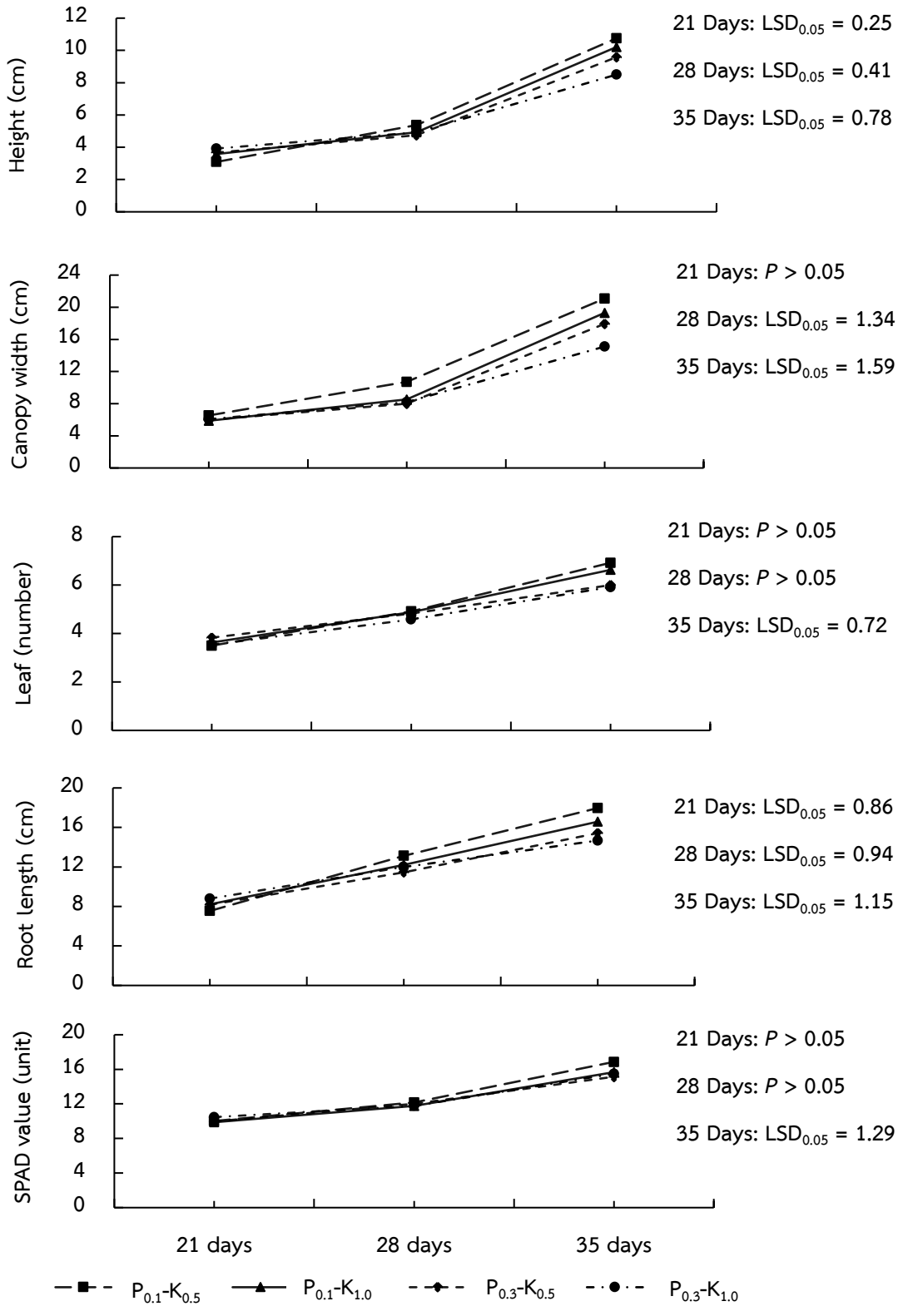


Figure 17 Growth of green oak lettuce at 21, 28 and 35 days after sowing.

2) การเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊ค ช่วงฤดูหนาว (21, 28 และ 35 วันหลังปลูก)

จากการทดลองการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊ค ด้านความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก และค่า SPAD **(Figure 18)** พบว่า

เมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 21 วันหลังปลูก ความสูงต้น จำนวนใบ และ ค่า SPAD มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยกรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีความสูงที่สุด ไม่แตกต่างจาก $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ (3.67, 3.42 และ 3.42 เซนติเมตร) กรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีจำนวนใบมากที่สุด (4.21 ใบ) และ ค่า SPAD กรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีค่ามากที่สุด (17.56 หน่วย) แต่ไม่มีผลต่อความกว้างทรงพุ่ม (5.58 - 6.02 เซนติเมตร) และความยาวราก (10.59 - 11.75 เซนติเมตร)

เมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 28 วันหลังปลูก ความสูงต้น และ ค่า SPAD มีความแตกต่างกันทางสถิติ กรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีความสูงต้นมากที่สุด (3.42 และ 3.42 เซนติเมตร) ส่วนกรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีค่า SPAD มากที่สุด (19.91 หน่วย) ขณะที่ความกว้างทรงพุ่ม (8.05 - 8.27 เซนติเมตร) จำนวนใบ (5.25 - 5.59) และความยาวราก (14.79 - 16.79 เซนติเมตร) ไม่มีความแตกต่างกัน

เมื่อผักกาดหอมเรดโอ๊คอายุ 35 วันหลังปลูก พบว่าการเจริญของผักกาดหอมเรดโอ๊คทุกระดับความเข้มข้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีความสูง (8.04 - 9.33 เซนติเมตร) ความกว้างทรงพุ่ม (15.46 - 16.75 เซนติเมตร) จำนวนใบ (7.12 - 7.63 ใบ) ความยาวราก (20.46 - 21.50 เซนติเมตร) และค่า SPAD (24.39 - 24.82 หน่วย)

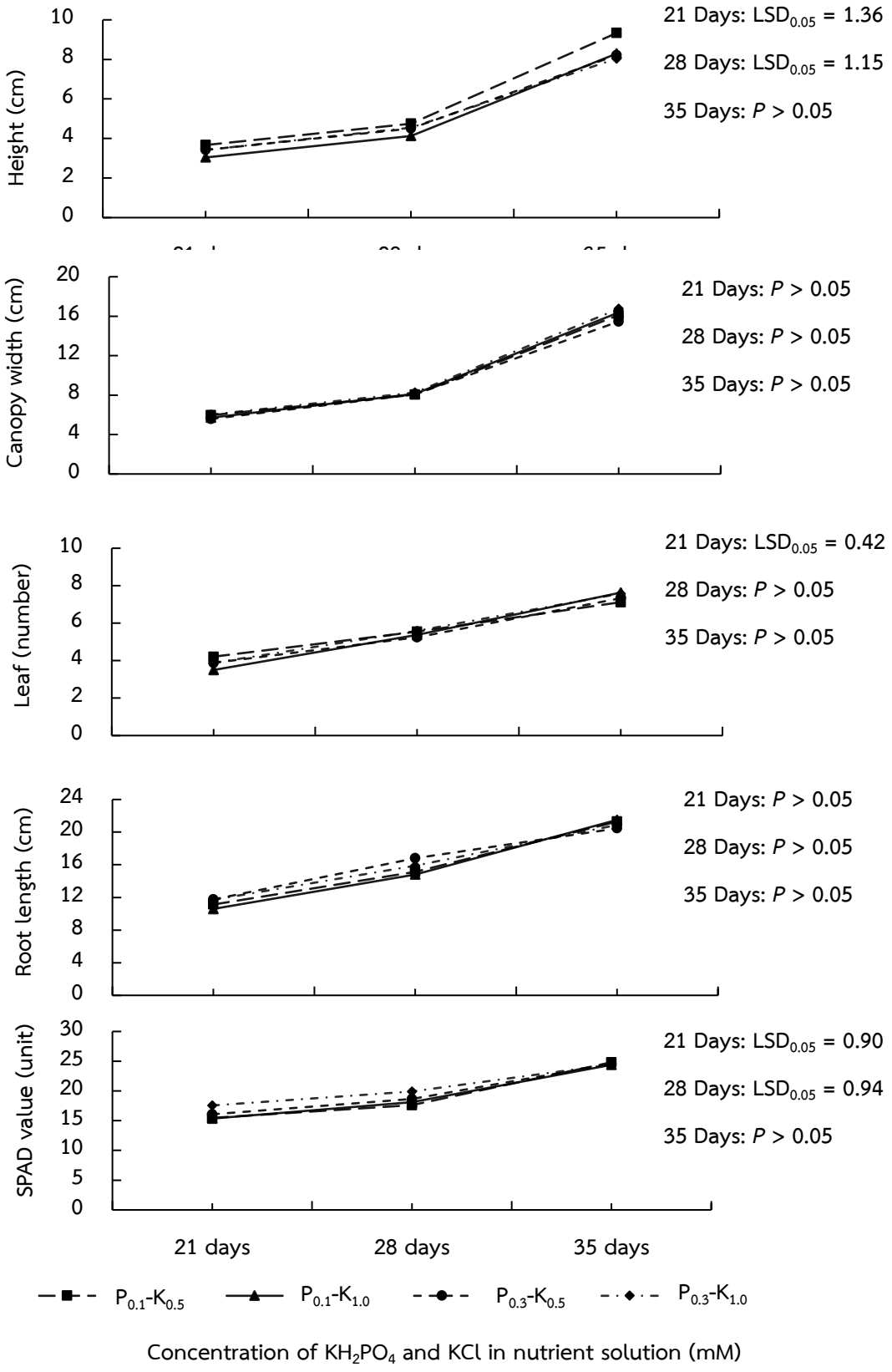


Figure 18 Growth of red oak lettuce at 21, 28 and 35 days after sowing.

3) การเจริญเติบโตและผลผลิตผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ระยะเก็บเกี่ยว ช่วงฤดูหนาว (42 วันหลังปลูก)

การเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ความสูง ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่วัดโดยเครื่อง SPAD และน้ำหนักสดต้น พบว่าการเพิ่มระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ส่งผลกระทบต่อมีความสูง ความกว้างทรงพุ่ม และจำนวนใบ มีค่าน้อยที่สุดแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ได้รับ KH_2PO_4 0.3 มิลลิโมลาร์ และ KCl 1.0 มิลลิโมลาร์ ทำให้ความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่มและจำนวนใบน้อยที่สุด (10.75 เซนติเมตร), (22.92 เซนติเมตร) และ (8.50 ใบ) ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ที่ลดลงส่งผลให้จำนวนใบ ความยาวรากและน้ำหนักสดต้น มีค่ามากที่สุด มีความแตกต่างกันทางสถิติ กรรมวิธี KH_2PO_4 0.1 มิลลิโมลาร์ และ KCl 0.5 มิลลิโมลาร์ มีจำนวนใบ (11.25 ใบ) ความยาวราก (25.83 เซนติเมตร) และน้ำหนักต้น (31.81 กรัม) แต่ไม่ส่งผลต่อค่า SPAD (16.03 - 17.96 หน่วย) ที่วัดจากใบผักกาดหอมกรีนโอ๊ค (**Table 7**)

Table 7 Plant height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of green oak lettuce in 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)
$P_{0.1}$-$K_{0.5}$	13.75a	27.38a	11.25a	25.83a	17.96	31.81a
$P_{0.1}$-$K_{1.0}$	13.46a	26.92a	10.33b	22.42b	16.03	22.91b
$P_{0.3}$-$K_{0.5}$	13.13a	25.71a	10.13b	22.58b	16.77	21.11b
$P_{0.3}$-$K_{1.0}$	10.75b	22.92b	8.50c	21.00b	17.47	17.80b
Analysis of variance						
***P*-value**	**	*	**	*	ns	**
LSD $_{0.05}$	0.82	2.22	0.74	2.49	-	5.52

Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $P<0.05$

ns means non-significant difference, * and *** means significant at $P < 0.05$ and 0.001, respectively

4) การเจริญเติบโตและผลผลิตผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ระยะเก็บเกี่ยว ช่วงฤดูหนาว (42 วันหลังปลูก)

การเจริญเติบโตของผักกาดหอมเรดโอ๊คแสดงดัง **Table 8** พบว่าความสูง ความกว้างทรงพุ่ม ความยาวราก ค่า SPAD และน้ำหนักสดต้น ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยผักกาดหอมเรดโอ๊คมีความสูง 11.58 - 12.42 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 24.15 - 25.34 เซนติเมตร ความยาวราก 26.96 - 29.33 เซนติเมตร ค่า SPAD 25.36 - 26.30 หน่วย และน้ำหนักสดต้น 25.34 - 27.04 กรัม ทั้งนี้พบว่า ผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ได้รับ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีจำนวนใบมากที่สุด (14.38 ใบ) สูงกว่าทุกกรรมวิธีอย่างมีนัยสำคัญ

Table 8 Plant height, canopy width, leaf number, root length, SPAD value and shoot fresh weight of red oak lettuce in 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)
$P_{0.1}$-$K_{0.5}$	11.58	24.25	12.84b	26.96	25.85	27.04
$P_{0.1}$-$K_{1.0}$	12.42	24.15	13.62ab	28.25	26.18	25.34
$P_{0.3}$-$K_{0.5}$	11.84	24.59	13.38b	29.33	26.30	26.92
$P_{0.3}$-$K_{1.0}$	12.29	25.34	14.38a	27.33	25.36	25.80
Analysis of variance						
***P*-value**	ns	ns	*	ns	ns	ns
LSD $_{0.05}$	-	-	0.87	-	-	-

Different lowercase letters designate a significant difference concentration in nutrient solution with LSD at $P<0.05$

ns means non-significant difference, * and *** means significant at $P < 0.05$ and 0.001, respectively

5) การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและโซเดียมในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ช่วงฤดูหนาว

การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโซเดียม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่าต้นผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ได้รับในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 สูง (0.3 มิลลิโมลาร์) ทั้ง 2 กรรมวิธี ($P_{0.3}$-$K_{1.0}$ และ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$) มีการสะสมฟอสฟอรัสในต้นมากที่สุด 5.19 และ 4.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนในกรรมวิธีที่ได้รับ KH_2PO_4 ต่ำ (0.1 มิลลิโมลาร์) ทั้ง 2 กรรมวิธี ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.1}$-$K_{1.0}$) มีการสะสมฟอสฟอรัสน้อยที่สุด 3.10 และ 3.11 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ หรือการสะสมฟอสฟอรัสในส่วนต้นลดลง 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl สูง ในกรรมวิธี $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ ส่งผลให้การสะสมโพแทสเซียมมีค่ามากที่สุด 59.68 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่ความเข้มข้นของ KH_2PO_4 หรือ KCl ต่ำ ในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีการสะสมโพแทสเซียมน้อยที่สุด 32.60 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือการสะสมโพแทสเซียมในส่วนต้นลดลง 45 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl ต่ำ ในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีการสะสมของโซเดียมสูงที่สุด 1.92 มิลลิกรัมต่อกรัม และความเข้มข้นของ KH_2PO_4 และ KCl สูง ในกรรมวิธีที่ได้รับ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ ที่มีการสะสมของโซเดียมน้อยที่สุด 0.21 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือการสะสมโซเดียมในส่วนต้นลดลง 89 เปอร์เซ็นต์ **(Figure 19)**

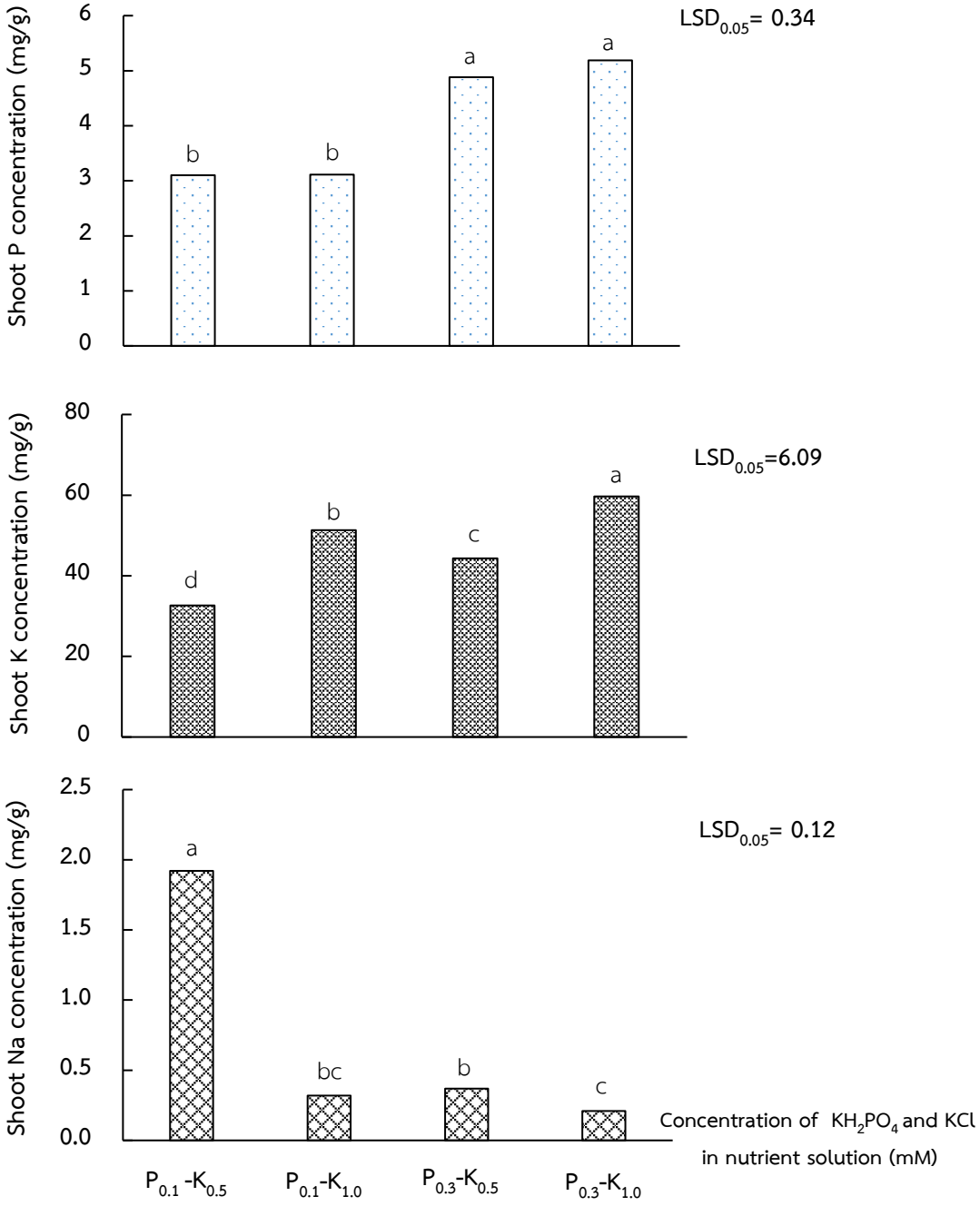


Figure 19 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in green oak planted during winter.

6) การสะสมธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและโซเดียมในผักกาดหอมเรดโอ๊ค ช่วงฤดูหนาว

จากการทดลองพบว่า การสะสมธาตุอาหารในต้นผักกาดหอมเรดโอ๊คมีความแตกต่างกันทางสถิติ การให้ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสมากที่สุด 5.23 และ 5.40 มิลลิกรัมต่อกรัมต้นที่ได้รับ $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ มีการสะสมฟอสฟอรัสน้อยที่สุด (3.60 และ 3.54 มิลลิกรัมต่อกรัม) สำหรับการสะสมโพแทสเซียม ผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ได้รับความเข้มข้นของ KCl สูง (1.0 มิลลิโมลาร์) ทั้ง 2 กรรมวิธี ($P_{0.1}$-$K_{1.0}$ และ $P_{0.3}$-$K_{1.0}$) มีการสะสมโพแทสเซียมในต้นมากที่สุด 63.25 และ 61.98 มิลลิกรัมต่อกรัม ความเข้มข้นของ KCl ต่ำ (0.5 มิลลิโมลาร์) ทั้ง 2 กรรมวิธี ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$) มีการสะสมโพแทสเซียมในต้นน้อยที่สุด 43.23 และ 46.74 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อมีการลดธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมลงทำให้มีผักกาดหอมเรดโอ๊คมีการสะสมโซเดียมสูงขึ้น ที่กรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{0.5}$ มีการสะสมโซเดียมสูงที่สุด 2.93 มิลลิกรัมต่อกรัม และกรรมวิธี $P_{0.3}$-K_1 มีการสะสมโซเดียมต่ำที่สุด (0.45 มิลลิกรัมต่อกรัม) **(Figure 20)**

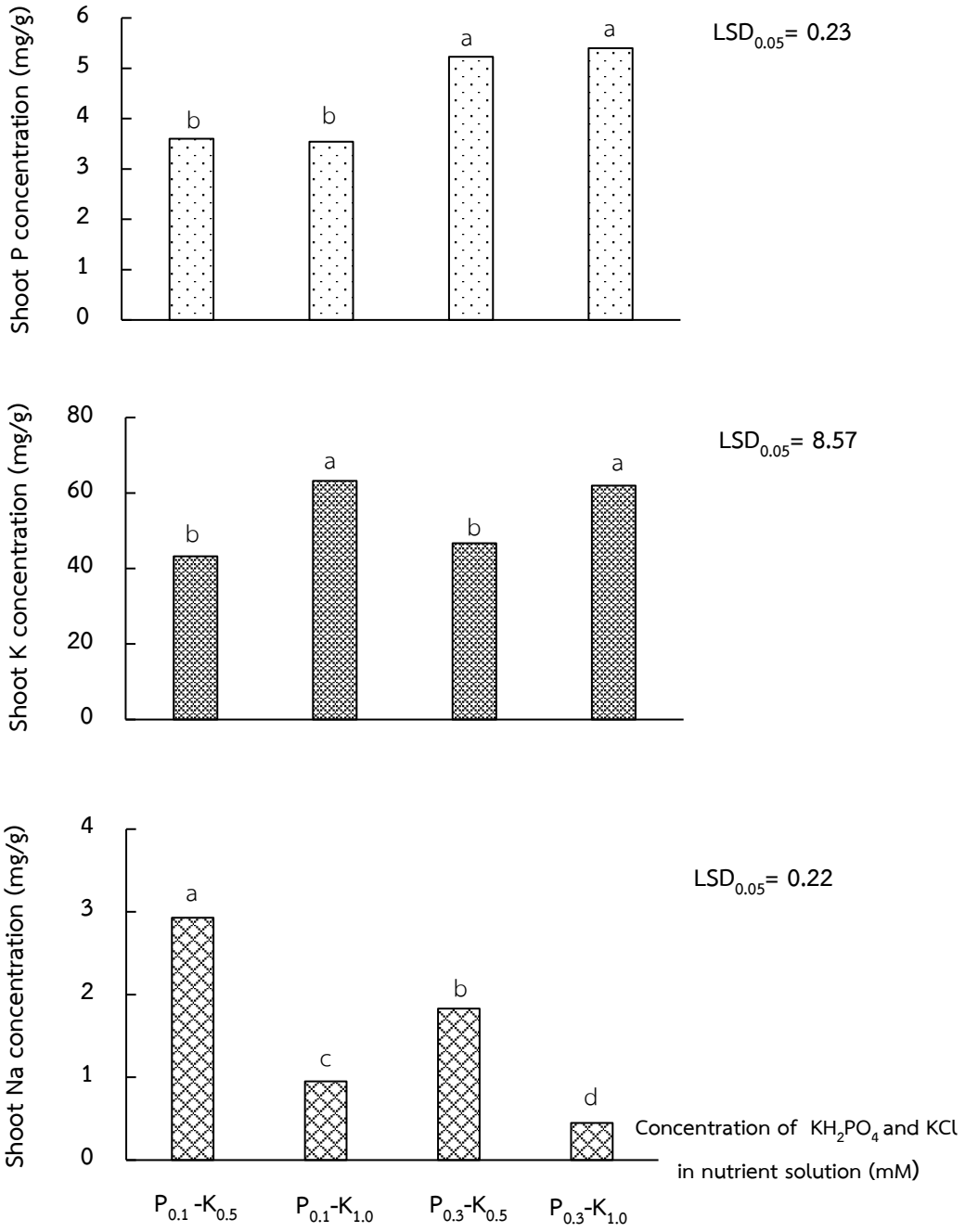


Figure 20 Accumulation of phosphorus, potassium and sodium in red oak planted during winter.

4) สภาพอากาศ

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ได้บันทึกสภาพอากาศ ในช่วงฤดูหนาว (ช่วงเดือนตุลาคม - เดือนธันวาคม 2565) ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตลอดระยะการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค 42 วัน พบว่า มีความเข้มแสง เฉลี่ย 545.44 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยประมาณ **(Figure 21)** มีอุณหภูมิ เฉลี่ยต่ำสุดที่ 23.72 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิ เฉลี่ยสูงสุดที่ 33.11 องศาเซลเซียส **(Figure 22)** และมีความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ยต่ำสุดที่ 55.76 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ยสูงสุดที่ 95.55 เปอร์เซ็นต์ **(Figure 23)**

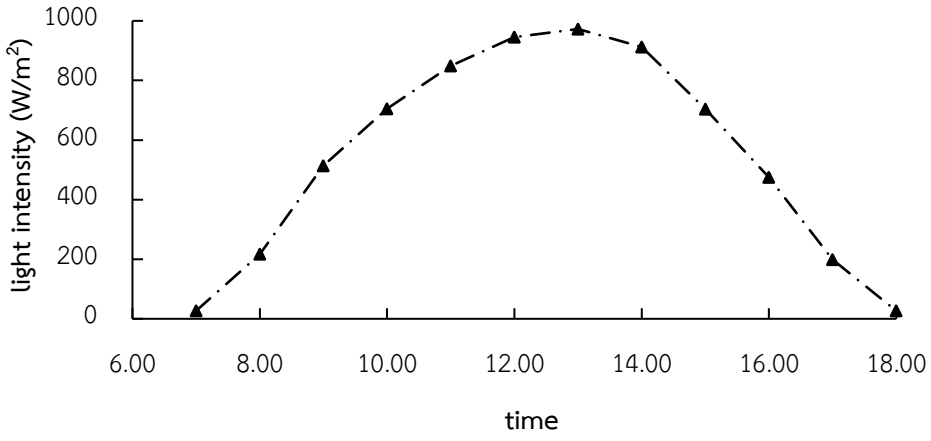


Figure 21 Light intensity during winter season (November-December 2022)

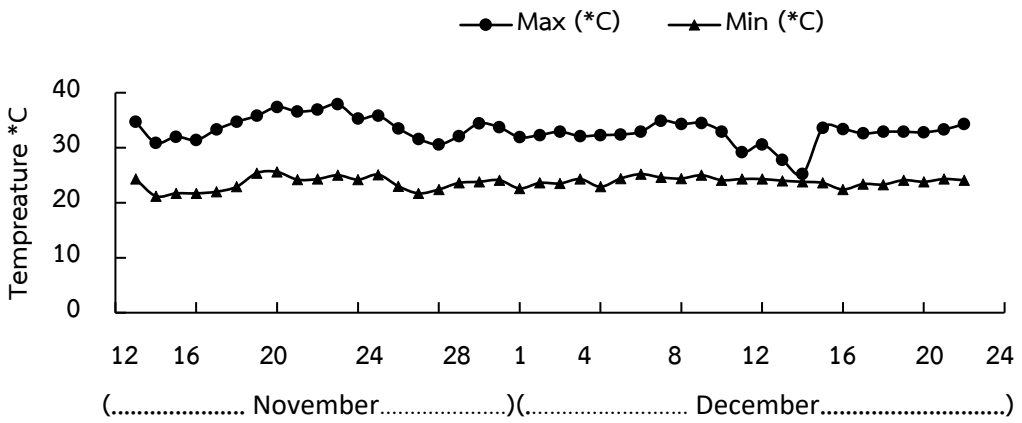


Figure 22 Temperature during the winter season (November-December 2022)

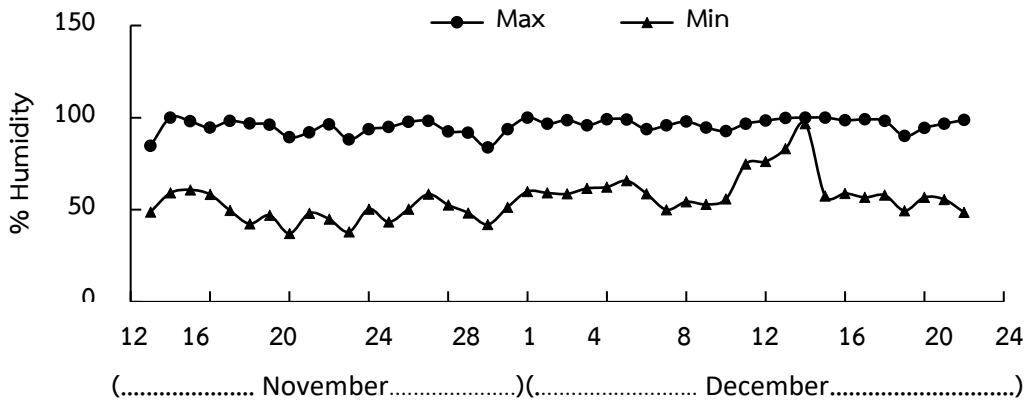


Figure 23 Relative humidity during the winter season (November-December 2022)

บทที่ 5
วิจารณ์ผลการศึกษา

การทดลองที่ 1 ผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค

จากการทดลองพบว่า การลดปริมาณโพแทสเซียมหรือฟอสฟอรัสธาตุใดธาตุหนึ่ง ในสารละลายธาตุอาหารทำให้การสะสมโพแทสเซียม หรือฟอสฟอรัสลดลง โดยไม่ส่งผลกระทบทางลบต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของผักกาดหอม แม้ว่า Nui *et al*. (2015) ได้รายงานว่าเมื่อให้ปริมาณฟอสฟอรัสต่ำมาก เมแทบอลิซึมของพืชอาจส่งผลยับยั้งการผลิตคาร์โบไฮเดรตที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช ทำให้การเจริญเติบโตลดลง แต่ในการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คในสารละลายที่มีการลดปริมาณฟอสฟอรัส (การทดลองที่ 1.1) ไม่พบว่าการเจริญเติบโตของผักกาดหอมกรีนโอ๊คได้รับผลกระทบจากปริมาณฟอสฟอรัสที่ลดลง โดยความสูง ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก และค่า SPAD ในกรรมวิธีที่มีการลดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายมีค่าไม่แตกต่างจากกรรมวิธีที่ได้รับปริมาณฟอสฟอรัสปกติ ซึ่ง Neocleous and Savvas (2019) ได้รายงานว่า การลดปริมาณฟอสฟอรัสให้อยู่ในระดับต่ำสำหรับการปลูกผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกส์ ผักสามารถดูดธาตุฟอสฟอรัสใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิต สอดคล้องกับ Germano *et al*. (2022) ที่รายงานว่าโหระพาสามารถปลูกได้ในระบบไฮโดรโพนิกส์ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต การสังเคราะห์แสง การดูดซึมน้ำและแร่ธาตุ การแลกเปลี่ยนก๊าซในใบและคุณภาพของผลผลิต Neocleous and Savvas (2019) ได้ศึกษาการลดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยการปลูกผักกาดหอม 2 ชนิด พบว่าการปลูกผักในสภาวะฟอสฟอรัสต่ำถึง 0.8 มิลลิโมลาร์ ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับผักที่ปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส 1.3 และ 1.8 มิลลิโมลาร์ แต่อาจส่งผลต่อการดูดใช้แคลเซียม และทำให้มีค่าคลอโรฟิลล์ลดลง ทั้งนี้การลดปริมาณฟอสฟอรัสไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตในพืชที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น เช่น ผักกาดหอม แต่ Silber (2008) ไม่แนะนำให้ใช้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่า 0.5 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ต่ำเกินไปจะส่งผลต่ออัตราการขนส่งฟอสฟอรัสไปยังผิวรากพืช สอดคล้องกับ Peret *et al* (2011) ที่รายงานว่าพืชต้องปรับตัวเพื่อลดการใช้ฟอสเฟตและเพิ่มการนำฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์และนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น การยับยั้งการเจริญเติบโตของรากแก้ว เพิ่มการสร้างรากแขนง เพิ่มจำนวนขนราก เพื่อเพิ่มการนำฟอสเฟตไปใช้เกิดการเปลี่ยนอัตราการเจริญเติบโตของราก ต่อยอด (Root-to-shoot growth ratio) ซึ่งเป็นการตอบสนองโดยทั่วไปของพืชเมื่อมีการขาดแคลนธาตุอาหาร การขาดธาตุฟอสฟอรัสจะกระตุ้นการสร้างขนราก ซึ่งฟอสเฟตจะมีผลมากต่อทั้งความยาวและความหนาแน่นของขนรากจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซึมของราก และประสิทธิภาพการดูดซึมของขนราก

ยังเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มความหนาแน่นของขนรากเกิดจากการลดความยาวของเซลล์ในชั้นอีพิเดอร์มิส เมื่อปริมาณฟอสเฟตลดลง นอกจากนี้ยังทำให้อัตราส่วนของยอดลดลง และลดการสะสมฟอสฟอรัสในพืชอีกด้วย (Zhu *et al*., 2020) เช่นเดียวกับ ทศพร และคณะ (2560) ที่ปลูกข้าวในสารละลายที่ไม่มีฟอสฟอรัสทำให้รากพืชมีความยาวมากกว่า แต่จำนวนรากต่อต้นน้อยกว่า และมีอัตราส่วนของน้ำหนักแห้งระหว่างรากต่อยอดมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส ร้อยละ 50-200 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่ขาดฟอสฟอรัส พืชสร้างรากใหม่ได้น้อย จึงเพิ่มความยาวของรากแทนในการหาธาตุอาหารให้

พอเพียงกับการเจริญเติบโต แสดงให้เห็นว่าข้าวต้องใช้รากปริมาณมากในการสร้างยอดเมื่อขาดแคลนฟอสฟอรัส การขาดแคลนฟอสฟอรัส ทำให้พืชต้องมีการปรับตัวเพื่ออยู่รอดในสภาวะที่ขาดแคลนฟอสฟอรัส (ขนิษฐา และวราภรณ์, 2563) การลดปริมาณฟอสฟอรัสให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าที่แนะนำนั้นหากปลูกผักในระบบไฮโดรโพนิกส์จะทำให้พืชสามารถดูดธาตุอาหารได้โดยตรง ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดใช้ฟอสฟอรัสในกรณีที่มีฟอสฟอรัสต่ำ โดยไม่กระทบต่อการเจริญเติบโต แต่ถ้ามีการลดปริมาณฟอสฟอรัสมากเกินไป อาจมีผลกระทบต่อการดูดใช้แคลเซียม จากการทดลองของ Adams (2002) พบว่าผักกาดหอมกรีนโอ๊คที่ได้รับฟอสฟอรัสความเข้มข้น 0.6 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 มีน้ำหนักสดที่น้อยกว่าผักที่ได้รับฟอสฟอรัสความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 อาจเนื่องมาจากค่า EC ในสารละลายธาตุอาหารในกรรมวิธี K0.6 ในสองสัปดาห์ก่อนเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ย 2.1 และ 2.2 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า EC ที่เหมาะสมสำหรับผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกส์ (กนกพร และคณะ, 2562) เมื่อพิจารณาถึงการสะสมธาตุอาหารในส่วนต้นของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค พบว่าการสะสมฟอสฟอรัส ในส่วนต้นของผักกาดหอมกรีนโอ๊คลดลงจาก 4.58 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 3.59 และ 1.66 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ หรือสามารถลดการสะสมฟอสฟอรัสได้ถึง 64 เปอร์เซ็นต์ และ 21 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการลดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายลงจาก 0.6 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 เป็น 0.2 และ 0.1 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4

สำหรับการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คในสารละลายที่มีการลดปริมาณโพแทสเซียม (การทดลองที่ 1.2) พบว่าปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อความสูง ขนาดทรงพุ่ม จำนวนใบ ความยาวราก และน้ำหนักสดต้น ซึ่งสอดคล้องกับ กนกพร และคณะ (2562) ที่พบว่าผักทดลอง 6 ชนิด มีปริมาณโพแทสเซียมลดลงตามปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ลดลง ในขณะที่น้ำหนักสด ความสูง และปริมาณคลอโรฟิลล์ ไม่แตกต่างจากผักที่ได้รับโพแทสเซียมในปริมาณปกติ รวมทั้งปริมาณโพแทสเซียมที่ลดลงไม่ส่งผลต่อคุณภาพผลผลิต ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผักกาดหอมมีความสามารถในการหาและดูดใช้ธาตุอาหารต่างๆ ในสัดส่วนที่พืชต้องการได้ แม้จะอยู่ในสารละลายที่อาจมีสัดส่วนของธาตุอาหารที่แตกต่างกัน แต่จะกระทบต่อผลผลิตหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนในสารละลายธาตุอาหารนั้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้กับสัดส่วนที่พืชต้องการมากน้อยเพียงใด

(Steiner, 1980) อาจกล่าวได้ว่าปริมาณโพแทสเซียมที่พืชได้รับเพียงพอที่จะใช้ในการเจริญเติบโตแม้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารจะต่ำมาก (Hafsi *et al*., 2011) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการลดโพแทสเซียมทำให้พืชมีการดูดใช้แมกนีเซียมมากขึ้น ซึ่งแมกนีเซียมเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุที่สำคัญที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงเช่นกัน แต่การทดลองของ Wakeel *et al*. (2011) พบผลการทดลองที่ต่างออกไป โดยพบว่าการงดให้โพแทสเซียมก่อนเก็บผลผลิต 2 สัปดาห์ ส่งผลต่อคุณภาพผลผลิต คือน้ำหนักสด ความสูง และปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง เนื่องจากโพแทสเซียมมีความสำคัญต่อการควบคุมกระบวนการหลายอย่างในด้านสรีรวิทยาและชีวเคมีของพืช มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักทั้งในด้านการเปิดปิดปากใบ การสังเคราะห์โปรตีน การสังเคราะห์แสงและฮอร์โมนที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของรากและยอด (Marek *et al*., 2019) จึงทำให้ค่า SPAD ที่วัดได้มีค่าลดลงเมื่อมีการลดปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหาร นอกจากนี้ยังพบว่าการลดปริมาณโพแทสเซียมยังส่งผลต่อผลผลิตและคุณภาพผลผลิตของผักกาดหอมเรดโอ๊คด้วย (เยาวพา และนิสา, 2552) ทั้งนี้ในการทดลองนี้ พบว่า ปริมาณโพแทสเซียมในผักกาดหอมกรีนโอ๊คลดลงได้ถึง 26 และ 44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลดปริมาณโพแทสเซียมลง 75 เปอร์เซ็นต์ และ 87.5 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิต

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการลดปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่ออาการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในฤดูปลูกที่ต่างกัน

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊คในสารละลายธาตุอาหารที่มีการลดระดับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม พบว่าการเจริญเติบโตของผักกาดหอมได้รับผลกระทบจากการลดระดับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ทั้งการทดลองในฤดูฝน (การทดลองที่ 2.1) และการทดลองในฤดูหนาว (การทดลองที่ 2.2) เนื่องจากธาตุทั้งสองเป็นธาตุจำเป็นสำหรับพืช การได้รับฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไปจะส่งผลต่ออัตราการขนส่งฟอสฟอรัสไปยังผิวรากพืช รวมทั้งพืชจะมีการปรับตัวเพื่อลดการใช้ฟอสเฟตและนำฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์และนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้อัตราส่วนการเจริญเติบโตของส่วนยอดลดลง ส่วนโพแทสเซียมที่ลดลงทำให้การสังเคราะห์แสงและอัตราการคายน้ำลดลง โดยการกระตุ้นการปิดปากใบ (Marek *et al*., 2019) ส่งผลต่อน้ำหนักสด ความสูง และปริมาณคลอโรฟิลล์ (Prajapati and Modi, 2012) ทั้งนี้ผลกระทบเหล่านี้อาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ลดลงอยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง หรือการลดลงนั้นทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารอื่น (ยงยุทธ, 2558) เช่น การขาดฟอสฟอรัสยังทำให้พืชขาดโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (สมศักดิ์ และคณะ, 2563; Adams, 2002; Onthong and Osaki, 2006) การขาดโพแทสเซียมทำให้พืชดูดใช้ธาตุบางชนิดได้มากขึ้น ได้แก่ ฟอสฟอรัส และแคลเซียม (ยงยุทธ, 2558) แมงกานีส แมกนีเซียม และ

โบรอน (Levine and Mattson, 2021) อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการตอบสนองด้านการเจริญเติบโตของผักกาดหอมทั้งสองชนิดต่อระดับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่ลดลงไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกลักษณะการเจริญเติบโตที่มีการวัด อาจเนื่องมาจากสัดส่วนธาตุอาหารที่พืชต้องการมีความแตกต่างกัน (เยาวพา และนิสา, 2552)

สำหรับการสะสมฟอสฟอรัสในผักกาดหอมที่ปลูกในฤดูฝน (การทดลองที่ 2.1) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 1.89-5.39 มิลลิกรัมต่อกรัม ในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค และ 2.96-6.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ในผักกาดหอมเรดโอ๊ค ทั้งนี้ผักกาดหอมทั้งสองชนิดที่ได้รับฟอสฟอรัส 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 เนื่องจากการได้รับโพแทสเซียมในระดับที่ต่ำทำให้พืชมีการดูดฟอสฟอรัสได้มากขึ้น (ยงยุทธ, 2558) เช่นเดียวกับผักกาดหอมเรดโอ๊ค นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสต่ำ ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$) สามารถลดการสะสมโพแทสเซียมได้ 40 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค ตามลำดับ ส่วนการลดปริมาณโพแทสเซียมลงทั้ง 2 กรรมวิธี ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$ และ $P_{0.3}$-$K_{0.5}$) ในผักกาดหอมที่ปลูกในฤดูหนาว (การทดลองที่ 2.2) ทำให้สามารถลดการสะสมโพแทสเซียมได้ 25-45 เปอร์เซ็นต์ และ 26-31 เปอร์เซ็นต์ ในผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค ตามลำดับ ซึ่งการสะสมธาตุโพแทสเซียมในผักกาดหอมทั้ง 2 ชนิด ลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ กนกพร และคณะ (2019) การลดปริมาณโพแทสเซียมไนเตรตในสารละลายธาตุอาหารลงสามารถลดปริมาณการสะสมธาตุโพแทสเซียมในผักสดได้ในทุกกรรมวิธีการทดลอง เช่นเดียวกับ Zhang *et al.* (2017) ได้ทำการทดลองลดปริมาณโพแทสเซียมในผักกาดหอม พบว่าการสะสมโพแทสเซียมในใบของผักกาดหอมทั้งสามชนิดลดลง แต่การลดปริมาณของโพแทสเซียมส่งผลต่อการเปิดปิดปากใบและทำให้อัตราสังเคราะห์แสงลดลง Hoagland and Arnon (1950) รายงานว่าการลดความเข้มข้นของโพแทสเซียมจาก 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ปริมาณโพแทสเซียม ในใบอ่อนผักลดลงประมาณ 39 เปอร์เซ็นต์ และ 27 เปอร์เซ็นต์ ในสวิสชาร์ดและผักโขม ในประเทศญี่ปุ่นมีงานวิจัยที่สามารถลดปริมาณโพแทสเซียมในผักโขมและสวิสชาร์ดลงได้ 10-32 เปอร์เซ็นต์ โดยการลดปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ลง 75 เปอร์เซ็นต์ Xu *et al.* (2021) ได้ทดลองปลูกผักกาดหอมที่มีการลดปริมาณโพแทสเซียมให้ต่ำลง โดยเปลี่ยนจากการให้สารละลาย KNO_3 เปลี่ยนเป็น $NaNO_3$ พบว่าปริมาโพแทสเซียมที่สะสมในใบลดลง การเจริญเติบโตยังมีความต่อเนื่อง ดังนั้นสามารถปลูกผักโดยใช้โพแทสเซียมต่ำได้ จากการทดลองของ กนกพร และคณะ (2565) เมื่อลดปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารพืชลง มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมในผลผลิตในมะเขือเทศเชอรี่ พันธุ์ทับทิมแดง T2021 และพันธุ์สวีทบอย 1 ลดลง Tsukagoshi *et al.* (2015) ทดลองลดปริมาณโพแทสเซียมจาก 4 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร เหลือ 1 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร ในช่วง

ติดดอกช่อแรกถึงช่อที่สามและงดให้โพแทสเซียมจนเก็บผลผลิต พบว่า มะเขือเทศมีปริมาณโพแทสเซียมลดลงร้อยละ 25 และการทดลองของ Ogawa *et al*. (2007) พบว่าเมื่องดการให้โพแทสเซียมก่อนเก็บผลผลิต จะมีปริมาณโพแทสเซียมสะสมในพืชลดต่ำกว่า 50 มิลลิกรัม 100 กรัมต่อน้ำหนักสด (Diem and Godnold, 1993) Pujos and Morard (1997) กล่าวว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่ลดลงในสารละลายธาตุอาหารนำไปสู่การลดการสะสมของโพแทสเซียมในชิ้นส่วนของต้นเมล่อนลงอย่างมากพบว่าการควบคุมความเข้มข้นของโพแทสเซียมลดลงมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ในใบ ลำต้น หรือราก เมื่อโพแทสเซียมลดลง 1/16 ในทางกลับกัน ปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ในใบและราก ในขณะที่เพิ่มขึ้น 22 เปอร์เซ็นต์ในลำต้น ส่วน D'Imperio *et al*. (2019) ได้การจัดการความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่สามารถลดโพแทสเซียมในเมล่อนได้มากถึง 43 เปอร์เซ็นต์ หรือประมาณ 1 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม โดยไม่ทำให้การเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพลดลง

อย่างไรก็ตามจากการทดลองนี้พบว่า กรรมวิธีที่มีการลดทั้งปริมาณฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหาร ($P_{0.1}$-$K_{0.5}$) ทำให้เกิดการสะสมโซเดียมเพิ่มขึ้น 85 และ 89 เปอร์เซ็นต์ ในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค และเรดโอ๊คที่ปลูกในฤดูหนาว (การทดลองที่ 2.2) โดยที่การทดลองในฤดูฝน (การทดลองที่ 2.1) พบการเพิ่มขึ้นของโซเดียม 46 เปอร์เซ็นต์ เฉพาะในผักกาดหอมเรดโอ๊ค การเพิ่มขึ้นของโซเดียมนี้เป็นกลไกพื้นฐานของการทดแทนโพแทสเซียมโดยโซเดียม Tomemori *et al.* (2002) จากการทดลองของ Ogawa *et al*. (2012) พบว่าปริมาณโซเดียมและแมกนีเซียมในผักใบและมะเขือเทศเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดปริมาณโพแทสเซียม ซึ่งเป็นการชดเชยการลดลงของโพแทสเซียม และส่งผลให้ระดับโพแทสเซียมในส่วนผลของมะเขือเทศลดลง ในการศึกษานี้ยังพบว่า การงดให้โพแทสเซียมก่อนเก็บมะเขือเทศ 1 สัปดาห์ สามารถลดปริมาณโพแทสเซียมในมะเขือเทศลงได้ร้อยละ 45 เมื่อเปรียบเทียบกับการได้รับโพแทสเซียมตลอดการทดลอง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Tomemori *et al*. (2002) ที่พบว่าผักปวยเล้งที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีโพแทสเซียมต่ำจะดูดใช้โซเดียมสูงกว่าปวยเล้งที่ได้รับโพแทสเซียมในปริมาณปกติ ทั้งนี้ กนกพร และคณะ (2562) ได้รายงานว่า ผักกาดกวางตุ้ง ผักกวางตุ้งฮ่องเต้ ผักกาดเขียวปลี ผักกาดเขียวน้อย ผักกาดหอม และผักคะน้า ในกรรมวิธีที่งดให้โพแทสเซียมตั้งแต่เริ่มปลูกผักมีปริมาณมีปริมาณโซเดียมสูงกว่า 50 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม/น้ำหนักสด ซึ่งเป็นปริมาณที่สูง เกินกว่าที่กลุ่มผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังสามารถรับได้ในแต่ละวัน แม้ว่าจะมีปริมาณโพแทสเซียมต่ำกว่า 200 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด ทการสะสมโซเดียมในปริมาณที่สูงขึ้นดังกล่าวอาจส่งผลต่อโภชนาการของผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังได้เช่นกัน (กนกพร และคณะ, 2562)

บทที่ 6
สรุปผลการศึกษา

การศึกษาการผลิตผักลดปริมาณโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสในระบบไฮโดรโปนิกส์ แบบ DFT (Deep Flow Technique) ในโรงเรือน ทำการทดลองในพื้นที่ของสาขาวิชาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนมกราคม 2566 สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. การลดความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสารละลายธาตุอาหารจาก 0.3 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 เป็น 0.1 มิลลิโมลาร์ KH_2PO_4 และการลดความเข้มข้นโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารจาก 1 มิลลิโมลาร์ KCl เป็น 0.5 มิลลิโมลาร์ KCl ทำให้การสะสมฟอสฟอรัสหรือโพแทสเซียมในส่วนต้นลดลง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต และน้ำหนักสดต้นของผักกาดหอมกรีนโอ๊ค ทั้งนี้การลดความเข้มข้นของโพแทสเซียมมีผลทำให้ค่า SPAD มีค่าลดลง แต่การลดลงของฟอสฟอรัสไม่ได้รับผลกระทบ

2. การลดปริมาณทั้งฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหาร($P_{0.1}$-$K_{0.5}$) ส่งผลให้การสะสมโพแทสเซียม และฟอสฟอรัสในผักกาดหอมกรีนโอ๊ค และเรดโอ๊คลดลง รวมทั้งมีผลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของผักกาดหอมทั้ง 2 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับการได้รับฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในระดับเพียงพอ ($P_{0.3}$-$K_{1.0}$) ทั้งการทดลองที่ดำเนินการในฤดูฝน และฤดูหนาว โดยผลกระทบมีความแตกต่างกันในผักกาดหอมแต่ละชนิด และฤดูการทดลอง นอกจากนี้การได้รับทั้งฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในระดับที่ลดลง ทำให้เกิดการสะสมโซเดียมเพิ่มขึ้นในส่วนต้นของผักกาดหอมทั้งสองชนิดที่ปลูกในฤดูหนาว แต่ในการทดลองฤดูฝนพบการสะสมโซเดียมเพิ่มขึ้นเฉพาะในผักกาดหอมเรดโอ๊ค

3. การใช้สารละลายธาตุอาหารในกรรมวิธี $P_{0.1}$-$K_{1.0}$ ทำให้การสะสมธาตุฟอสฟอรัสลดลง และกรรมวิธี $P_{0.3}$-$K_{0.5}$ ทำให้โพแทสเซียมลดลง โดยการสะสมโซเดียมไม่เพิ่มขึ้น รวมทั้งไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมทั้งสองพันธุ์ในทั้งสองฤดูปลูก

4. ผลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตผักที่มีฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่ำสำหรับผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังได้ เพื่อให้ผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังสามารถบริโภคผักสด เป็นทางเลือกในการรับประทานผัก โดยจำเป็นต้องทำการศึกษาหาวิธีการจัดการและการลดปริมาณโซเดียมให้ได้ผักที่มีการสะสมโซเดียมในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ป่วยโรคไต

บรรณานุกรม

กนกพร มานันตพงศ์, ศิริรัตน์ อนุตระกูลชัย, รัฐพล ไกรกลาง, พรทิวา กัญยวงศ์หา และอนงนาฏ ศรีประโชติ. 2562. การลดปริมาณโพแทสเซียมในผักที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรพอนิกส์. **วารสารดินและปุ๋ย**, 41(2), 26-35.

กนกพร มานันตพงศ์ อนงนาฏ ศรีประโชติ ศิริรัตน์ อนุตระกูลชัย รัฐพล ไกรกลาง และพรทิวา กัญยวงศ์หา. 2565. ผลของการลดปริมาณโพแทสเซียมต่อคุณภาพผลผลิตมะเขือเทศเชอรี่ที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์. **วารสารแก่นเกษตร**, 50(4), 1006-1018.

กรมวิชาการเกษตร. 2551. **พระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550**. กรุงเทพฯ.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2558. **การปลูกผักไฮโดรโปนิกส์**. กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.

กานต์พิชชา ปัญญา. 2555. **ผลของไอโอเดตและไอโอไดด์ต่อผลผลิตและคุณภาพของผักคะน้า และผักกาดฮ่องเต้ที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกส์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร มหาวิทยาลัยพะเยา.

ขนิษฐา สมตระกูล และวราภรณ์ ฉุยฉาย. 2563. การขาดฟอสฟอรัสในพืชกับบทบาทของแบคทีเรียที่มีความสามารถในการละลายฟอสเฟต. **วารสารเกษตร**. การวิจัยและการส่งเสริม, 38(3), 39-49

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 547 น.

จันทร์ธิรา ดวงจันทร์ และศิริพรรณ บรรหาร. 2559. ผลของเกลือโซเดียมคลอไรด์ต่อการเจริญเติบโต ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ ปริมาณโพรลีน และกิจกรรม ของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส ในถั่วเหลือง. **วารสารวิทยาศาสตร์คชสาส์น**, 38(2), 36-49.

ชวลิต รัตนกุล. 2561. อาหารบำบัดในผู้ป่วยโรคไตเรื้อรังระยะก่อนฟอกเลือด. **วารสารโภชนบำบัด**, 26(1), 22-34.

ณัฐพล เลาหเจริญยศ. 2557a. **อาหารและโพแทสเซียม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://sriphat.med.cmu.ac.th/th/knowledge-62 (24 มีนาคม 2565).

---. 2557b. **อาหารและฟอสฟอรัส**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://sriphat.med.cmu.ac.th/th/knowledge-63 (24 มีนาคม 2565).

ณัฐิกา สุทธิประสิทธ์ และธีระวัฒน์ จันทึก. 2559. การวิเคราะห์ต้นทุนและความอ่อนไหวของธุรกิจการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ ในเขตกรุงเทพมหานคร. **วารสารอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร**,

1627-1638.

ดิเรก ทองอร่าม. 2547. **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน**. ธรรมรักษ์การพิมพ์, ราชบุรี. 724 น.

---. 2550. **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน: หลักการจัดการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: พิมพ์ดีการพิมพ์.

ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์. 2534. **ปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน**. เล่มที่ 8, พิมพ์ครั้งที่ 1. พรานนกการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ทศพร บ่อบัวทอง, เนตรนภา อินสลุด, วิชญ์ภาส สังพาลี และ จุฑามาศ อาจนาเสียว. 2560. ผลของระดับฟอสฟอรัสต่อการพัฒนาระบบรากข้าว. **วารสารแก่นเกษตร**, 45(1), 997-1002.

นงลักษณ์ ปูรณพงศ์. 2548. **คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช**. มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.

นพดล เรียบเลิศหิรัญ. 2550. **การปลูกพืชไม่ใช้ดิน**. สำนักพิมพ์สุวีริยาสาส์น, กรุงเทพฯ.

นพมาศ สุนทรเจริญนนท์. 2556. **บทความเผยแพร่ความรู้สู่ประชาชน ผักผลไม้.ที่ควรระวังในผู้ป่วยโรคเรื้อรัง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/141/%E0%B8%9C%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B8%9C%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%9B%E0%B9%88%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B9%82%E0%B8%A3%E0%B8%84%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%87/ (24 มีนาคม 2565).

ปริมประภา ก้อนแก้ว และปัทมา สุพรรณกุล. 2562. พฤติกรรมเสี่ยงต่อการเกิดโรคไตเรื้อรัง: มุมมองของผู้ป่วยโรคไตเรื้อรัง. **วารสารสาธารณสุขไทย**, 49(3), 313-324.

ปุญญิศา ตระกูลยิ่งเจริญ, กุมุท สังขศิลา และธวัชชัย อินทร์บุญช่วย. 2562. โปรแกรมคอมพิวเตอร์กำหนดปุ๋ยสำหรับการปลูกอ้อยที่ให้ผลผลิตสูง. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ภายใต้โครงการ การประยุกต์ข้อมูลจากแผนที่ดินเพื่อเพิ่มผลผลิต อ้อยด้วยเทคโนโลยีเกษตรแม่นยำ**. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรม.

ภิญญาพร นิยมโชค. 2552. **การปลูกผักไฮโดรโปนิกส์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://sites.com (3 พฤษภาคม2565).

มัฆวาล หอสุวรรณ. 2557. **คู่มือการปลูกพืชไร้ดิน**. ศูนย์เกษตรกรรมบางไทร จำกัด.

มลฑา สมบุญตนนท์, เออวดี เปรมัษเฐียร และกาญจนา ศรีพฤทธิ์เกียรติ. 2561. การดำเนินงานและส่วนเหลื่อมทางการตลาดของห่วงโซ่อุปทานผักไฮโดรโปนิกส์. **วารสารปัญญาภิวัฒน์**, 11(2), 147-161.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2559. ความเครียดของพืชและการ บรรเทาความเครียด. **วารสารดินและปุ๋ย**, 38, 47-78.

---. 2558. **ธาตุอาหารพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.

---. 2552. **ธาตุอาหารพืช**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร: กรุงเทพมหานคร.

เยาวพา จิระเกียรติกุล และนิสา แซ่ลิ้ม. 2552. การเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์ Red Oak ที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ด้วยสารละลายสูตรต่าง ๆ. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 17(2), 81-88.

วนายุทธ์ แสนเงิน, พิชชากร ไชยะเดชะ, สมมาต แสงงาม และสุรพงษ์ ธุรี. 2564. **การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับปรับสภาพแวดล้อมเพาะปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ด้วยพีแอลซี**.

วรพรรณ กรานกูล และวศิริปะภา ภูมมา. 2561. **ผลของสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกันต่อการเจริญเติบโตของผักสลัด พันธุ์กรีนโอ๊คและพันธุ์เรดโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ (เทคโนโลยีการผลิตพืช) คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

วรากร สังข์กระแสร์, ธรรมชาติ กลิ่นเกษร และ เสกสรรค์ มธุลาภรังสรรค์. (2558). **ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการปลูกผักสลัดบนระบบไฮโดรโปนิกส์ แบบ NFT**. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์เกษตรกรรมบางไทร. (2558). **ปัญหาและแนวคิดการปลูกพืชไร้ดินเชิงธุรกิจในประเทศไทย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.bangsaiagro.com (29 พฤศจิกายน 2565).

สกรณ์ บุษบง, อมรเพชร ตลับทอง และวราวุธ จอสูงเนิน. 2563. การพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยสมองกลฝังตัวผ่าน NETPIE. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 4(1), 61-71.

สมศักดิ์ ฉิมมา สายชล สุขญาณกิจ สิริวรรณ สมิทธิอาภรณ์ โสภิดา จิวประเสริฐ และธนวรรณ พาณิชพัฒน์. 2563. การตอบสนองด้านการเจริญเติบโต และผลผลิตของแตงกวาลูกผสมต่อปุ๋ยฟอสฟอรัส. **วารสาร Thai Journal of Science and Technology**, 9(2), 276-286.

สุภกิจ ไชยพุฒ. 2552. **ผลของระดับธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตของคะน้าจีนที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโพนิกส์**. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต(เกษตรศาสตร์) สาขาวิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

โสระยา ร่วมรังษี. 2548. **การผลิตพืชสวนแบบไม่ใช้ดิน**. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 122 น.

อริสรา ผาสุข, ประสิทธิ์ ชุติชูเดช และเบ็ญจวรรณ ชุติชูเดช. 2562. การเจริญเติบโต ผลผลิตและปริมาณการสะสมไนเตรทในผักสลัด 5 พันธุ์ ที่ปลูกภายใต้ระบบไฮโดรโปนิกส. **วารสารวิทยาศาสตร์**

และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 38(4), 391-401.

อาพา คำวงษา. 2553. **แนวทางการผลิตและลงทุนผักไฮโดรโปนิกส์เพื่อทำเงิน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://library.baac.or.th/main/ (2 พฤษภาคม.2565).

อารีรัตน์ ชำนาญ, ศิริลักษณ์ กิจศรีไพศาล และอดิศว์ ทัศณรงค์. 2564. ผลของโปรแกรมการจัดการตนเองของบุคคลและครอบครัวต่อพฤติกรรม ความร่วมมือในการควบคุมฟอสฟอรัสและผลคูณแคลเซียมและ ฟอสฟอรัสในผู้ป่วยที่ฟอกเลือดด้วยเครื่องไตเทียม. **วารสารสภาการพยาบาลและการผดุงครรภ์แห่งประเทศไทย**, 36 (2), 49-65.

อุปถัมภ์ ศุภสินธุ์. 2551. **ฟอสฟอรัส**. มูลนิธิโรคไตแห่งประเทศไทย, 22(43), 27-31

Adams, P. 2002. Nutritional control in hydroponics. In: Savvas, D., Passam, H. C. (Eds.),Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. **Embryo Publications, Athens**, Greece, pp. 211–261.

Brophy, D.F. 2014. Disorders of Potassium and Magnesium Homeostasis. Pharmacotherapy: A patho physiologic approach. **The McGraw-Hill Companies**, (9), 783-796.

Cui, J., I. Pottosin, E. Lamade and G. Tcherkez. 2020. What is the role of putrescine accumulated under potassium deficiency. **Plant, Cell & Environment**, 43, 1331-1347.

Diem, B. and D.L. Godnold. 1993. Potassium, calcium and magnesium antagonism inclones of *Populus trichocarpa*. **Plant Soil**, 155, 411–414.

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. **Agron. J**, 9: 1-12.

Germano, R.P., S. Melito, S. Cacini, G. Carmassi, F. Leoni, R. Maggini, F.F. Montesano, A. Pardossi and D. Massa. 2022. Sweet basil can be grown hydroponically at low phosphorus and high sodium chloride concentration: Effect on plant and nutrient solution management. **Scientia Horticulturae**, 304, 111324.

Ghourab, M.H.H., O.M.M. Wassel and N.A.A. Raya. 2000. Response of cotton plant to foliar application of (Pottas in-P) TM under two levels of nitrogen fertilizer. **Egyptian Journal of Agricultural Research,** 78, 781-793.

Hafsi, C., A. Lakhdar, A. Debez and C. Abdelly. 2011. Differential responses in potassium absorption and use efficiencies in the halophytes catapodium rigidum and hordeum maritimum to various potassium concentrations in the medium. **Plant Production Science**, 14, 135-140.

Hasanuzzaman, M., M.H.M. Borhannuddin Bhuyan, K. Nahar, Md.S. Hossain, J. Al. Mahmud, Md. S. Hossen, A. A.C. Masud, Moumita and M. Fujita. 2018. Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. **Agronomy**, 8, 1-29.

Hoagland, D. R and Arnon, D. I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Circ. Calif. **Agric.Exp**. Stn 347, 1–32.

Ingle, K.P. and D.A. Padole. 2017. Phosphate solubilizing microbes: an overview. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, 6(1), 844-852.

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, 213.

Marek, S., A. Soukup and E. Tylova. 2019. Potassium in root growth and development. **Plants**, 8(435).

Mengel, K. and E.A. Kirkby. 2001. Principles of Plant Nutrition, 5th (ed). Kluwer Acad. Publishers, **Dordrecht**, 849 p.

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 KNO_3 management of hydroponics. **The Horticulture Journal**, 86(1), 26-36.

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.

Niu, F., D. Zhang, Z. Li, M.W. Van lersel and P. Alem. 2015. Morphological response of eucalypts seedlings to phosphorus supply through hydroponic system. **Scientia Horticulturae**, 194, 295-303.

Ogawa, A., S. Taguchi and C. Kawachima. 2007. A cultivation of spinach with low potassium content for patients on dialsis. **Jpn. J. Crop Sci,** 76(2), 232-237.

Ogawa, A., T. Eguchi, and K. Toyofuku. 2012. Cultivation method for leafy vegetable and tomatoes with low potassium content dialysis patients. Environ. **Control Biol**, 50(4), 407-414.

Onthong, J. and M. Osaki. 2006. Adaptations of tropical plants to acid soils. **Tropics**, 15(4), 337-347.

Patil, R.B. 2011. Role of potassium humate on growth and yield of soybean and black gram. **International Journal of Pharma and Bio sciences**, 2, 242-246.

Peret, B., M. Clément, L. Nussaume and T. Desnos. 2011. Root developmental adaptation to phosphate starvation: better safe than sorry. **Trends in Plant Science**, 16(8), 442-450.

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 Carlton**, (10), 177-230.

Prajapati, K. and H.A. Modi. 2012 The importanceof potassium in plant growth – A review. **Indian Journal of Plant Sciences**, 1:177-186.

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.

Putcha, N and Allon, M. 2007. Management of Hyperkalemia in Dialysis Patients. **Seminars in dialysis**, 20(5), 431-439.

Romheld, V. and E.A. Kirkby. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, 335, 155–180.

Satyaprakash, M., T. Nikitha, E.U.B. Reddi, B. Sadhana and S.S. Vani. 2017. Phosphorus and phosphate solubilizing bacteria and their role in plant nutrition. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences,** 6(4), 2133-2144.

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.

Smil, V. 1999. Crop residues: Agriculture's largest harvest: Crop residues incorporate more than half of the world's agricultural phytomass. **BioScience**, 49, 299–308.

Singh, V.K., B.S. Dwivedi, R.J. Buresh, M.L. Jat, K. Majumdar, B. Gangwar, V. Govil and S.K.

Singh. 2013. Potassium fertilization in rice–wheat system across Northern India: Crop performance and soil nutrients. **Agronomy Journal**, 105, 471–481.

Steiner, A.A. 1980. The selective capacity of plants for ions and its improve for the composition and treatment of the nutrient solution, **Acta Horticulturae**, 98, pp. 87-97.

Stone, M. and C. Weaver. 2021. **Improving Human Nutrition: A Critical Objective for Potassium Recommendations for Agricultural Crops**, **pp. 417-445**. In: T.S. Murrell et al. (eds.) Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crop. Springer.

Thomas, T.C. and A.C. Thomas. 2009. Vital role of potassium in the osmotic mechanism of stomata aperture modulation and its link with potassium deficiency. **Plant Signal Behavior**, 4, 240–243.

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.

Viera, A.J. and N. Wouk. 2015. Potassium Disorders: Hypokalemia and Hyperkalemia. **Am Fam Physician**, 92(6), 487-495.

Wakeel, A., M. Farooq, M. Qadir and S. Schubert. 2011. Potassium substitution by sodium in plants. **Critical Reviews in Plant Science**, 30(4), 401–413.

Woldemariam, S.H., S. Lal, D.Z. Zelelew and M.T. Solomon. 2018. Effect of potassium levels on productivity and fruit quality of tomato (Lycopersicon esculentum L.). **Journal of Agricultural Studies**, 6, 105-117.

Wang, M., Q. Zheng, Q. Shen and S. Guo. 2013. The Critical Role of Potassium in Plant Stress Response. **International Journal of Molecular Sciences**, 14, 7370-7390.

Wulff, F., V. Schulz, A. Jungk and N. Claassen. 1998. Potassium fertilization on sandy soils in relation to soil test, crop yield and K-leaching. **Z Pflanzenernaehr Bodenkd**, 161, 591–599.

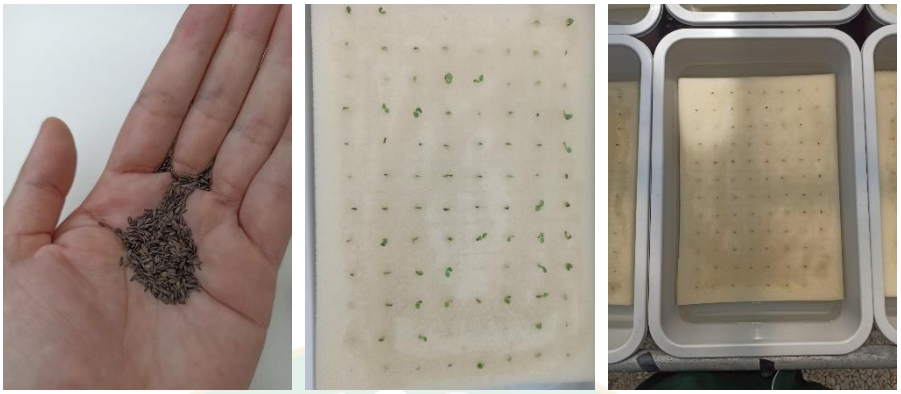
Xu, H., M. Johkan, S. Tsukagoshi, and T. Maruo. 2021. Effect of nutrient quantitative management on potassium and sodium concentration in low-potassium lettuce.

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. **Russian Journal of Plant Physiology**, 67(1), 175-184.

Zhang, F.S., J. Ma and Y.P. Cao. 1997. Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (Raghanus sativus L.) and rape (Brassica napus L.) plants. **Plant and Soil**, 196(2), 261-264.

ภาคผนวก



ภาพภาคผนวก 1 เพาะเมล็ดผักกาดหอม

ภาพภาคผนวก 2 เตรียมถังพลาสติกสำหรับปลูกผัก วัดค่าความเป็นกรดด่าง(pH) และค่าการนำไฟฟ้า(EC)

ภาพภาคผนวก 3 เตรียมต้นกล้าและปลูกตามวิธีการทดลอง

ภาพภาคผนวก 4 เก็บข้อมูล ความกว้าง ความสูง ความยาวราก จำนวนใบ และวัดค่า SPAD

ภาพภาคผนวก 5 ต้นผักกาดหอมกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค อายุ 42 วัน

ภาพภาคผนวก 6 เก็บเกี่ยวผลผลิตผักกาดหอม

ภาพภาคผนวก 7 ชั่งน้ำหนักสดต้นและราก

ภาพภาคผนวก 8 ชั่งตัวอย่างพืชและย่อยตัวอย่างพืช

ภาพภาคผนวก 9 วิเคราะห์ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโซเดียม

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	รุจิรา ตะดิ
เกิดเมื่อ	21 เมษายน 2536
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาตอยปลาย โรงเรียนเชียงดาววิทยาคม
	ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน	สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง