การชะล้าง และการสะสมไนเตรทในพืชที่ปลูกในระบบการปลูกพืชไม่ใช้ดิน และการวัดปริมาณไนเตรทด้วยไนเตรทเซ็นเซอร์

นางสาวนิศารัตน์ ไขนอก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

NITRATE LEACHING AND ACCUMULATION IN PLANT GROWN UNDER SOILLESS CULTURE SYSTEM AND MEASUREMENT BY NITRATE SENSOR

Nisarat Kainok

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science Program in Crop Science

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การชะล้าง และการสะสมไนเตรทในพืชที่ปลูกในระบบการปลูกพืชไม่ใช้ดิน และการวัดปริมาณไนเตรทด้วยไนเตรทเซ็นเซอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ฐิติพร มะชิโกวา)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.สุดชล วุ้นประเสริฐ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.แหวนพลอย จินากูล)
กรรมการ

(ดร.โอภาส ตรีทวีศักดิ์)
กรรมการ

(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(ศ. ดร.หนึ่ง เตียอำรุง)
คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นิศารัตน์ ไขนอก : การชะล้าง และการสะสมไนเตรทในพืชที่ปลูกในระบบการปลูกพืชไม่ใช้ดิน และการวัดปริมาณไนเตรทด้วยไนเตรทเซ็นเซอร์ (NITRATE LEACHING AND ACCUMULATION IN PLANT GROWN UNDER SOILLESS CULTURE SYSTEM AND MEASUREMENT BY NITRATE SENSOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดชล วุ้นประเสริฐ, 89 หน้า.

ไนเตรทเป็นธาตุอาหารประจุลบของไนโตรเจน ซึ่งพืชมีความต้องการสูง ไนเตรทมักจะสูญเสียได้ง่ายจากการชะล้าง และอาจมีการปนเปื้อนในสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาผลของสูตรธาตุอาหาร วัสดุปลูก การเจริญเติบโต ระดับการให้น้ำต่อการชะล้าง และการสะสมไนเตรทในผลผลิต และเปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาณไนเตรทโดยใช้วิธีทางเคมี และเซนเซอร์ โดยมีการทดลอง 4 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก วางแผนการทดลองแบบ Complete Random Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ 4 กรรมวิธี คือ สูตรธาตุอาหาร 4 ชนิด ดังนี้ 1) ธาตุอาหารทางน้ำสูตรที่ 1 (N ต่ำ) 2) ธาตุอาหารทางน้ำสูตรที่ 2 (N สูง) 3) ธาตุอาหารทางดินสูตรที่ 1 (N ต่ำ) และ 4) ธาตุอาหารทางดินสูตรที่ 2 (N สูง) ผลการทดลองพบว่าสูตรธาตุอาหารที่ต่างกัน มีผลต่อการชะล้างไนเตรทโดยธาตุอาหารทางน้ำมีการชะล้างไนเตรทสูงกว่าธาตุอาหารทางดิน การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก ระดับการให้น้ำต่อการชะล้าง และการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม วางแผนแบบ split- plot ใน CRD จำนวน 3 ซ้ำ main plot คือ สูตรธาตุอาหาร 2 สูตร คือ 1) ธาตุอาหารสูตรที่ 1 (N ต่ำ) และ 2) ธาตุอาหารสูตรที่ 2 (N สูง) sub plot คือ วัสดุปลูก 4 ชนิด คือ 1) ขุยมะพร้าวผสมทราย 1:1 2) ขุยมะพร้าวผสมทราย 3:1 3) ขุยมะพร้าวผสมทราย 5:1 และ 4) ดินปลูก โดยมีการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำของวัสดุปลูกที่ 10% และ 30% ผลการทดลองพบว่าสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันไม่ทำให้การชะล้างไนเตรทแตกต่างกันในช่วง 2 สัปดาห์แรก แต่ในช่วงสัปดาห์ที่ 3 และ 4 พบว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 มีการชะล้างไนเตรทมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 1 และปริมาณไนโตรเจนในใบ พบว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 มีปริมาณไนโตรเจนในใบมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 1 แต่มีปริมาณไนเตรทในใบไม่แตกต่างกัน โดยวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1 มีปริมาณการชะล้างไนเตรทสูงที่สุด 3 สัปดาห์หลังปลูก ในขณะที่ดินปลูก ทำให้มีปริมาณไนโตรเจนในใบต่ำที่สุด แต่พบว่าปริมาณไนเตรทในใบสูงที่สุด การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้นต่อการสะสมไนเตรทในผักกาดหอมที่ปลูกในระบบ Deep Flow Technique (DFT) วางแผนแบบ factorial ใน Completely Randomize Block Design (RCBD) จำนวน 3 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 คือ สูตรธาตุอาหาร 2 สูตร ได้แก่ 1) ธาตุอาหารสูตรที่ 1 (N ต่ำ) และ 2) ธาตุอาหารสูตรที่ 2 (N สูง) และปัจจัยที่ 2 คือ ความเข้มข้นธาตุอาหาร (Electrical

Conductivity, EC) 2 ระดับ ได้แก่ 1) EC 1.5 mS/cm และ 2) EC 2.0 mS/cm พบว่าสูตรธาตุอาหารและค่าความเข้มข้น EC ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณไนโตรเจนในใบ และการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม และพบว่าในระบบ DFT มีการสะสมไนเตรทในใบสูงกว่าการปลูกในวัสดุปลูก และการทดลองที่ 4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมีและไนเตรทเซ็นเซอร์ ซึ่งได้นำข้อมูลจากการทดลองที่ 1 ที่มีจำนวน 12 ตัวอย่าง ทำการวัดตลอดระยะเวลา 7 สัปดาห์ และการทดลองที่ 2 ที่มีจำนวน 48 ตัวอย่าง แบ่งช่วงลำดับการวัดตัวอย่างโดยทำการวัดตลอดระยะเวลา 4 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าการใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ในการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยมีความแม่นยำในตลอดการวัดทั้ง 7 สัปดาห์ แต่เมื่อมีการวัดตัวอย่างในจำนวนมาก (การทดลองที่ 2) พบว่าการใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ในการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายมีความแม่นยำในระยะแรกของการวัด และความแม่นยำในการวัดจะลดลงเมื่อมีจำนวนตัวอย่างเพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช ลายมือชื่อนักศึกษา ชิศโรตน์ ไชยอก

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

NISARAT KAINOK : NITRATE LEACHING AND ACCUMULATION IN PLANT GROWN UNDER SOILLESS CULTURE SYSTEM AND MEASUREMENT BY NITRATE SENSOR : ASST. PROF. SODCHOL WONPRASAID, Ph.D., 89 PP.

LETTUCE/NITRATE/NUTRIENT/LEACHING/SENSOR/NITRATE SENSOR

Nitrate is an anion of nitrogen that plants need and absorb most for growth. It is easily lost from leaching which can pollute the environment and groundwater. Four experiments were conducted to study the effects of nutrient formulas, substrates, levels of water supply on nitrate leaching and accumulation in crop product, and to compare the methods of nitrate measurement between chemical and nitrate sensor. The first experiment studied the effects of different nutrient formulas on nitrate leaching in strawberries using CRD with 3 replications and 4 treatments: 1) liquid fertilizer formula 1 (low N); 2) liquid fertilizer formula 2 (high N); 3) solid fertilizer formula 1 (low N); and 4) solid fertilizer formula 2 (high N). The results showed that each nutrient formulas affected nitrate leaching differently. Using liquid fertilizer resulted in higher nitrate leaching than applying solid fertilizer. The second experiment aimed to study the effects of nutrient formulas, substrates and levels of water supply on nitrate leaching and nitrate accumulation in lettuce. The experimental design was split plot in CRD with 3 replications. The main plots included 2 nutrient formulas: 1) formula 1 (low N) and 2) formula 2 (high N). The subplots consisted of 4 culture substrates: 1) coir dust: sand (1:1); 2) coir dust: sand (3:1); 3) coir dust: sand (5:1) and 4) pot soil. There were two water application levels of 10% and 30% over the substrate water holding capacity. The results showed that the effects of nutrient formulas

on nitrate leaching were not significantly different in weeks 1 and 2, but in weeks 3 and 4, fertilizer formula 2 resulted in higher nitrate leaching than formula 1. Moreover, fertilizer formula 2 had greater nitrogen accumulation in leaves when compared with formula 1, but nitrate accumulation were not significantly different between the fertilizer formulas. The results also indicated that the substrate coir dust: sand (1:1) caused the highest nitrate leaching while the pot soil had the lowest nitrogen accumulation, but had the highest nitrate accumulation. In the third experiment, the effects of the nutrient formulas and their concentrations on nitrate accumulation in lettuce under the DFT system were studied. The experimental design was factorial in RCBD with 3 replications. Factor 1 included 2 nutrient formulas: 1) formula 1 (low N) and 2) formula 2 (high N). Factor 2 consisted of 2 levels of fertilizer concentration: 1) EC 1.5 mS/cm and 2) EC 2.0 mS/cm. The result showed that there was no significant effect from nutrient formulas and fertilizer concentrations on nitrogen and nitrate accumulation. However leaf nitrate accumulation under the DFT system was more than those under the substrate system. The fourth experiment aimed to study the relationship between nitrate measurement by the chemical method and nitrate sensor. The results found that nitrate measurement by sensor with few samples produced the precise values with the chemical method throughout the 7–week period. However, when there were many samples the sensor was able to give the precise results with the chemical method only at the beginning of the measurement (less than 10 samples). When the sensor was used to measure many samples (more than 10 samples) the precision decreased.

School of Crop Production Technology Student's Signature Nisarat Kainok

Academic Year 2017 Advisor's Signature S. Wongpraseid

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุลวงไปด้วยดี ผู้ช่วยวิจัยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดชล วุ้นประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ดร.โอภาส ตรีทวีศักดิ์ และคุณวรพันธุ์ ไชยศรีรัตนากูล ผู้ประดิษฐ์ในเตรทเซ็นเซอร์ ที่กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา และช่วยแก้ปัญหา แก่ผู้วิจัยมาตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณนวลปรางค์ อุทัยดา คุณสมยง พิมพ์พรม และคุณสหรัฐ นภากาศ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณอุทัย ยศจังหรีด คุณขนิษฐา กู่โบราณ และเจ้าหน้าที่ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนการปฏิบัติงานในแปลงทดลอง

ขอขอบคุณ พี่น้องบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืชทุกท่าน ที่ช่วยเหลือในด้านต่างๆให้การปฏิบัติงานเป็นไปได้ด้วยดี ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มอบทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษา

สำหรับคุณงานความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประกบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัยมาตลอด จนทำให้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นิศารัตน์ ไขนอก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ซ

สารบัญภาพ ..... ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฑ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2

2. ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 ธาตุไนโตรเจน 3

2.2 แอมโมเนียม และไนเตรทในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช 3

2.3 ไนเตรทกับการนำไปใช้ของพืช 4

2.4 การสูญเสียของไนโตรเจนในดิน 4

2.5 สาเหตุการชะล้างไนเตรท และการป้องกัน 5

2.6 ไนเตรทในสิ่งแวดล้อม 5

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมปริมาณไนเตรทในพืช 6

2.8 อันตรายจากการบริโภคอาหารที่ปนเปื้อนสารไนเตรท 8

2.9 การปลูกพืชไร้ดิน (soilless culture) 9

2.10 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท 13

2.11 เซนเซอร์ (sensor) 14

2.12 ผักกาดหอม 17

2.13 สตรอว์เบอร์รี 18

โรงวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11 เซนเซอร์ (sensor) 14
2.12 ผักกาดหอม 17
2.13 สตรอว์เบอร์รี 18
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย 19
3.1 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก 19
3.2 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้างและการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม 21
3.3 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้นต่อการสะสมไนเตรทในผักกาดหอมที่ปลูกในระบบ Deep Flow Technique (DFT) 24
3.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์ 25
4. ผลการทดลอง และอภิปรายผล 27
4.1 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก 27
4.2 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้างและการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม 28
4.3 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้นต่อการสะสมไนเตรทในผักกาดหอมที่ปลูกในระบบ Deep Flow Technique (DFT) 50
4.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์ 57
5. บทสรุป 61
รายการอ้างอิง 62
ภาคผนวก 70
ประวัติผู้เขียน 89

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

หน้า

1 ค่าสูงสุดของปริมาณไนเตรทที่ยอมให้มีได้ในพืชผัก 8
2 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก 19
3 สูตรปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยอินทรีย์เคมี 19
4 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกผัก 22
5 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ในระบบ DFT ต่อการเจริญเติบโต ของผักกาดหอม 52
6 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ในระบบ DFT ต่อการเจริญเติบโต ของผักกาดหอม 53
7 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ในระบบ DFT ต่อปริมาณไนโตรเจน และไนเตรทในใบผักกาดหอม 55
8 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในวัสดุปลูก และระบบ DFT 56
9 เปรียบเทียบการเจริญเติบโต ปริมาณไนโตรเจน และไนเตรทในใบของผักกาดหอม ที่ปลูกในวัสดุปลูก และระบบ DFT 56
10 ความสัมพันธ์วิธีการวัดไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์ จากการวัดจำนวน 12 ตัวอย่างในสัปดาห์ที่ 1-7 58
11 ความสัมพันธ์วิธีการวัดไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์ จากการวัดจำนวน 48 ตัวอย่างในสัปดาห์ที่ 1-4 60

ตารางภาคผนวก ข

1 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก สัปดาห์ที่ 1-4 75
2 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก สัปดาห์ที่ 5-7 75
3 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อความสูงทรงพุ่มของ ผักกาดหอม 76

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

4 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอม 77

5 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อจำนวนใบของผักกาดหอม 78

6 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อพื้นที่ใบของผักกาดหอม 79

7 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อน้ำหนักสดต้นของผักกาดหอม 80

8 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อน้ำหนักแห้งต้นของผักกาดหอม 81

9 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อปริมาณไนโตรเจนในใบของผักกาดหอมหลังครบอายุการเก็บเกี่ยว 82

10 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการสะสมไนเตรทในใบของผักกาดหอม 83

11 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 1 84

12 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 2 85

13 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 3 86

14 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 4 87

15 ผลของสูตรธาตุอาหาร วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อเปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายจากการชะล้างธาตุอาหาร 88

สารบัญภาพ

รูปที่ **หน้า**

1 โครงสร้างของอุปกรณ์ ISFET 16
2 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำที่ได้จากการชะล้างต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน ทั้ง 7 สัปดาห์ 28
3 ความสูงทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 29
4 ความสูงทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 29
5 ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 30
6 ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 31
7 จำนวนใบของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 32
8 จำนวนใบของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 32
9 พื้นที่ใบของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 33
10 พื้นที่ใบของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 34
11 น้ำหนักสดต้นของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 35
12 น้ำหนักสดต้นของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 35
13 น้ำหนักแห้งต้นของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 36

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

14 น้ำหนักแห้งต้นของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 37
15 ปริมาณไนโตรเจนในใบหลังการเก็บเกี่ยวจากการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 39
16 ปริมาณไนโตรเจนในใบหลังการเก็บเกี่ยวจากการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 40
17 ปริมาณการสะสมไนเตรทในใบจากการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 41
18 ปริมาณการสะสมไนเตรทในใบจากการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 42
19 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 1....44
20 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 1....45
21 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 2....45
22 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 2....46
23 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 3....46
24 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 3....47
25 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 4....47
26 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน
และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% และ 30% ในสัปดาห์ที่ 4 48

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

27 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 49
28 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% 50
29 ความสัมพันธ์การวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายด้วยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์ เฉลี่ยใน 7 สัปดาห์ 58

ภาพผนวก

1 การวัดความสูงของลำต้นผักกาดหอม 71
2 การวัดความกว้างทรงพุ่มผักกาดหอม 71
3 ไนเตรทเซ็นเซอร์ 72
4 การวัดปริมาณไนเตรทโดยใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ 72
5 ตัวอย่างน้ำที่ได้จากการชะล้างจากวัสดุปลูกทั้ง 4 สัปดาห์ 73
6 ตัวอย่างน้ำที่ได้จากการชะล้างจากวัสดุปลูก 4 ชนิดในสัปดาห์ที่ 2 73

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

$^{\circ}C$	=	องศาเซลเซียส
N	=	ไนโตรเจน
NO_3^-	=	ไนเตรท
NH_4^+	=	แอมโมเนียม
K	=	โพแทสเซียม
Ca	=	แคลเซียม
Mg	=	แมกนีเซียม
KNO_3	=	โพแทสเซียมไนเตรท
NaCl	=	โซเดียมคลอไรด์
H_2SO_4	=	กรดซัลฟิวริก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ไนเตรทเป็นรูปของธาตุไนโตรเจนที่พืชมีความต้องการ และนำไปใช้มากที่สุดในการสร้างการเจริญเติบโต (ชนะวัฒน์ เทียมบุญประเสริฐ, 2550) เช่น จากปุ๋ยไนโตรเจนที่เกษตรกรนิยมใช้ในการปลูกผักเศรษฐกิจ โดยเฉพาะแอมโมเนียมซัลเฟต และยูเรีย ไนเตรทเป็นสารอนินทรีย์ที่เปลี่ยนรูปมาจากสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งไนเตรทเป็นอนุมูลเคมีที่มีประจุลบจึงถูกดินดูดซับไว้ได้น้อย ทำให้ไนเตรทในดินเป็นอิสระ และสามารถเคลื่อนที่ไปกับน้ำได้ง่าย ทำให้ไนเตรทถูกน้ำที่ซึมผ่านดินชะไปสู่น้ำใต้ดินได้ง่าย (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2548) และไนเตรทยังก่อให้เกิดการสะสมในผลผลิตพืชผักด้วย การบริโภคน้ำ และอาหารที่มีปริมาณไนเตรทปนเปื้อนอยู่สูงก่อให้เกิดอันตรายจากโรคเม็ตฮีโมโกลบิเมีย (Methemoglobinemia) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตในเด็กทารกที่มีอายุต่ำกว่า 3 เดือน นอกจากนี้แล้วไนเตรท และไนไตรท์มีส่วนร่วมในการสร้างสารประกอบคาร์สิโนเจนซึ่งสามารถชักนำให้เกิดมะเร็งกระเพาะอาหารในคนได้ (Bruning-Fann and Kaneene, 1993; Alaburda and Nishihara, 1998) ดังนั้นการบริโภคผักที่มีปริมาณไนเตรทสะสมสูง จึงมีแนวโน้มที่สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้เช่นเดียวกัน ซึ่งผู้ผลิตควรจะคำนึงถึงปริมาณการสะสมไนเตรทในผลผลิตพืชไม่ให้เกินค่ามาตรฐานกำหนด และเพื่อความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ปัจจุบันการผลิตผักในระบบปลูกโดยไม่ใช้ดินได้รับความนิยมสูง ทั้งวัสดุปลูก และในสารละลาย โดยระบบเปิดคือ การปลูกในวัสดุปลูก และรดด้วยสารละลายปุ๋ย ให้เกินความสามารถของการอุ้มน้ำของวัสดุปลูก 10-30% เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของธาตุอาหารจนเป็นอันตรายต่อผักที่ปลูก แต่ทำให้เกิดการชะล้างของธาตุอาหารต่างๆ ออกมามากน้อยแตกต่างกัน เช่น วัสดุปลูกขุยมะพร้าวมีข้อดี คือ มีน้ำหนักเบา อุ้มน้ำได้ดี ข้อเสีย คือ การถ่ายเทน้ำ และอากาศไม่สะดวก (วิทยา สุริยาภณานนท์, 2524; สมเพียร เกษมทรัพย์, 2525) ส่วนทรายมีข้อดี คือ หาง่าย ราคาถูก ระบายน้ำได้ดี (สนั่น ขำเลิศ, 2522; Douglas, 1988) ข้อเสีย คือ มีน้ำหนักมาก อุ้มน้ำ และเก็บสะสมธาตุอาหารได้น้อย (ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และสรสิทธิ์ วัชโรทยาน, 2531)

ไนเตรทที่ผักดูดใช้ส่วนใหญ่ ถูกสังเคราะห์เป็นอะมิโนแอซิด และโปรตีน แต่ถ้ามีการดูดเข้าไปมากเกิน หรือสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์อะมิโนแอซิด ไนเตรทจะมีการสะสมอยู่ในใบผักเป็นปริมาณมากได้ โดยวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทในปัจจุบันนิยมใช้วิธีทางเคมีด้วย colorimetric ซึ่งมีวิธีการที่สลับซับซ้อน สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพง และใช้เวลานาน

ในการตรวจสอบ แต่แตกต่างจากการใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ในการวัดปริมาณไนเตรทซึ่งมีวิธีการที่ง่าย รวดเร็ว และประหยัดเวลา

ดังนั้นการจัดการที่เหมาะสมจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณไนเตรทที่ถูกชะล้าง และปริมาณที่สะสมในผลผลิตจึงได้ทำการศึกษาการชะล้างปริมาณไนเตรท และการสะสมไนเตรทในผลผลิตโดยมีการทดลอง ระดับการให้น้ำ สูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกเพื่อการจัดการที่เหมาะสม และเป็นแนวทางในการปรับปรุงการจัดการการผลิตให้เหมาะสมรวมทั้งศึกษาแนวทางการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทที่ถูกชะล้างจากการใส่ปุ๋ย และการสะสมในผลผลิตพืช โดยใช้วิธีทางเคมี (colorimetric) เปรียบเทียบกับการใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์มาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของสูตรธาตุอาหาร วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้างไนเตรทและการสะสมไนเตรทในผลผลิตพืช

2. เพื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยใช้วิธีทางเคมี และการวัดโดยใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธาตุไนโตรเจน

ไนโตรเจน (nitrogen) เป็นธาตุที่มีความสำคัญ และมีบทบาทต่อการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างมาก และมักจะพบการขาดธาตุไนโตรเจนในดินที่ปลูกพืชโดยทั่วไป เนื่องจากพืชมีความต้องการธาตุไนโตรเจนในปริมาณมาก และในดินมีปริมาณที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นธาตุไนโตรเจนจึงจัดเป็นธาตุหนึ่งที่จำเป็นต้องใส่ลงไปในดินในรูปปุ๋ยชนิดต่างๆ นอกจากนี้พืชจะได้รับธาตุไนโตรเจนจากแหล่งอื่นๆ เช่น จากการสลายตัวของอินทรียวัตถุ จากการแปรสภาพของสารประกอบอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน และจากการตรึงไนโตรเจนจากอากาศของจุลินทรีย์บางชนิด พืชจะได้รับจากการสลายตัวของหิน และแร่ในปริมาณน้อยที่สุด (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2546)

พืชสามารถดึงดูดธาตุไนโตรเจนจากดินในรูปที่เป็นประโยชน์ คือในรูปของเกลือไนเตรท (NO^-_3) เกลือแอมโมเนียม (NH^+_4) และในรูปของยูเรีย หรืออะมีน ($R–NH_2$) แต่ในดินมักจะสูญเสียธาตุไนโตรเจนได้ง่ายเนื่องจากการชะล้างบริเวณหน้าดิน และการระเหยสู่บรรยากาศในรูปของแก๊สต่างๆ เมื่อดินมีสภาพการถ่ายเทอากาศไม่ดี หรือมีความเป็นกรดเป็นด่างมากเกินไป (พิทโยธร สุขสวัสดิ์ และคณะ, 2548)

2.2 แอมโมเนียม และไนเตรทในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะมีอยู่ 2 รูป คือ แอมโมเนียม และไนเตรท ถ้าพืชขาดธาตุอาหารในรูปไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ จะส่งผลให้คุณภาพของผลผลิตลดลง ราก และลำต้นไม่แข็งแรง และมีอาการใบเหลือง เป็นต้น แม้ว่าการให้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมพืชจะสามารถนำไปใช้สังเคราะห์กรดอะมิโน และเอไมด์ (amide) ได้ทันทีก็ตาม ในรูปไนเตรทจะต้องผ่านกระบวนการรีดิวส์ (reduce) ให้กลายเป็นแอมโมเนียมก่อน (ยงยุทธ โอสถสภา, 2545) แต่เนื่องจากการให้ปุ๋ยที่มีองค์ประกอบของแอมโมเนียมมากเกินไปจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (Schwarz, 1995; Jones, 1997) ส่งผลให้พืชดูดใช้โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมได้น้อยลง และอาจทำให้พืชขาดธาตุเหล่านี้ ลักษณะอาการคือเกิดปลายใบอ่อนไหม้ (tip burn) (Jones, 1997) ทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโต เกิดอาการคลอโรซีส (chlorosis) ที่ใบพืช เป็นแผลที่ต้น และทำให้คาร์โบไฮเดรตถูกใช้ในปริมาณที่มาก อาจเกิดการขาดคาร์โบไฮเดรต (ยงยุทธ โอสถสภา, 2545)

2.3 ไนเตรทกับการนำไปใช้ของพืช

ไนเตรทเป็นเกลือของกรดไนตริกซึ่งเป็นกรดแก่ เกลือไนเตรทที่ใช้ในทางการเกษตร และอุตสาหกรรม ได้แก่ เกลือไนเตรทของโซเดียม, โพแทสเซียม, แคลเซียม, แอมโมเนียม, ทองแดง, เหล็ก, อลูมินัม, โครเมียม, ปรอท และตะกั่ว และสารไนเตรทถูกนำมาใช้ทางด้านเกษตรกรรมเป็นปุ๋ยในพืชบางชนิด เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ได้แก่ แอมโมเนียมไนเตรท โพแทสเซียมไนเตรท และแคลเซียมไนเตรท เป็นต้น (งานสารเป็นพิษ, 2531) ในดินที่มีการระบายอากาศดี มีความชื้น อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่เหมาะสมแอมโมเนียมจะถูกเปลี่ยนให้เป็นไนไตรท์ และไนเตรทตามลำดับ โดยกิจกรรมของพวกจุลินทรีย์ที่เรียกว่า กระบวนการ nitrification สารไนเตรทที่พืชนำไปใช้ส่วนใหญ่เป็นการสร้างสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ส่วนที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้คือไนเตรทไอออนซึ่งจะสะสมอยู่ในเซลล์พืช หากสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการสะสมไนเตรท เช่น ในสภาพที่แสงน้อย อุณหภูมิสูง พืชจะดูดสารไนเตรทเข้าไปมาก และเกิดการกระตุ้นการสะสมไนเตรทเป็นการชดเชยแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ทดแทนความเข้มข้นของอินทรีย์สาร (คาร์โบไฮเดรต) ที่ลดลง (Seginer, 1998) ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการสังเคราะห์แสงที่ลดลงในขณะเดียวกันถ้าพืชสามารถเปลี่ยนไนเตรทเป็นสารอินทรีย์ (กรดอะมิโน) ได้น้อยจะลดเมแทบอลิซึม (metabolism) ของเอนไซน์ไนเตรทรีดักเทส (reductase) ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสารไนเตรทเป็นผลให้เกิดการสะสมไนเตรทในพืชมากขึ้น (Maynard *et al.*, 1976) หากการรีดักชั่น (reduction) ของไนเตรทมาเป็นไนไตรท์ไปเป็นแอมโมเนียมจะทำให้ไนเตรทสะสมในพืช (กุลชลี งามจิ้, 2525)

2.4 การสูญเสียของไนโตรเจนในดิน

ไนโตรเจนในดินมีการสูญเสียไปจากดินได้หลายทาง คือ

1. พืช และจุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ การสูญเสียของไนโตรเจนดังกล่าวนี้อาจเป็นการสูญเสียชั่วคราว และจะกลับคืนสู่ดินเมื่อพืช และจุลินทรีย์นั้นตาย และเน่าเปื่อยลง แต่ถ้ามีการขนย้ายผลิตผลออกไปก็หมายถึงว่าเป็นการสูญเสียไนโตรเจนจากดินนั้นอย่างแท้จริง

2. การชะล้าง (leaching) ฝนที่ตกลงมาหรือน้ำชลประทานที่ซึมผ่านชั้นของดินจะชะเอาไนโตรเจนตามลงไปด้วย โดยเฉพาะไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนไตรท์หรือไนเตรท ถ้าหากไนโตรเจนที่ถูกชะลงไปยังชั้นล่างของดินที่ไม่ลึกมากรากของพืชก็จะดูดกลับขึ้นมาใหม่ แต่ถ้าถูกชะลงไปยังดินชั้นล่างที่ลึกจนรากหยั่งไม่ถึงแล้วการสูญเสียไนโตรเจนก็จะเกิดขึ้นโดยเฉพาะในบริเวณที่มีดินเนื้อหยาบ

3. การสูญเสียในรูปของแก๊ส (volatilization) ไนโตรเจนอาจสูญเสียไปจากดินในรูปของแก๊สได้ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียไนโตรเจนในดินดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาพที่มีการถ่ายเทอากาศไม่ดี เช่น ในสภาพที่มีน้ำขังจะทำให้ดินขาดออกซิเจน และกระบวนการรี-

ดักชันในดินก็จะเกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ไนไตรท์ และไนเตรทเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแก๊สได้ (พิทโยธร ไวยวัฒน์ และคณะ, 2548)

2.5 สาเหตุการชะล้างไนเตรท และการป้องกัน

ไนเตรทเป็นอนุมูลเคมีที่มีประจุลบจึงถูกดินดูดซับไว้ได้น้อย ทำให้ไนเตรทในดินเป็นอิสระ และสามารถเคลื่อนที่ไปกับน้ำได้ง่าย จึงทำให้ไนเตรทถูกน้ำที่ซึมผ่านดินชะไปสู่น้ำใต้ดินได้ง่าย ดินที่มีการชะล้างไนเตรทได้มาก ได้แก่ ดินเนื้อหยาบเพราะดินเนื้อหยาบจะอุ้มน้ำไว้ได้น้อย และมีการซึมน้ำเร็ว ซึ่งทำให้มีปริมาณน้ำที่ชะดินมากกว่าดินเนื้อละเอียด และดินเนื้อหยาบมักจะดูดซับไนเตรทได้น้อย และดูดซับความเหนียวแน่นต่ำกว่าดินเนื้อละเอียด

การลดการชะล้างไนเตรทจากดิน

1. การลดปริมาณน้ำที่ซึมผ่านดิน ซึ่งทำได้โดยหลีกเลี่ยงการให้น้ำแก่พืชมากจนเกินความสามารถของดินที่จะอุ้มน้ำไว้ และปรับพื้นที่ให้น้ำฝนบนผิวดินไหลสู่ทางระบายน้ำได้อย่างรวดเร็ว
2. ใช้ปุ๋ยในปริมาณที่จำเป็น
3. ให้ปุ๋ยให้ตรงเวลาตามที่พืชต้องการ
4. ให้ปุ๋ยโดยวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ปุ๋ยถูกพืชดูดไปใช้ก่อนที่จะถูกชะล้างไปจากใต้ดิน (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2548)

2.6 ไนเตรทในสิ่งแวดล้อม

1. บรรยากาศ

ขั้นตอนสุดท้ายของการออกซิเดชั่นในบรรยากาศของออกไซด์ของไนโตรเจนคือ nitrate aerosols และปริมาณของฝุ่นไนเตรทที่เกิดจาก photochemical pollution อาจเกิดขึ้นในเมืองโดยความเข้มข้นของไนเตรทในอากาศอยู่ระหว่าง 1 – 40 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขึ้นกับการเก็บตัวอย่าง และระยะเวลา

2. น้ำ

ความเข้มข้นของไนเตรท และไนไตรท์ในน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินแตกต่างกันอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพทางธรณีวิทยา การจัดการเกี่ยวกับของเสียจากมนุษย์, สัตว์, การใช้ปุ๋ย และการปลดปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ปกติน้ำผิวดินมีไนเตรทไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และไนไตรท์ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. การปนเปื้อนในอาหาร

จากการรวบรวมข้อมูลของ National Institute of Environmental Health Science พบว่าปริมาณไนเตรทในพืชพืชผักแตกต่างกันมาก เช่น บีท, มะเขือ, ผักกะหล่ำ และผักขม มีปริมาณไนเตรทสูง แต่

ในมะเขือเทศ และถั่วมีปริมาณไนเตรทต่ำ

ปริมาณไนเตรทนอกจากจะแตกต่างกันระหว่างชนิดของผักแล้วในผักชนิดเดียวกันก็มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แสงแดด ความชื้นในดิน ระดับของไนโตรเจนในดิน อย่างไรก็ตามพบว่าไนเตรทในผักนั้นจะอยู่ในช่วง 0.9 ถึง 2,165 มิลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ไนไตรท์มีไม่เกิน 7 มิลิกรัมต่อกิโลกรัม

สหภาพโซเวียต แนะนำปริมาณไนเตรทสูงสุดที่ยอมรับให้มีในผักชนิดต่างๆ ดังนี้ มันฝรั่ง 45 มิลิกรัมต่อกิโลกรัม, กะหล่ำ 160 มิลิกรัมต่อกิโลกรัม, แตงกวา 160 มิลิกรัมต่อกิโลกรัม, บีท 1,800 มิลิกรัมต่อกิโลกรัม, แครอท 415 มิลิกรัมต่อกิโลกรัม ฯลฯ หากมีการต้มผักดังกล่าวปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้สามารถเพิ่มเป็น 2 เท่า เนื่องจากไนเตรทบางส่วนลงไปอยู่ในน้ำที่ต้ม นอกจากนี้ปริมาณไนเตรทที่ยอมรับได้ใน 1วัน (maximum allowable) สำหรับมนุษย์ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม และองค์การ FAO/WHO แนะนำ ให้โซเดียมไนไตรท์ และปริมาณโปตัสเซียมไนไตรท์ที่รับได้ในแต่ละวัน (ADI) ไม่ควรเกิน 0.2 มก. ต่อน้ำหนักตัว 1 กก. (งานสารเป็นพิษ, 2531)

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมปริมาณไนเตรทในพืช

1. ความเข้มของแสง

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีแสงแดดจัดตลอดทั้งวัน ในธรรมชาติกระบวนการเจริญเติบโตของพืช เมื่อได้รับไนเตรทเข้าไปพืชจะรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นแอมโมเนียเพื่อให้เปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปอินทรีย์สารต่อไป ซึ่งแสงมีผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในกระบวนการนี้ให้เกิดขึ้นตามปกติ ส่งผลให้ไม่เกิดการสะสมของไนเตรทในผลิตผล (ดิเรก ทองอร่าม, 2547) และแสงยังมีผลกระทบทางอ้อมกับการสะสมไนเตรทด้วยเพราะแสงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทสซึ่งเอนไซม์นี้จะมีกิจกรรมช้าลงหรือไม่ทำงานเมื่อพืชอยู่ในที่มืด (Maynard and Barker, 1972) ในสภาวะเช่นนี้พืชจะนำไนเตรทไปใช้น้อยลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Burns *et al.* (2004) ที่รายงานว่า ในช่วงฤดูร้อนเมื่อให้ปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนเกินความต้องการ ถ้าแสงสว่างลดลงหรือเกิดจากส่วนใบของผักกาดหอมบังแสง ส่งผลให้ผักกาดหอมมีการสะสมไนเตรทในก้าน และใบเพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงฤดูหนาวผักกาดหอมจะมีการสะสมไนเตรทเพิ่มขึ้น อาจจะเนื่องมาจากพืชมีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง เมื่อเทียบกับอัตราการดูดใช้ไนเตรทเพราะว่ามีพลังงานแสงน้อยในการเปลี่ยนรูปไนเตรทให้อยู่ในรูปไนโตรเจน จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณผลผลิตต่ำ

2. อุณหภูมิ

โดยทั่วไปอุณหภูมิสูงจะส่งเสริมให้พืชสะสมไนเตรทมากขึ้น (Bassioni, 1971) เนื่องจากเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทสไม่ทำงานหรือทำงานช้าลง ทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมของไนเตรทลดลง (Viets and Hageman, 1971) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cantliffe (1972) พบว่าการเพิ่ม

ขึ้นของอุณหภูมิจาก 5–25 °C มีผลต่อปริมาณไนเตรทในผักปวยเหล่งเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกับ Santamaria and Gonnella (2001) พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10°C เป็น 20°C ส่งผลให้ปริมาณไนเตรทใน rocket เพิ่มขึ้น 2 เท่า ขณะที่ปริมาณ dry matter ของ rocket ลดลง

3. ชนิดของพืช

Brown and Smith (1966) รายงานว่า ผักที่รับประทานใบ และลำต้นเป็นอาหาร เช่น ผักกาดหอม ผักปวยเหล่ง เป็นต้น มีการสะสมปริมาณไนเตรทมากกว่าผักที่รับประทานส่วนรากหรือหัว เช่น แครอท หอมหัวใหญ่ เป็นต้น นอกจากนี้ Maynard and Barker (1972) ที่พบว่าในพืชชนิดเดียวกัน แต่คนละพันธุ์ ยังมีการสะสมไนเตรทแตกต่างกัน

4. ส่วนของพืช

ในส่วนต่างๆ ของพืชมีไนเตรทกระจายในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยพบว่า ก้านใบมีปริมาณไนเตรทมากที่สุด รองลงมาคือ แผ่นใบ และราก ตามลำดับ ส่วนดอกมีปริมาณไนเตรทต่ำที่สุด นอกจากนี้ในพืชต้นเดียวกัน ใบแก่จะมีปริมาณไนเตรทมากกว่าใบอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากส่วนที่แก่กว่าจะมีกระบวนการเมแทบอลิซึมเป็นไปอย่างช้าๆ (Wright and Davison, 1994)

5. อายุของพืช

โดยทั่วไปความเข้มข้นของไนเตรทในพืชจะมีปริมาณมากในช่วง vegetative growth และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่ (Brown and Smith, 1966) จากการศึกษาของธรรมศักดิ์ ทองเกต และคณะ (2546) เกี่ยวกับผักกาดหอม 2 ชนิดคือ คอส และเรดโอ๊ค ซึ่งปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตร Enshi ที่ 2 ระดับความเข้มข้น คือ 1.2 และ 2.4 mS/cm พบว่าผักกาดหอมทั้งสองชนิดที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารมีการสะสมไนเตรทมากขึ้นตามอายุปลูกจนถึงระยะเก็บเกี่ยวที่ 5 สัปดาห์ และ Wright and Davison (1994) ที่รายงานว่า ในระยะที่พืชเจริญเติบโตเต็มที่ความสามารถของพืชในการใช้ไนโตรเจนในดินจะลดลง ดังนั้นพืชจึงใช้ประโยชน์จากไนเตรทที่สะสมตามส่วนต่างๆ ของพืช ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทลดลง

6. ปริมาณของปุ๋ย

การงดปุ๋ยหรือการให้น้ำแทนการให้สารละลายธาตุอาหารพืชเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดปริมาณการสะสมไนเตรทในพืชได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของมนัชญา รัตนโชติ และคณะ (2546) พบว่า การงดปุ๋ยในช่วงระยะ 0, 3, 6 และ 9 วันก่อนเก็บเกี่ยว ช่วงระยะการงดปุ๋ยที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณการสะสมไนเตรทใน water cress ลดต่ำลง

ในต่างประเทศเช่น ประเทศในแถบยุโรป ได้มีการกำหนดปริมาณไนเตรทสูงสุดที่ยอมให้มีอยู่ในผักกาดหอม (*Lactuca sativa*) ในช่วงระหว่าง 2,500–3,000 มิลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด (ตารางที่ 1) และได้มีการศึกษาถึงวิธีการลดปริมาณสารไนเตรทในพืชผักก่อนที่จะเก็บเกี่ยว พบว่าสามารถใช้ธาตุคลอรีนในรูปของ Cl^- ใส่ลงในสารละลายธาตุอาหารแทนการใช้สารไนเตรทใน

สัปดาห์สุดท้ายของการปลูกเลี้ยงผักกาดหอมที่ปลูกด้วยวิธีการไม่ใช้ดินแบบ NFT โดยไม่กระทบกระเทือนต่อผลผลิต และพบแนวโน้มว่าธาตุอาหารที่มีประจุลบตัวอื่นๆ เช่น ซัลเฟอร์ ในรูปของ $SO_4^{=}$ สามารถใช้เพื่อการนี้ได้เช่นกัน (Urrestaazu, 1998) นอกจากนี้แล้ว กระบวนการ oxidation จากแอม-โมเนียมไปเป็นไนเตรทในดินนั้นสามารถยับยั้งโดยการใช้สารยับยั้งกระบวนการ nitrification โดยการใช้สารเคมีเช่น pyridines (2–chloro–6–(trichioromethyl) (Maynard and Baker, 1972)

ตารางที่ 1 ค่าสูงสุดของปริมาณไนเตรทที่ยอมให้มีได้ในพืชผัก

พันธุ์พืช	ปริมาณสารไนเตรท (มก./ กก. นน. สด)	
	ฤดูฝนและฤดูร้อน	ฤดูหนาว
ผักกาดหอม (Lettuce)	2,500	3,000
ผักกาดฝอยก้านแข็ง (Endive)	2,500	3,000
	ทุกฤดูกาล	
หัวผักกาดแดง (Radish)	3,000	
หัวบีท (Beet root)	3,000	
ขึ้นฉ่าย (Celery)	4,000	
มันฝรั่ง (Potato)	2,000	

ที่มา: European Commission (1997)

2.8 อันตรายจากการบริโภคอาหารที่ปนเปื้อนสารไนเตรท

การบริโภคผักหรืออาหารอื่นๆ ที่มีการสะสมของสารไนเตรทสามารถทำ ให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ และชีวิตของผู้บริโภคได้ (งานสารเป็นพิษ, 2531) สารไนเตรทเมื่อเข้าสู่กระเพาะอาหารบางส่วนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสารไนไตรท์ในขบวนการ nitrate reduction ที่สามารถเกิดขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพอับอากาศ สารไนไตรท์สามารถถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดไปทำปฏิกริยากับเม็ดโลหิตโดยขบวนการ oxidation เปลี่ยนแปลงเม็ดโลหิต จาก haemoglobin ให้กลายเป็น methaemoglobin โดยจะไป oxidise Fe_2^+ ในโมเลกุลของเม็ดเลือดในรูปของ Haemoglobin ให้กลายเป็น Fe_3^+ เม็ดโลหิตที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ (Methaemoglobin) จะไม่มีคุณสมบัติในการรับ และนำพาออกซิเจนไปเลี้ยงเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย หากปริมาณเมธฮีโมโกลบินเพิ่มขึ้นมากกว่า 20% ของฮีโมโกลบินทั้งหมด ผู้ป่วยจะมีอาการไม่สบายเนื่องจากการขาดออกซิเจนอย่างเห็นได้ชัด อาการตัวเขียว, อ่อนเพลีย, หายใจหอบถี่, ปวดศรีษะ และหัวใจเต้นแรง และมีจังหวะเร็วกว่าปกติ เป็นต้น ดังนั้นถ้ามีการบริโภคสารไนเตรทเข้าไปจำนวนมากร่างกายจะเกิดภาวะที่ขาดออกซิเจนฉับพลันได้ โดยเฉพาะในเด็กเล็กจะอ่อนแอต่อ

อาการขาดออกซิเจนนี้ เกิดอาการของโรคที่เรียกว่า "methaemoglobinemia" หรือ "blue baby syndrome" ทารกอยู่ในสภาพขาดออกซิเจนเนื้อตัวผิวหนัง และปากเปลี่ยนเป็นสีเขียวคล้ำจนถึงเสียชีวิตได้ (Maynard and Baker, 1972) ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงการเลือกผักที่จะนำมาบริโภค หรือใช้ต้มเป็นซุปให้แก่ทารกที่มีอายุต่ำกว่า 6 เดือนเพราะปริมาณไนเตรทที่ออกมาในน้ำซุปอาจเป็นอันตรายต่อเด็กได้ง่าย คือ ทำให้เกิดเมธฮีโมโกลบินเพิ่มมากขึ้นในเลือด ผู้ใหญ่จะมีความต้านทานต่อความเป็นพิษของไนเตรทเมื่อเข้าสู่ร่างกายได้มากกว่าทารก เมื่อได้รับไนเตรทในอัตราส่วนต่อน้ำหนักร่างกายที่เท่ากัน เนื่องจากในเม็ดเลือดแดงของผู้ใหญ่มีเอนไซม์ชนิดหนึ่งคือ เอนเอดีเอช-เมธฮีโมโกลบินรีดักเตส (NADH–methemoglobin reductase) ซึ่งสามารถเปลี่ยนเมธฮีโมโกลบินให้กลับคืนมาเป็นฮีโมโกลบินอย่างเดิมได้ (งานสารพิษ, 2531)

2.9 การปลูกพืชไร้ดิน (soilless culture)

การปลูกพืชไร้ดิน (soilless culture) หมายถึง การปลูกพืชแบบที่ไม่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูก ดินในที่นี้ หมายถึง วัสดุผสมที่ประกอบด้วยอนุภาคทราย (sand) อนุภาคตะกอน (silt) และอนุภาคดินเหนียว (clay) (นภดล เรียบเลิศหิรัญ, 2538)

การปลูกพืชไร้ดิน (soilless culture) สามารถแบ่งออกได้ 3 ระบบ ดังนี้

1. การปลูกพืชในวัสดุปลูก (substrate culture)
2. การปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารพืช (hydroponics)
3. การปลูกพืชให้รากลอยอยู่ในอากาศ หรือการปลูกในอากาศ (aeroponics)

วัสดุที่ใช้ในการปลูกพืชไร้ดินมี 2 ชนิด ชนิดแรก ได้แก่ วัสดุที่สลายตัวง่ายมักเป็นวัสดุที่มาจากสารอินทรีย์ เช่น แกลบ ขี้เถ้าแกลบ ขี้เลื่อย และขุยมะพร้าว และอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ วัสดุที่สลายยาก (inert substances) เช่น กรวด ทราย อิฐเผา rock wool, vermiculite และ perlite วัสดุปลูกทั้ง 2 ชนิด เมื่อใช้ปลูกพืชจะเป็นที่ยึดเกาะของราก และพยุงลำต้น ระหว่างปลูกพืชต้องเติมสารละลายธาตุอาหารลงในวัสดุปลูก ต้นพืชก็จะเจริญเติบโตได้ ในการใช้วัสดุปลูกจะต้องพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุปลูกเป็นหลักสำคัญ สุชาดา ศรีเพ็ญ (2531) แนะนำว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการปลูกพืชจะต้องอุ้มน้ำได้เพียงพอตามความต้องการของพืช มีความพรุนที่จะช่วยระบายอากาศได้ดี และสามารถเป็นที่ยึดเกาะของราก ค้ำจุนลำต้นได้ดีด้วย

วิทยา สุริยาภณานนท์ (2524); สมเพียร เกษมทรัพย์ (2525) และ Nelson (1978) ได้แนะนำให้พิจารณาคุณสมบัติของอินทรียวัตถุโดยมีรายละเอียดเพิ่มเติมคือ ประการแรกวัสดุปลูกอินทรียวัตถุควรมีส่วนที่ค่อนข้างอยู่ตัว และส่วนที่สลายตัวง่าย ส่วนที่สลายตัวง่ายควรทำหน้าที่เชื่อมยึดส่วนที่อยู่ตัว ถ้าวัสดุปลูกสลายตัวเร็วทั้งหมดจะทำให้วัสดุปลูกยุบตัวลงเร็ว และเหลือน้อยไม่เพียงพอต่อการยึดเกาะของราก และพยุงลำต้นพืช โดยเฉพาะในช่วงที่พืชกำลังเจริญเติบโตมีขนาด

ใหญ่เต็มที่ ประการที่สอง ความหนาแน่นรวมของวัสดุ (bulk density) เป็นตัวชี้บอกน้ำหนักของวัสดุและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง และปริมาตรช่องว่างของวัสดุปลูก เมื่อความหนาแน่นรวมมีค่าน้อยแสดงว่าวัสดุปลูกมีส่วนที่เป็นช่องอยู่มาก น้ำหนักจะเบา วัสดุที่ใช้ผสมเพื่อปลูกไม้กระถางควรมีค่าความหนาแน่นรวมประมาณ 0.6421–1.2039 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนั้นวัสดุปลูกควรเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูกปราศจากสารที่เป็นพิษกับพืช มีความสามารถในการอุ้มน้ำ ระบายอากาศดีพอควร และมีค่า pH ค่อนข้างเป็นกลาง ถ้ามีปริมาณธาตุอาหารเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของพืชก็จะเป็นการดี มีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity) สูง ซึ่งควรจะอยู่ในช่วง 10–30 มิลลิกรัมสมมูลย์ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง (meq./100 gm.dry.wt) (ศิริพร ลีละศิธร, 2528; Polizotto *et al*, 1975)

คุณสมบัติทางกายภาพของขุยมะพร้าว

ขุยมะพร้าวมีประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุปลูกให้ดีขึ้นโดยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำ และอาหาร เพิ่มความสามารถในการระบายน้ำ และอากาศในดิน มีน้ำหนักเบา อุ้มน้ำได้ดี นอกจากนี้ขุยมะพร้าวเป็นวัสดุที่ค่อนข้างสะอาด ปัจจุบันใช้ขุยมะพร้าวทั้งชำกิ่ง หรือตอนกิ่ง ผสมดินปลูก หรือเพาะเมล็ด และคลุมหน้ากระถางดินปลูก สามารถดูดความชื้นได้ดีพอๆ กับสแฟกนัมมอส และอยู่ในสภาพสะอาดพอสมควร การถ่ายเทอากาศดี โดยเฉพาะถ้ามีเส้นใยปนอยู่ด้วยมากก็จะผุเปื่อยช้า ทำให้ไม่เกิดการขาดธาตุอาหารในพืช มีความหยุ่นตัวดี ไม่อัดแน่นง่าย รากพืชเจริญได้ดี ที่สำคัญก็คือ เป็นผลพลอยได้ที่มีราคาไม่แพง ขุยมะพร้าวมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.5–2.0 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การซาบซึมน้ำ (hydraulic conductivity) ประมาณ 0.15 เซนติเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นรวม 0.06 กรัมต่อมิลลิลิตร ความหนาแน่นอนุภาค 1.55 กรัมต่อมิลลิลิตร ความพรุนทั้งหมด (total porosity) 95.53% ช่องว่างอากาศ (total air space) 4.87% และความชื้นที่เป็นประโยชน์ได้ง่าย (easily available water) 35.28% มีสภาพเป็นกรดเล็กน้อย คือมี pH ประมาณ 6.2 ขุยมะพร้าวมีปริมาณโพแทสเซียมค่อนข้างสูง แต่มีปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ องค์ประกอบของขุยมะพร้าวที่ผึ่งแห้งในที่ร่มประกอบด้วย ไนโตรเจน 0.041% ฟอสฟอรัส 0.043% โพแทสเซียม 0.74% แคลเซียม 0.22% และแมกนีเซียม 0.27% ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และสรสิทธิ์ วัชโรทยาน (2531) รายงานเกี่ยวกับองค์ประกอบของขุยมะพร้าวที่ผึ่งในที่ร่ม ประกอบด้วย ความชื้น 11.7% ไนโตรเจน 0.41% ฟอสฟอรัส 0.02% โพแทสเซียม 0.89% แคลเซียม 0.31% แมกนีเซียม 0.45% และขี้เถ้า 6.6% ส่วนขุยมะพร้าวที่ได้จากกระบวนการแยกเส้นใยแบบแห้งจะมีโพแทสเซียมสูงกว่าคือ ความชื้น 11.7% ไนโตรเจน 0.18% ฟอสฟอรัส 0.076% โพแทสเซียม 1.41% แคลเซียม 0.21% และแมกนีเซียม 0.26%

คุณสมบัติทางกายภาพของทราย

ทรายเป็นวัสดุปลูกที่เพิ่มความหนาแน่นรวมของวัสดุเพาะ ช่วยในการยึดลำต้น ให้ความโปร่ง

ทำให้มีการระบายน้ำดี และมีช่องอากาศเพียงพอ ทรายเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องถิ่น ทรายที่ใช้ในการก่อสร้างสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปลูกพืชได้ อนุภาคของทรายมีขนาด 1.5–3 มิลลิเมตร แต่มีปัญหาเรื่องน้ำหนักที่มาก สนั่น (2526) พบว่าทรายประกอบด้วยอนุภาคก้อนเล็กๆ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05–2.0 มิลลิเมตร ทรายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ แบ่งได้ 2 ชนิด คือทรายหยาบ และทรายละเอียด ทรายหยาบเป็นทรายที่ใช้ในการก่อสร้างมีขนาดเม็ดใหญ่ และหยาบ เหมาะที่จะช่วยในการระบายน้ำแต่ไม่ค่อยมีธาตุอาหารเจือปน ส่วนทรายละเอียดหรือทรายขี้เป็ดมีลักษณะสีคล้ำ เม็ดละเอียด ทรายชนิดนี้มีตะกอนปนอยู่ด้วย ซึ่งอาจเป็นอินทรียวัตถุหรือดินเหนียวที่ถูกพัดพามา ดังนั้นจึงมีธาตุอาหารปนอยู่ด้วย ทำให้การระบายน้ำไม่ดี ไม่เหมาะที่จะใช้ปลูกพืช ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และสรสิทธิ์ วัชโรทยาน (2531) กล่าวว่าขนาดของทรายมีความสำคัญ ถ้าละเอียดมากจะมีปัญหาจับตัวกันแน่น ทำให้การระบายน้ำ และอากาศไม่ดี แต่ถ้าขนาดใหญ่เท่าก้อนกรวดเล็กๆ ก็จะทำให้ต้องให้น้ำบ่อยขึ้นเพราะไม่อุ้มน้ำ ดังนั้นการใช้ทรายจึงควรมีทั้งขนาดใหญ่ และเล็กผสมกัน การใช้ทรายหยาบเป็นเครื่องปลูกจะทำให้ขาดคุณสมบัติในด้านการอุ้มน้ำ และเก็บสะสมธาตุอาหารพืช องค์ประกอบของทรายประกอบด้วย SiO_2 94.56–99.52, Fe_2O_3 0.06–0.15, Al_2O_3 0.02–1.14, CaO 0.003–0.74, MgO 0.01–0.08 ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายอยู่ระหว่าง 2.52–2.61 White (1974) รายงานว่าทรายมีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.92 กรัมต่อมิลลิลิตร มีช่องว่างทั้งหมด 36.0% โดยปริมาตร ปริมาณช่องระบายน้ำ 9.4% โดยปริมาตร และปริมาณช่องที่พืชสามารถดูดยึดน้ำไว้ได้ 26.6% ซึ่งขนาดของทรายจะมีหลายขนาด และจะมีส่วนละเอียด และส่วนหยาบแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อขนาดของส่วนละเอียด และส่วนหยาบต่างกันจะทำให้คุณสมบัติแตกต่างกันไป ทรายหยาบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.6–2.5 มิลลิลิตร เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดในการเป็นส่วนผสมของวัสดุปลูก เพราะถ้าหากใช้ทรายละเอียดเกินไป เม็ดทรายจะทำให้การระบายน้ำเลว แต่ถ้าหากใช้ทรายหยาบเกินไป วัสดุปลูกก็อาจเกิดการขาดน้ำจนแห้งเกินไป (อุมาวดี ลิ้มเสถียรกุล, 2546)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในระบบ Nutrient Film Technique (NFT)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในระบบ (NFT) เป็นการปลูกพืชโดยรากของพืชจะแช่อยู่ในสารละลายโดยตรง สารละลายธาตุอาหารจะไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ หนาประมาณ 2–3 มิลลิเมตร ในรางปลูกพืชกว้างตั้งแต่ 5–35 เซนติเมตร สูงประมาณ 5–10 เซนติเมตร โดยความกว้างรางขึ้นอยู่กับชนิดพืชที่ปลูก เพื่อเพิ่มออกซิเจนในสารละลายธาตุอาหารพืช ความยาวของรากตั้งแต่ 5–20 เมตร สารละลายจะไหลอย่างต่อเนื่อง อัตราไหลอยู่ในช่วง 1–2 ลิตรต่อนาทีต่อราง รางอาจทำจากแผ่นพลาสติกสองหน้าขาว และดำ หนา 80–200 ไมครอน หรือจาก PVC ขึ้นรูปเป็นรางสำเร็จ หรือทำจากโฟมขึ้นรูปเป็นรางติดกัน 3–5 ราง ต่อกันตามแนวยาว และบุภายในด้วยแผ่นพลาสติกกันน้ำรั่ว โดยจะมีปั๊มดูดสารละลายให้ไหลผ่านราง รากพืช และไหลเวียนกลับมายังถังเก็บสารละลาย (อิทธิสุนทรนันทกิจ, 2538)

ข้อดี

1. ไม่จำเป็นต้องหาค่าการใช้น้ำของพืช (ETP) เนื่องจากระบบนี้จะมีการให้น้ำแก่พืชตลอดเวลา

2. เป็นระบบการให้สารละลายแก่พืชที่โดยอาศัยรางเป็นตัวให้สารละลายธาตุอาหารแก่พืช

3. ทำการป้องกัน และกำจัดเชื้อโรคพืชต่างๆ ในสารละลายได้ง่าย

4. เป็นระบบที่มีการใช้น้ำ และธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากสามารถนำสารละลายที่ไหลผ่านรางนำกลับมาใช้อีก

5. ไม่ต้องมีการจัดการวัสดุปลูกก่อนปลูกและหลังปลูกที่ต้องกำจัดทิ้ง

6. เป็นระบบที่เหมาะสำหรับใช้ในเชิงพาณิชย์เนื่องจากสามารถปลูกพืชได้อย่างต่อเนื่องตลอดปีไม่เสียเวลาในการเตรียมระบบปลูก

ข้อเสีย

1. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งในครั้งแรกมีราคาสูง

2. เป็นระบบที่ต้องมีการดูแลอย่างใกล้ชิด เพราะมีโอกาสที่ระบบจะเสียได้ง่าย และพืชจะถูกกระทบกระเทือนอย่างรุนแรง และรวดเร็ว

3. ต้องใช้น้ำที่มีสิ่งเจือปนอยู่น้อย (สารละลายต่างๆ) ถ้ามีสิ่งเจือปนอยู่มากจะเกิดการสะสมของ Ion บางตัวที่พืชใช้น้อยหรือไม่ดูดใช้เลยสะสมอยู่ในสารละลายทำให้จำเป็นต้องเปลี่ยนสารละลายทั้งหมดบ่อยๆ

4. มีปัญหามากเกี่ยวกับการสะสมอุณหภูมิของสารละลาย โดยเฉพาะในเขตร้อนการละลายตัวของออกซิเจนในสารละลายจะลดลง ซึ่งอาจแก้ปัญหาโดยการลดความยาวของรางปลูกลง หรือมีการเพิ่มอากาศในถังผสมสารละลาย

5. มีการแพร่กระจายของโรคพืชบางชนิดอย่างรวดเร็ว หากสารละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีเชื้อโรคที่เป็นอันตรายกับพืชติดมาด้วย (วรกฤษณ์ บุญทวิโรจน์, 2551)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในระบบ Deep Flow Technique (DFT)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในระบบ Deep Flow Technique (DFT) เป็นการปลูกพืชให้รากแช่อยู่ในกระบะน้ำ สารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความลึก 2–15 เซนติเมตร เป็นระบบที่มีการใช้สารละลายธาตุอาหารพืชแบบหมุนเวียน รากพืชจะจุ่มในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ไหลอย่างช้าๆ เพื่อเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้กับรากพืชสามารถลดระดับน้ำให้น้อยลง ช่วยให้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยระบบนี้จะเหมาะสำหรับปลูกพรรณไม้น้ำเกือบทุกชนิด ส่วนผักไทยประเภทกินใบ เช่น ผักคะน้า กวางตุ้ง ผักบุ้ง คื่นฉ่าย ผักชี ไดโตเกียว ผักโขม เป็นต้น (โกเมนทร์ บุญเจือ, 2551)

ข้อดี

1. ไม่จำเป็นต้องหาค่าการใช้น้ำของพืช (ETP) เนื่องจากระบบนี้จะมีการให้น้ำแก่พืชตลอดเวลา

2. เป็นระบบการให้สารละลายแก่พืชโดยอาศัยรางที่มีความลึกของสารละลายมากกว่าระบบ

NFT และสามารถที่จะนำไปปลูกพืชที่มีรากลึก เช่น มะเขือเทศ แตงกวา เป็นต้น

3. เป็นระบบที่มีการใช้น้ำ และธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากสามารถนำสารละลายที่ไหลผ่านรางกลับมาใช้อีก

4. ไม่ต้องมีการจัดการวัสดุปลูกก่อนปลูกและหลังปลูกที่ต้องกำจัดทิ้ง

ข้อเสีย

1. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งในครั้งแรกมีราคาสูง

2. เป็นระบบที่ต้องมีการดูแลอย่างใกล้ชิด เพราะมีโอกาสที่ระบบจะเสียได้ง่าย และพืชจะถูกกระทบกระเทือนอย่างรุนแรง และรวดเร็ว

3. บางครั้งต้องใส่เครื่องพ่นอากาศเนื่องจากรากพืชอาจได้ปริมาณอากาศน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดรากเน่าได้

4. มีปัญหามากเกี่ยวกับการสะสมอุณหภูมิของสารละลาย โดยเฉพาะในเขตร้อนมีผลต่อการละลายตัวของออกซิเจนในสารละลายลดลง ซึ่งอาจแก้ปัญหาโดยการลดความยาวของรางปลูกลง หรือมีการเพิ่มอากาศเข้าไปในถังผสมสารละลายซึ่งเหมือนกับระบบ NFT

5. มีการแพร่กระจายของโรคพืชบางชนิดอย่างรวดเร็ว หากสารละลายที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีเชื้อโรคที่เป็นอันตรายกับพืชติดมาด้วย (วรกฤษณ์ บุญทวิโรจน์, 2551)

2.10 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท

ในการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทด้วยวิธีทางเคมีจะใช้วิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทที่ปนเปื้อนในน้ำ หรือที่มีการสะสมในผักโดยมีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมคือ การวิเคราะห์ด้วยวิธี colorimetric

1. วิธี colorimetric ด้วย salicylic (Catado *et al.*, 1975)

- ดูดสารสกัดตัวอย่างมา 0.2 มิลลิลิตร เติม 5% salicylic acid ใน H_2SO_4 เข้มข้น 0.2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 20 นาที แล้วเติม NaOH ลงไป 5 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 410 nm ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

ชยะวัฒน์ เทียมบุญประเสริฐ (2550) วิเคราะห์ปริมาณไนเตรทของผักสลัดที่ปลูกในระบบ (NFT) ที่มีชนิดของตาข่ายพรางแสงแตกต่างกัน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารไนเตรท โดยนำตัวอย่างพืชสดไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนแห้งแล้วนำไปบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1 มิลลิเมตร ชั่งตัวอย่างพืชแห้ง 0.1 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนออกแล้วนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ พบว่าการใช้ตาข่ายพรางแสงทำให้มีค่าการสะสมไนเตรทสูงกว่าการไม่ใช้ตาข่ายพรางแสง โดยมีค่าการสะสมไนเตรทอยู่ระหว่าง 1,253–2,894 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด

ญาดา วงศ์พรประทีป (2550) วิเคราะห์ปริมาณไนเตรทในผักสลัดที่ปลูกในระบบ NFT ที่

ค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารไนเตรท โดยนำตัวอย่างพืชสดไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนแห้งแล้วนำไปบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1 มิลลิเมตร ชั่งตัวอย่างพืชแห้ง 0.1 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนออกแล้วนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ พบว่าปริมาณไนเตรทในผักสลัดมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป

2. วิธี colorimetric ด้วย brucine (Association of Official Analytical Chemists, 1980)

– ดูดสารสกัดตัวอย่าง 0.2 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่น 2.8 มิลลิลิตร เติมสารละลายเกลือ NaCl ความเข้มข้น 30% และ กรด H_2SO_4 ผสมให้เข้ากัน เติมสารละลาย brucine-sulfanilic แล้วนำหลอดทดสอบไปตั้งในน้ำเดือดเป็นเวลา 25 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 410 nm ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

พัชราภรณ์ ภู่ไพบูลย์ และคณะ (2552) วิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรทในผักคะน้า และผักกาดหอมที่สุ่มจากตลาดขายปลีก–ส่ง ในกรุงเทพ และปริมณฑล โดยนำตัวอย่างพืชสดไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนแห้งแล้วนำไปบดให้เป็นผงละเอียด ชั่งตัวอย่างพืชแห้ง 0.1 กรัม เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย mixer ทิ้งค้างคืน นำไปเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนออก กรองด้วยกระดาษกรองแล้วนำสารที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ พบว่าผักคะน้ามีการสะสมไนเตรท–ไนโตรเจน เฉลี่ยอยู่ที่ 0.5% และพบว่าผักกาดหอมมีค่าความเข้มข้นไนเตรท-ไนโตรเจนเฉลี่ย 0.14% และจากการวิเคราะห์ไนเตรทแบบ colorimetric พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี brucine และ salicylic สามารถวัดค่าความเข้มข้นของไนเตรท–ไนโตรเจน ในตัวอย่างพืชได้โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง flow injection analyzer

2.11 เซ็นเซอร์ (sensor)

เซ็นเซอร์ คืออุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ หรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แสง หรือระดับของเหลว เป็นต้น จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณออก หรือปริมาณเอาต์พุตที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่ง (measurable output) ที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้ เพื่อความแม่นยำในการวัดเซ็นเซอร์ทุกชนิดจะต้องผ่านการสอบเทียบ โดยเทียบกับค่ามาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ (วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, 2548)

ชนิดของเซ็นเซอร์

ไบโอเซ็นเซอร์ (bio sensor) คือเครื่องมือวิเคราะห์สำเร็จซึ่งมีสารชีวภาพ เช่น เอนไซม์ สารปฏิชีวนะ จุลินทรีย์ หรือดีเอ็นเอ ทำหน้าที่ในการตรวจวิเคราะห์สารที่ต้องการตรวจวัดโดยมีหลักการทำงาน 2 ส่วน คือส่วนของสารชีวภาพ และส่วนของทรานส์ดิวเซอร์ การประยุกต์ใช้ไบโอ-เซ็นเซอร์ทำได้หลากหลาย คือด้านการแพทย์ ใช้ตรวจวัดน้ำตาลในเลือด และสารอื่นๆ เช่น การตรวจ

วัดระดับฮอร์โมนเอชซีจี เพื่อตรวจสอบการตั้งครรภ์ การตรวจไวรัสตับอักเสบ การตรวจหายาบ้า และสารเสพติดอื่นๆ

เซ็นเซอร์เคมี (chemical sensor) เป็นเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับไอออนที่สนใจในสาระละลายแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เซ็นเซอร์เคมีจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 คือ 1) transducer ทำหน้าที่เปลี่ยน activity ของ ion ที่สนใจให้เป็นศักดิ์ไฟฟ้า (electrical potential) transducer สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ Field-effect transistors (FETs) และ Solid-state transducer 2) Polymeric membrane ion-selective จะเคลือบอยู่บนผิวหน้าของ transducer เพื่อทำหน้าที่เป็น receptor ตรวจจับ ion ที่สนใจในสารละลายแล้วส่งผ่านไปยัง transducer (Faridbod *et al.*, 2008)

หลักการการทำงานของเคมีเซ็นเซอร์แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ

1. เกิดการจับกับสารเคมีที่ต้องการวัดอย่างจำเพาะเจาะจงเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของตัวตรวจจับเคมีกับสารเคมี

2. ส่งผลตัวให้สัญญาณส่งสัญญาณที่แตกต่างกันออกมา (สมชาย แก้ววังชัย, 2556)

การตรวจวัดปริมาณไนเตรทสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Spectrophotometrics (Biswas and Chowdhury, 2004; Lopez *et al.*, 2007; Lopez *et al.*, 2010) Mid-infrared Fourier transform spectroscopy (Jahn *et al.*, 2006; Linker *et al.*,2004; Linker *et al.*,2005) อย่างไรก็ตามเทคนิคการตรวจวัดปริมาณไนเตรทดังกล่าวมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายสูงทั้งเครื่องมือและวัสดุใช้ระยะเวลาในการตรวจวัดนาน และยังมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม เพื่อทำให้การตรวจวัดปริมาณไนเตรทสะดวก และลดขั้นตอนในการตรวจวัดจึงได้พัฒนา Nitrate-sensitive FET บนพื้นฐานเทคโนโลยี Ion-selective field effect transistor (ISFET) โครงสร้างพื้นฐานของ ISFET พัฒนามาจาก Metal oxide semiconductor field effect transistor โดยลอก metal gate ออกให้เหลือแต่ gate dielectric ซึ่งเรียกว่า sensing membrane เพื่อใช้ตรวจวัดไฮโดรเจนในสารละลาย gate-contact ถูกแทนที่ด้วย external reference electrode เพื่อใช้วัด output signal และมีการนำ ISFET ไปใช้งานหลายด้าน เช่น biological analyses, chemical analyses, medical detection จึงได้มีการพัฒนา sensing membrane จาก metal oxide หลายชนิด เช่น Si_3N_4, Ta_2O_5, Al_2O_3 และ TiO_2 (Matsuo *et al.*, 1079; Mikolajick *et al.*, 1997; Chou and Hsiao, 2000; Jung-Chuan and Chen-Yu, 2001; Bunjongpru *et al.*, 2013)

Nitrate-sensitive FET เป็นการประยุกต์ใช้งาน ISFET เป็นไนโตรเจนเซ็นเซอร์โดยการตรึง ion-selective membrane ที่สามารถจับไนเตรทไอออนบน gate ของ ISFET ไนโตรเจนเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนเป็นเซ็นเซอร์ที่มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจจับไอออนที่สนใจในสารละลายแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย

1. ISFET ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสัญญาณ (transducer) แปลง activity ของไอออนที่ต้องการ

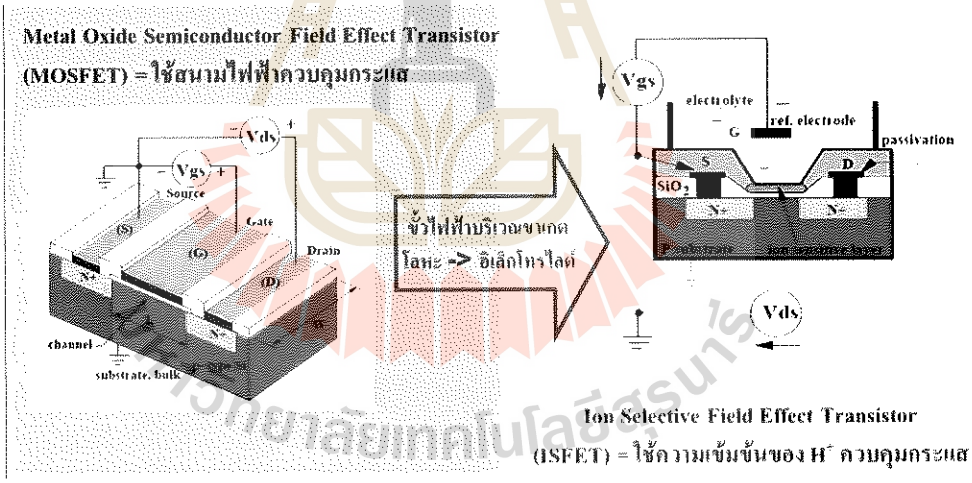
ตรวจวัดให้เป็นศักย์ไฟฟ้า ISFET เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกพัฒนามาจากโครงสร้างของมอสเฟต ชนิดเอ็นแชนแนล เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อไอออนได้จะทำการลอกชั้นเกตโลหะออกเพื่อให้ชั้นเกตออกไซด์ซึ่งเป็นฉนวนสัมผัสกับสารละลายโดยตรงดังแสดงในภาพที่ 1

2. Polymeric ion-selective membrane เป็นชั้นเมมเบรนที่มีรูพรุนซึ่งถูกตรึงอยู่บนผิวหน้าของ ISFETทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับที่มีความว่องไวต่อการตรวจจับไอออนที่สนใจซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

2.1 Polymeric matrix จะใช้ Polyvinyl chloride (PVC) เป็น polymer ที่เหมาะสมจะนำมาใช้ เป็น polymer matrix เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีรูพรุนเพื่อให้ไอออนที่ต้องการตรวจวัดสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนไปยัง ISFET ได้ และไม่มี ion site ที่ตอบสนองต่อ ion ที่ต้องการตรวจวัด

2.2 Ionophore ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับไอออนที่สนใจ และเกิดการแพร่ผ่านจากชั้นเมมเบรนไปยัง transducer

2.3 Plasticizer เป็น additive ที่เติมลงไปเพื่อเพิ่ม plasticity หรือ fluidity ของ polymer



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอุปกรณ์ ISFET

การใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดปริมาณสารไนเตรท (วรพันธุ์ ไชยศรีรัตนากูล และคณะ, 2559)

1. เตรียมสารละลาย KNO_3 ที่ระดับความเข้มข้น 5 ppm, 20 ppm และ 60 ppm เพื่อใช้ calibration ของหัววัดแต่ละตัว

2. เตรียมสารตัวอย่างที่จะใช้วัดปริมาณสารไนเตรทให้อยู่ในรูปของของเหลว โดยให้มีปริมาณสารตัวอย่างประมาณ 30 มิลลิลิตร

3. calibration หัววัดโดยใช้สารละลาย KNO_3 เริ่มวัดที่ระดับความเข้มข้นต่ำไปสูง จำนวน 2 ครั้ง และอ่านค่า R^2 ของการ calibration โดยควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.95-0.99

4. จุ่มหัววัดลงในสารตัวอย่าง กดอ่านค่า รอประมาณ 5 นาที จะมีการแสดงผลปริมาณสารไนเตรทที่สามารถวัดได้ โดยมีหน่วยการวัด เป็น ppm

การพัฒนา และการนำเทคโนโลยีเซ็นเซอร์มาประยุกต์ใช้

ในปัจจุบันการนำเซ็นเซอร์มาพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจปริมาณสารต่างๆ เริ่มมีมากขึ้นโดย Chaisriratanakul *et al.* (2016) พัฒนาไนเตรทเซ็นเซอร์ Nitrate-sensitive FET บนพื้นฐานเทคโนโลยี Ion-selective field effect transistor (ISFET) และ Alahi *et al.* (2016) ออกแบบ และพัฒนาเซ็นเซอร์แบบพกพาที่สามารถตรวจจับปริมาณไนเตรทพกพาในน้ำใต้ดิน นอกจากนี้ วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ (2557) มีการออกแบบเซ็นเซอร์ทางเคมีสำหรับตรวจวัดไอออนปรอทด้วยตาเปล่า เพื่อให้มีการตรวจวัดได้ง่าย และรวดเร็ว ไม่ต้องใช้เครื่องมือ ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ และสามารถประยุกต์ใช้ตรวจวัดในภาคสนาม และยังมีการนำเซ็นเซอร์มาใช้ในการตรวจวัดปริมาณไนเตรท หรือสารตัวอื่นโดย Nasser *et al.* (2018) ทดสอบการใช้ Nitrate ion selective ในการวัดปริมาณไนเตรทในน้ำ ดิน และพืช ที่มีปริมาณความเข้มข้นไนเตรทที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้ Nitrate ion selective สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ และ Parab *et al.* (2013) ทำการทดลองวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำโดยใช้วิธี Ion- Chromatography (IC) และ Ion Selective Electrode (ISE) แล้วนำมาหาค่าความสัมพันธ์กัน พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 เช่นเดียวกันกับ ชนิศนันท์ สุงาม และอัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ (2557) ใช้เซนเซอร์ในการวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบเชิงแสง เปรียบเทียบกับการหาปริมาณออกซิเจนด้วยวิธีการไทเทรต พบว่าวิธีการวัดโดยใช้เซนเซอร์เชิงแสงมีผลการวัดที่มีความแม่นยำ และเสถียรมากที่สุด

2.12 ผักกาดหอม

ผักสลัดหรือผักกาดหอมเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Asteraceae (Compositae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Lactuca sativa* L. เป็นพืชพื้นเมืองของทวีปยุโรป และเอเชีย ปลูกกันมานานไม่ต่ำกว่า 2,500 ปี นิยมปลูกกันมากในระบบปลูกแบบไม่ใช้ดิน เนื่องจากผักสลัดที่ได้จากระบบปลูกพืชไม่ใช้ดินจะสะอาด นอกจากนี้ผักสลัดยังได้รับความนิยมจากผู้บริโภคที่ใส่ใจในเรื่องสุขภาพ และผักสลัดยังเป็นแหล่งของสารอาหารที่มีคุณค่าทั้งวิตามิน และเกลือแร่ เช่น เบต้าคาโรทีน วิตามินซี เป็นต้น ซึ่งผู้บริโภคนิยมรับประทานเป็นผักสด และใช้จัดแต่งอาหารให้มีสีสันสวยงาม ความต้องการของผู้บริโภคมีตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในช่วงเทศกาลต่างๆ และยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคตจึงนับได้ว่าผักสลัดเป็นผักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง (สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์, 2538; อนุรักษ์ พ่วงพล, 2542; กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผักสลัดที่นิยมปลูก และเป็นที่ต้องการของตลาดในปัจจุบันมีอยู่ประมาณ 6 ชนิด ซึ่งเป็นสายพันธุ์จากต่างประเทศ ได้แก่ butterhead, cos, frillice, green oak, red oak และ red coral นอกจากนี้ยังมีพวก herb อีก 2 ชนิดคือ rocket และ mizuna ผักสลัดจะเจริญเติบโตได้ดีในฤดูหนาวทำให้ผักล้นตลาด การปลูกผักสลัดในฤดูร้อน และฤดูฝนจะเจริญเติบโตไม่ดี ส่งผลให้ผักสลัดขาดตลาดในฤดูดังกล่าว (อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2550)

2.13 สตรอว์เบอร์รี

สตรอว์เบอร์รี (strawberry : *Fragaria x ananassa* Duch.) เป็นพืชอายุหลายปี (herbaceous perennial) อยู่ในวงศ์กุหลาบ (Rosaceae) สกุลไม้ดอก (Fragaria) จัดเป็นไม้ผลขนาดเล็ก (small fruit) ลำต้นสั้นประมาณ 2.5 เซ็นติเมตร มีความสูงจากพื้นดิน 10-20 เซ็นติเมตร ความกว้างทรงพุ่ม 20-30 เซ็นติเมตร ใบเป็นใบประกอบ แต่ละใบประกอบด้วย 3 ใบย่อย มีขอบใบหยักคล้ายฟันเลื่อย ความยาวก้านใบ 15-30 เซ็นติเมตร มีระบบรากลึกเฉลี่ย 10-30 เซ็นติเมตร มีตาอยู่ 3 ชนิด คือ 1. ตาซึ่งเจริญไปเป็นลำต้น 2. ตาซึ่งเจริญไปเป็นไหล และ 3. ตาซึ่งเจริญไปเป็นดอก ออกดอกเป็นช่อ ผลมีลักษณะเป็นผลรวม (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

สายพันธุ์ของสตรอว์เบอร์รีสามารถจำแนกตามการตอบสนองต่ออุณหภูมิ และช่วงวันสำหรับการสร้างตาดอก ได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ 1) June bearing cultivar เป็นกลุ่มสายพันธุ์ที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ ความยาวของวันสั้นกว่า 11 ชั่วโมง ซึ่งในประเทศไทยปลูกบนที่สูง ได้แก่ พันธุ์พระราชทานเบอร์ 16 พันธุ์พระราชทานเบอร์ 70 พันธุ์พระราชทานเบอร์ 35 พันธุ์พระราชทาน 80 และพันธุ์เนียวโฮ (Neyho) 2) Ever bearing cultivar เป็นกลุ่มสายพันธุ์ที่ต้องการช่วงแสงของวันยาวเกิน 12 ชั่วโมงขึ้นไป ส่วนใหญ่ปลูกนอกฤดู ได้แก่ พันธุ์เจนีวา โอซาค บิวตี้ เป็นต้น และ 3) Day - neutral cultivar เป็นกลุ่มสายพันธุ์ที่ออกดอกได้ทั้งสภาพวันสั้น และสภาพวันยาว แต่มีปัญหาเรื่องการผลิตไหลได้น้อย ได้แก่ พันธุ์เซลวา และทริสตาร์ เป็นต้น (ศูนย์ส่งเสริม และพัฒนาอาชีพการเกษตรเชียงราย, 2554)

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดลองที่ 1 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก

1. แผนการทดลอง

ทำการทดลองเปรียบเทียบสูตรธาตุอาหารทางน้ำ และทางดิน โดยวางแผนการทดลองแบบ Complete Randomize Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 วิธีการให้ปุ๋ย คือ 1. การให้ปุ๋ยในรูปแบบสารละลาย มี 2 สูตร คือ 1) สารละลายธาตุอาหาร Yamazaki-strawberry (ธาตุอาหารทางน้ำสูตรที่ 1) และ 2) สารละลายธาตุอาหาร Yamazaki-adjusted (ปรับเพิ่มความเข้มข้นของ NO_3^-) (ธาตุอาหารทางน้ำสูตรที่ 2) ปริมาณของธาตุอาหารแสดงในตารางที่ 2 และ 2. การให้ปุ๋ยในรูปแบบเม็ด มี 2 สูตร คือ 1) ปุ๋ยอินทรีย์เคมี 1 (ธาตุอาหารทางดินสูตรที่ 1) และ 2) ปุ๋ยอินทรีย์เคมี 2 (ธาตุอาหารทางดินสูตรที่ 2) ปริมาณของธาตุอาหารแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก

สูตรสารละลายธาตุอาหาร	ชนิดธาตุอาหาร (ppm)								
	NO_3^-	NH_4^+	PO_4-P	K	Ca	Mg	SO_4-S	Fe	Mn
Yamazaki-strawberry	70	7	15	117	40	12	16	0.30	0.27
Yamazaki-adjusted	105	7	15	117	65	12	16	0.30	0.27

ตารางที่ 3 สูตรปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยอินทรีย์เคมี

ปุ๋ยอินทรีย์เคมี	N(%)	P_2O_5(%)	K_2O(%)
ปุ๋ยอินทรีย์เคมี 1	8	3	4
ปุ๋ยอินทรีย์เคมี 2	10	3	5

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทำการทดลอง ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี 2558 นำต้นพันธุ์สตรอว์เบอร์รีมาจากภาคเหนือ และปลูกทดลองในสภาพโรงเรือน (Evaporative cooling system) ที่อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 25 °C ทำการผสมวัสดุปลูกโดยใช้ขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 2:1 โดยปริมาตร บรรจุลงในกระถางปลูกขนาด 6x6 นิ้ว จากนั้นนำกระถางขึ้นวางบนชั้นปลูก ติดตั้งระบบการให้น้ำแบบหัวหยด (emitter) 1 หัวต่อกระถาง แล้วย้ายปลูกต้นไหล 1 ต้นต่อกระถาง

2.2 เริ่มให้ธาตุอาหารตามกรรมวิธีในช่วง 2 สัปดาห์หลังย้ายปลูก โดยให้สารละลายธาตุอาหารทั้ง 2 สูตรที่ระดับความเข้มข้น EC 1.0 mS/cm ในช่วงอายุ 2 สัปดาห์ และปรับเป็น 1.2 mS/cm ที่อายุ 4 สัปดาห์หลังย้ายปลูก และให้ธาตุอาหารทางดินทั้ง 2 ชนิด ในอัตรา 10 กรัมต่อกระถางทุกๆ 10 วัน ปรับค่าความเป็นกรด–ด่างของน้ำ และสารละลายธาตุอาหารอยู่ในระหว่าง 6.5–6.8 และให้ทุกวันๆ ละ 1 ครั้ง โดยให้เกินความสามารถของการอุ้มน้ำของวัสดุปลูก 30% (สังเกตจากการไหลออกก้นกระถางปลูก)

3. การเก็บบันทึกข้อมูล

วิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทในสารละลายจากการชะล้างธาตุอาหาร โดยทำการสุ่มเก็บน้ำที่ได้จากการชะล้างธาตุอาหารกรรมวิธีละ 3 ตัวอย่าง โดยนำถุงพลาสติกรองไว้ที่ก้นกระถาง หลังจากมีการให้ธาตุอาหารทางระบบน้ำ และให้น้ำแก่ต้นพืชเสร็จก็จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำไปวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยใช้วิธีทางเคมี (colorimetric method) (Catado *et al.*, 1975)

ดูดน้ำตัวอย่างมา 0.5 มิลลิลิตร เติม 5% salicylic acid ใน H_2SO_4 เข้มข้น 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 20 นาที แล้วเติม NaOH ลงไป 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 413 nm ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยคำนวณตามสมการที่ 1

$$\text{Nitrate} = ((a \times b)/c)/1{,}000 \quad \text{.....(สมการที่ 1)}$$

a = slope × absorbance

b = ปริมาตรสารละลาย

c = ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ดูดมา

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS for Window (Version 16.0) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

3.2 การทดลองที่ 2 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้าง และการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม

แบ่งเป็น 2 การทดลองย่อย คือ 2.1 การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ 10% และ 2.2 การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ 30% ทั้ง 2 การทดลองมีการวางแผน และเก็บข้อมูลเหมือนกัน

1. แผนการทดลอง

ทำการทดลองเปรียบเทียบสูตรธาตุอาหาร 2 สูตร วัสดุปลูก 4 ชนิด ต่อการชะล้าง และการสะสมไนเตรทในผักกาดหอมพันธุ์ grand rapid โดยวางแผนการทดลองแบบ split-plot ใน Completely Randomize Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ โดยมีกรรมวิธีดังต่อไปนี้

main-plot คือสูตรธาตุอาหารในรูปแบบสารละลาย 2 สูตร

1.1 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกผัก (ธาตุอาหารสูตรที่ 1)

1.2 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกผัก ซึ่งมีการปรับเพิ่มความเข้มข้นของ NO_3^- (ธาตุอาหารสูตรที่ 2) ปริมาณของธาตุอาหารแสดงในตารางที่ 4

sub-plot คือวัสดุปลูก 4 ชนิด ประกอบด้วย

1.1 ขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1

1.2 ขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 3:1

1.3 ขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1

1.4 ดินปลูก (กากหม้อกรอง: แกลบดำ: ปุ๋ยคอก: ดินเหนียวในอัตราส่วน 1:1:1:1)

ตารางที่ 4 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกผัก

ธาตุอาหาร (ppm)	สูตรธาตุอาหารที่ 1	สูตรธาตุอาหารที่ 2
NO_3^-	85	127
NH_4^+	9	9
PO_4-P	41	41
K	184	264
Ca	40	60
Mg	23	23
SO_4-S	31	31
Fe	2.1	2.1
Mn	0.39	0.39
Zn	0.03	0.03
Cu	0.04	0.04
B	0.17	0.17

ที่มา: สุดชล วุ้นประเสริฐ, 2555

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทำการทดลอง ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี 2559 โดยปลูกทดลองในสภาพโรงเรือน (Evaporative cooling system) ที่อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 27 °C นำขุยมะพร้าวที่จะใช้เป็นวัสดุปลูกแช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน เพื่อลดปริมาณสารแทนนิน และลิกนิน ล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วตากแดดให้แห้ง ทำการผสมวัสดุปลูกตามกรรมวิธีแล้วใส่ลงในกระถางขนาด 6x6 นิ้ว จากนั้นนำกระถางขึ้นวางบนชั้นปลูก ติดตั้งระบบการให้น้ำแบบหัวหยด (emitter) 1 หัวต่อกระถาง แล้วย้ายปลูกผักกาดหอมพันธุ์ Grand Rapid 1 ต้นต่อกระถาง

2.2 เริ่มให้ธาตุอาหารตามกรรมวิธีในช่วง 1 สัปดาห์หลังย้ายปลูก โดยให้สารละลายธาตุอาหารทั้ง 2 สูตรที่ระดับความเข้มข้น EC 1.1-1.6 mS/cm ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และสารละลายธาตุอาหารที่ 6.0 และให้ทุกวัน ๆ ละ 1 ครั้ง โดยให้เกินความสามารถของการอุ้มน้ำของวัสดุปลูกที่ 10% ในการทดลองที่ 2.1 และ 30% ในการทดลองที่ 2.2 (วัดปริมาณน้ำที่ไหลออกก้นกระถางปลูก)

3. การเก็บบันทึกข้อมูล

3.1 บันทึกการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเมื่ออายุครบ 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์หลังย้ายปลูกจำนวน 4 ต้นต่อซ้ำ โดย

- ความกว้างของทรงพุ่ม วัดจากส่วนที่กว้างที่สุดของทรงพุ่ม
- ความสูงของทรงพุ่ม วัดจากโคนต้นจนถึงจุดสูงสุดของทรงพุ่ม
- จำนวนใบ นับจากใบที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ซม.
- พื้นที่ใบ เมื่ออายุครบ 45 วัน ทำการวัดโดยใช้เครื่อง Leaf Area Meter
- น้ำหนักสดต่อต้นของผักกาดหอม โดยทำการเก็บเมื่ออายุครบ 45 วัน
- น้ำหนักแห้งต่อต้นของผักกาดหอม โดยนำส่วนของต้นพืชที่ผ่านการบันทึกน้ำหนักสดแล้วมาอบในตู้ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.2 วิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทในสารละลายจากการชะล้างธาตุอาหาร

สุ่มเก็บน้ำที่ได้จากการชะล้างธาตุอาหาร โดยเก็บกรรมวิธีละ 4 ตัวอย่าง โดยนำถ้วยพลาสติกรองไว้ที่ก้นกระถาง หลังจากมีการให้ธาตุอาหารทางระบบน้ำ และให้น้ำแก่ต้นพืชเสร็จก็จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำไปวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยใช้วิธีทางเคมี (colorimetric method) (Catado *et al.*, 1975)

ดูดน้ำตัวอย่างมา 0.5 มิลลิลิตร เติม 5% salicylic acid ใน H_2SO_4 เข้มข้น 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 20 นาที แล้วเติม NaOH ลงไป 20 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 413 nm ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยคำนวณหาปริมาณไนเตรทตามสมการที่ 1

3.3 วิเคราะห์หาปริมาณสารไนเตรทที่สะสมในต้นพืช

นำตัวอย่างพืชสดไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนแห้งแล้วนำไปบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1 มิลลิเมตร ชั่งตัวอย่างพืชแห้ง 0.1 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนออก แล้วนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ (ญาดา วงศ์พรประทีป, 2550) หาปริมาณสารไนเตรทด้วยวิธีเคมี (colorimetric method) (Catado *et al.*, 1975)

3.4 วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในพืชด้วยวิธี Kjeldahl (โครงการจัดตั้งเครือข่ายห้องปฏิบัติการการวิเคราะห์ดิน และพืช, 2546)

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS for Window (Version 16.0) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

3.3 การทดลองที่ 3 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้นต่อการสะสมไนเตรทในผักกาดหอมที่ปลูกในระบบ Deep Flow Technique (DFT)

1. แผนการทดลอง

ทำการทดลองเปรียบเทียบสูตรธาตุอาหาร และระดับความเข้มข้นของธาตุอาหารที่แตกต่างกันในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินในระบบ DFT โดยวางแผนการทดลองแบบ factorial ใน RCBD จำนวน 3 ซ้ำ 2 ปัจจัย โดยมีกรรมวิธีดังต่อไปนี้

ปัจจัยที่ 1 คือสูตรธาตุอาหารในรูปแบบสารละลาย 2 สูตร

1. สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกผัก (ธาตุอาหารสูตรที่ 1)
2. สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกผักซึ่งมีการปรับเพิ่มความเข้มข้นของ NO_3^- (ธาตุอาหารสูตรที่ 2) โดยใช้สูตรธาตุอาหารเดียวกันกับการทดลองที่ 2 ปริมาณของธาตุอาหารแสดงในตารางที่ 4

ปัจจัยที่ 2 คือค่าความเข้มข้นของธาตุอาหาร 2 ระดับ โดยใช้ค่า EC เป็นตัวกำหนด

1. ค่าความเข้มข้น EC 1.5 mS/cm
2. ค่าความเข้มข้น EC 2.0 mS/cm

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทำการทดลอง ณ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี 2559 โดยปลูกทดลองในสภาพโรงเรือน (Evaporative cooling system) ที่อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 27 °C

2.2 เพาะเมล็ดผักกาดหอมพันธุ์ Grand Rapid ในเพอร์ไลท์ เมื่อต้นกล้าอายุครบ 2 สัปดาห์เลือกต้นกล้าที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ย้ายลงโต๊ะปลูกในระบบ DFT จำนวน 16 ต้นต่อรางปลูก ปรับค่าความเข้มข้น EC และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และสารละลายธาตุอาหารที่ 6.0 ทุก 2 วัน

3. การเก็บบันทึกข้อมูล

3.1 บันทึกการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเมื่ออายุครบ 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์หลังย้ายปลูก จำนวน 4 ต้นต่อซ้ำ โดย

- ความกว้างของทรงพุ่ม วัดจากส่วนที่กว้างที่สุดของทรงพุ่ม
- ความสูงของทรงพุ่ม วัดจากโคนต้นจนถึงจุดสูงสุดของทรงพุ่ม
- จำนวนใบ นับจากใบที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ซม.
- พื้นที่ใบ เมื่ออายุครบ 45 วัน ทำการวัดโดยใช้เครื่อง Leaf Area Meter
- น้ำหนักสดต่อต้นของผักกาดหอม โดยทำการเก็บเมื่ออายุครบ 45 วัน
- น้ำหนักแห้งต่อต้นของผักกาดหอม โดยนำส่วนของต้นพืชที่ผ่านการบันทึกน้ำหนักสด แล้วมา

มาอบในตู้ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.2 วิเคราะห์หาปริมาณสารไนเตรทที่สะสมในต้นพืช

นำตัวอย่างพืชสดไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนแห้งแล้วนำไปบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1 มิลลิเมตร ชั่งตัวอย่างพืชแห้ง 0.1 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนออก แล้วนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ (ญาดา วงศ์-พรประทีป, 2550) หาปริมาณสารไนเตรทด้วยวิธีเคมี (colorimetric method) (Catado *et al.*, 1975)

3.3 วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในใบ ด้วยวิธี Kjeldahl (โครงการจัดตั้งเครือข่ายห้องปฏิบัติการการวิเคราะห์ดิน และพืช, 2546)

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS for Window (Version 16.0) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

3.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ไนเตรทในสารละลายโดยวิธีการทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์

ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ไนเตรทในสารละลายจากการชะล้างธาตุอาหารโดยวิธีการทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์จากการทดลองที่ 1 และ 2

1. วิธีการทดลอง

1.1 นำน้ำตัวอย่างที่มีปริมาณไนเตรทในสารละลายที่ได้จากการชะล้างในการปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูกจำนวน 12 ตัวอย่าง (การทดลองที่ 1) มาวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์ในระยะเวลา 7 สัปดาห์ ทำการวัด 1 ครั้งต่อ 1 สัปดาห์ โดยมีการใช้เซ็นเซอร์ตัวเดียวกันในการวัดตลอดระยะเวลา 7 สัปดาห์

1.2 นำน้ำตัวอย่างที่มีปริมาณไนเตรทในสารละลายที่ได้จากการชะล้างในการปลูกผักกาดหอมในวัสดุปลูกจำนวน 48 ตัวอย่าง (การทดลองที่ 2) มาวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์ แบ่งช่วงลำดับการวัดตัวอย่างที่ 1–10, 11–20, 21–30, 31–40 และ 41–48 ทำการวัด 1 ครั้งต่อ 1 สัปดาห์ โดยใช้เซ็นเซอร์ตัวเดียวกันตลอดช่วงลำดับการวัด ซึ่งทำการทดลองในระยะเวลา 4 สัปดาห์

2. การเก็บบันทึกข้อมูล

2.1 วิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี colorimetric ด้วย salicylic (Catado et al., 1975)

ดูดน้ำตัวอย่างมา 0.5 มิลลิลิตร เติม 5% salicylic acid ใน H_2SO_4 เข้มข้น 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 20 นาที แล้วเติม NaOH ลงไป 20 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืน

คลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 413 nm ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยคำนวณหาปริมาณไน-เตรท ตามสมการที่ 1

2.2 วิธีการวัดหาปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์

เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ที่ระดับความเข้มข้น 5 ppm, 20 ppm และ 60 ppm แล้ว calibration หัววัดโดยใช้สารละลายมาตรฐาน KNO_3 โดยเริ่มวัดที่ระดับความเข้มข้นต่ำไปสูง จำนวน 2 ครั้ง และอ่านค่า R^2 ของการ calibration โดยควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.95-0.99 วัดตัวอย่างสารละลาย โดยจุ่มหัววัดลงในตัวอย่างสารละลาย กดอ่านค่ารอประมาณ 5 นาที จะมีการแสดงผลปริมาณสารไนเตรทที่สามารถวัดได้ โดยมีหน่วยการวัด เป็น ppm (วรพันธุ์ ไชยศรีรัตนากูล และคณะ, 2559)

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS for Window (Version 16.0) โดยวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (regression) ระหว่างวิธีการวัดโดยวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

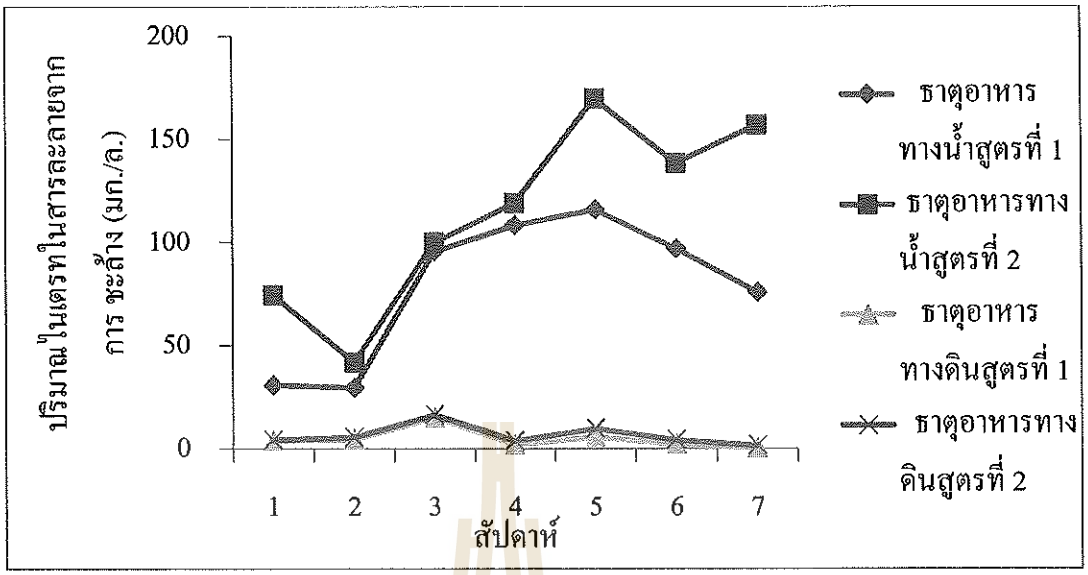
บทที่ 4

ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

4.1 การทดลองที่ 1 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก

4.1.1 ปริมาณไนเตรทในสารละลาย

จากการเปรียบเทียบผลของสูตรธาตุอาหารต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูก โดยใช้วิธีวิเคราะห์ไนเตรทในสารละลายที่ผ่านการชะล้างจากวัสดุปลูกด้วยวิธีทางเคมี พบว่าปริมาณไนเตรทในสารละลายจากวิธีที่มีการให้ธาตุอาหารต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติในสัปดาห์ที่ 1–7 โดยกรรมวิธีที่มีการให้ธาตุอาหารทางน้ำจะมีปริมาณไนเตรทมากกว่าการให้ธาตุอาหารทางดิน และพบว่าในกรรมวิธีที่ 2 (ธาตุอาหารทางน้ำสูตรที่ 2 ที่มี N สูง) มีปริมาณไนเตรทสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทในสูตรธาตุอาหารมากกว่ากรรมวิธีอื่น รองลงมาคือกรรมวิธีที่ 1 (ธาตุอาหารทางน้ำสูตรที่ 1 ที่มี N ต่ำ) กรรมวิธีที่ 4 (ธาตุ-อาหารทางดินสูตรที่ 2 ที่มี N สูง) และกรรมวิธีที่ 3 (ธาตุอาหารทางดินสูตรที่ 1 ที่มี N ต่ำ) ตามลำดับ (ภาพที่ 2) ผลการทดลองสอดคล้องกับ Asadi, *et al.* (2002) ซึ่งศึกษาการให้ธาตุอาหารในอัตราต่างกันต่อการชะล้างไนเตรท และผลผลิตข้าวโพดในดินกรด พบว่าการให้ธาตุอาหารไนโตรเจนในอัตราสูงจะมีการชะล้างไนเตรทสูงที่สุด ซึ่งปริมาณการชะล้างไนเตรทจะสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำฝนมาก โดยธาตุอาหารที่ละลายอยู่ในน้ำที่ให้กับวัสดุปลูกจะดูดซับไว้ได้น้อย แต่ธาตุอาหารทางดินจะค่อยๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารทำให้ธาตุอาหารทางน้ำมีการชะล้างมากกว่าธาตุอาหารทางดิน



ภาพที่ 2 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำที่ได้จากการชะล้างต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันทั้ง 7 สัปดาห์

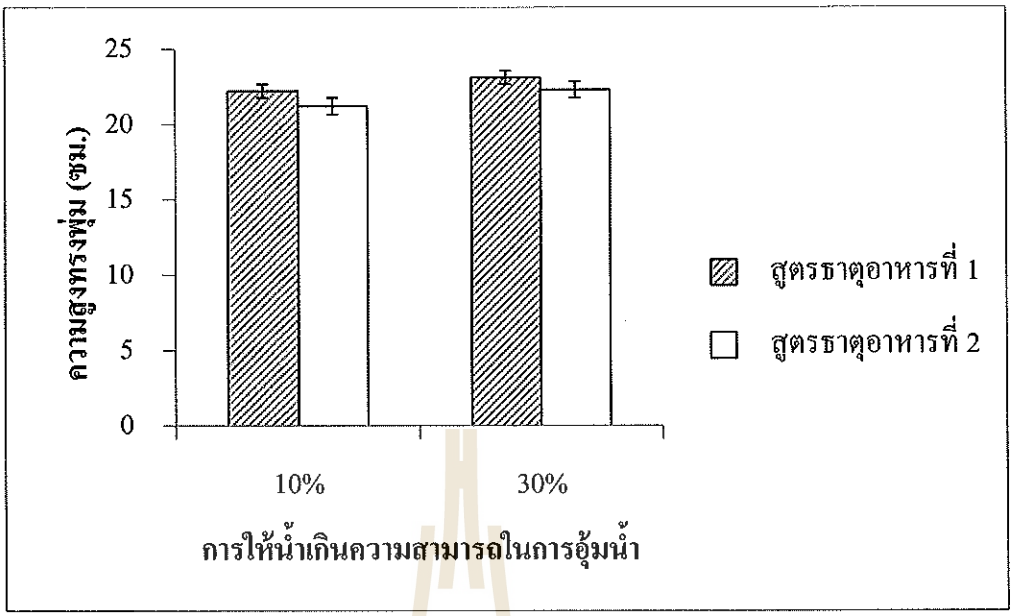
4.2 การทดลองที่ 2 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้าง และการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม

4.2.1 การเจริญเติบโต

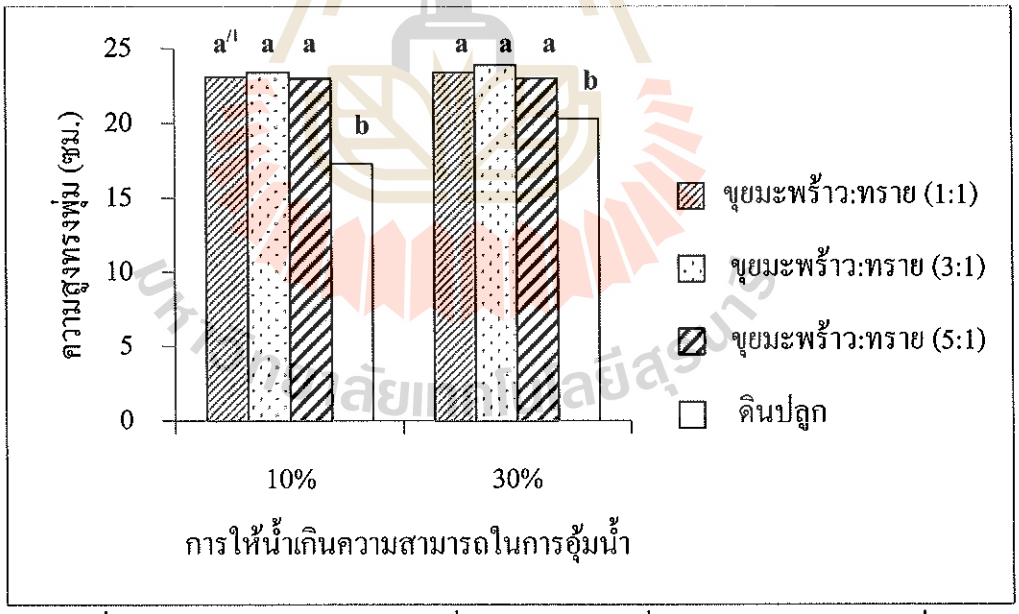
ความสูง

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์ (interaction) กันต่อความสูงของผักกาดหอมระหว่างการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ทำให้ธาตุอาหารสูตรที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความสูงมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 22.2 และ 21.1 เซนติเมตร ตามลำดับ และพบว่าวัสดุปลูก 4 ชนิด มีค่าความสูงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 23.4, 23.1, 23.0 และ 17.3 เซนติเมตร สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 3:1, 1:1, 5:1 และดินปลูกตามลำดับ (ภาพที่ 3 และ 4)

ในขณะที่การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% พบว่าค่าความสูงเฉลี่ยทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่วัสดุปลูก 4 ชนิด มีค่าความสูงเฉลี่ยของทรงพุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 23.9, 23.4, 23.0 และ 20.3 ซม. สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 3:1, 1:1, 5:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 3 และ 4)



ภาพที่ 3 ความสูงทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

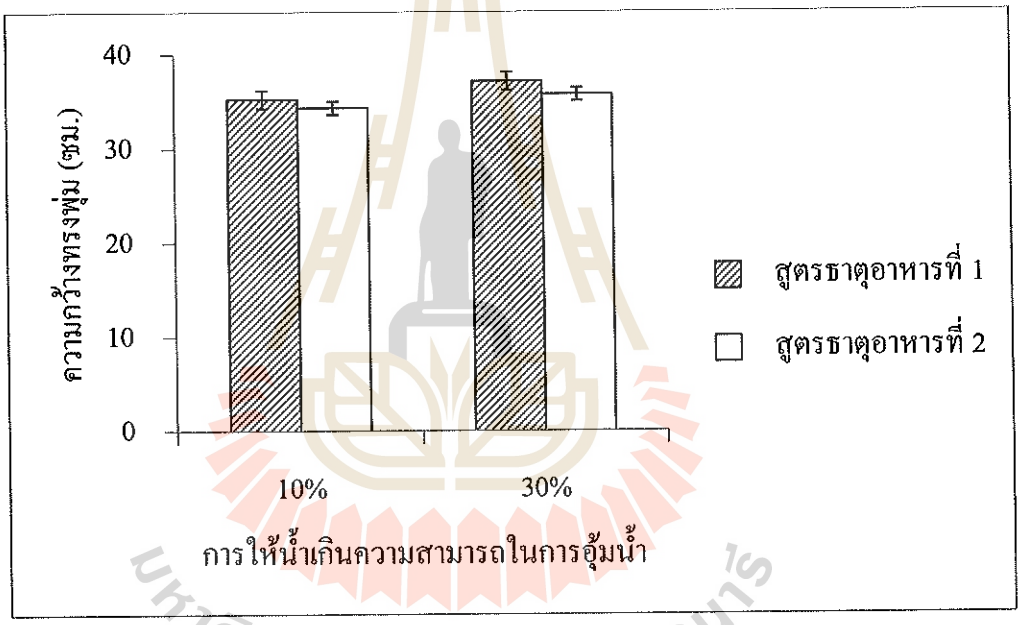


/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

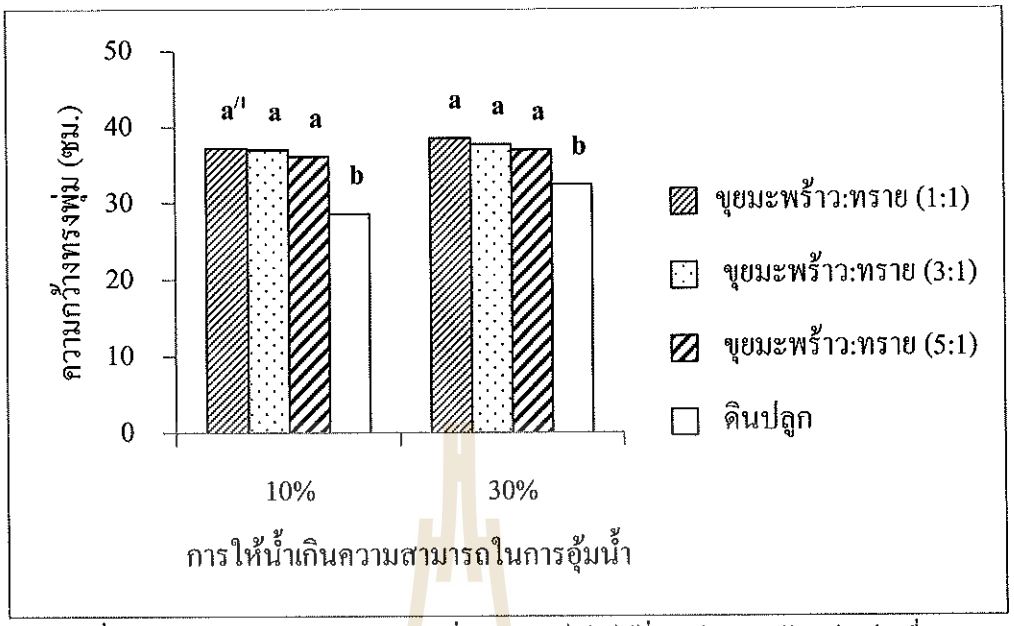
ภาพที่ 4 ความสูงทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

ความกว้างทรงพุ่ม

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมระหว่างการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ทำให้ความกว้างทรงพุ่มในทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่วัสดุปลูก 4 ชนิด มีความกว้างทรงพุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ มีค่าเฉลี่ย 37.2, 37.0, 36.1 และ 28.6 เซนติเมตร โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 3:1, 5:1 และดินปลูก ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย 38.5, 37.7, 37.0 และ 32.4 เซนติเมตร ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 3:1, 5:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 5 และ 6)



ภาพที่ 5 ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันและการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%



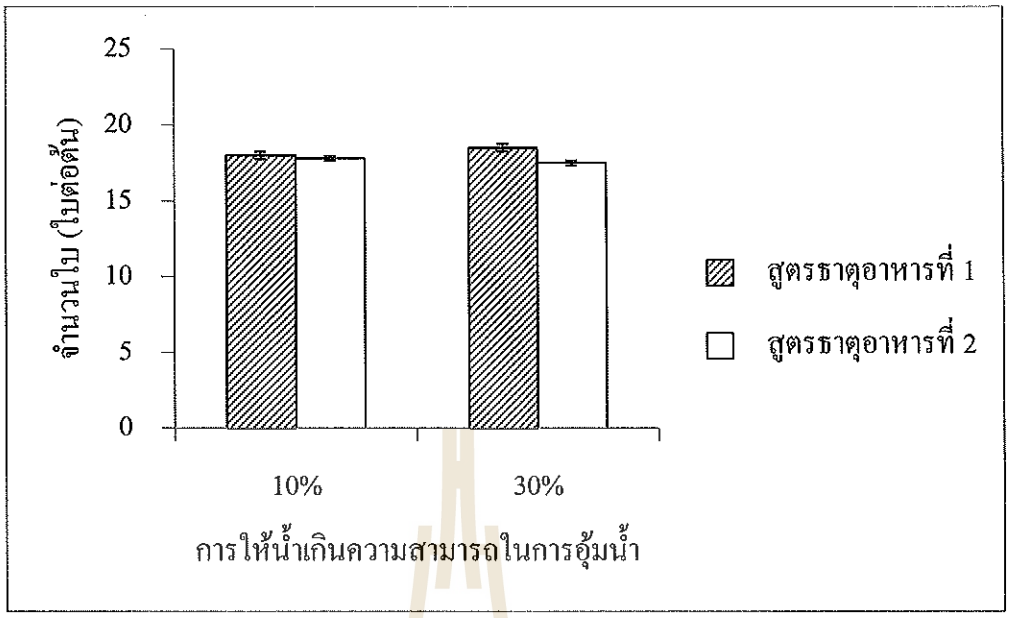
/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 6 ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

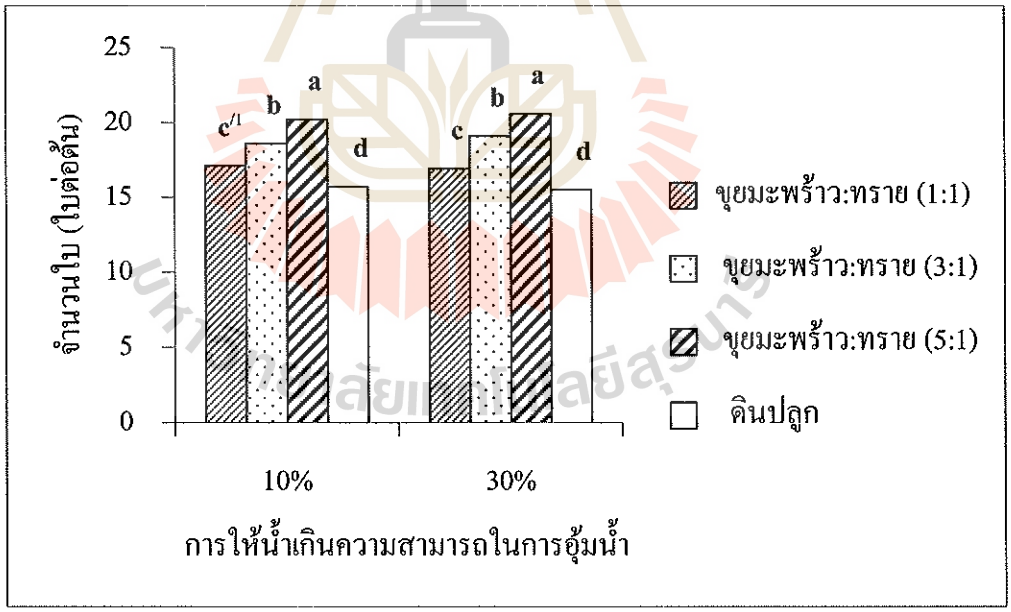
จำนวนใบ

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อจำนวนใบของผักกาดหอมระหว่างการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ทำให้จำนวนใบในทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่วัสดุปลูก 4 ชนิด มีจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 20.2, 18.6, 17.1 และ 15.7 ใบต่อต้น สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 7 และ 8)

ในขณะที่การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% พบว่าธาตุอาหารสูตรที่ 1 มีจำนวนใบมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ย 18.5 และ 17.5 ใบต่อต้น ตามลำดับ และพบว่าวัสดุปลูก 4 ชนิด มีจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 20.6, 19.1, 16.9 และ 15.5 ใบต่อต้น สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 7 และ 8)



ภาพที่ 7 จำนวนใบของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

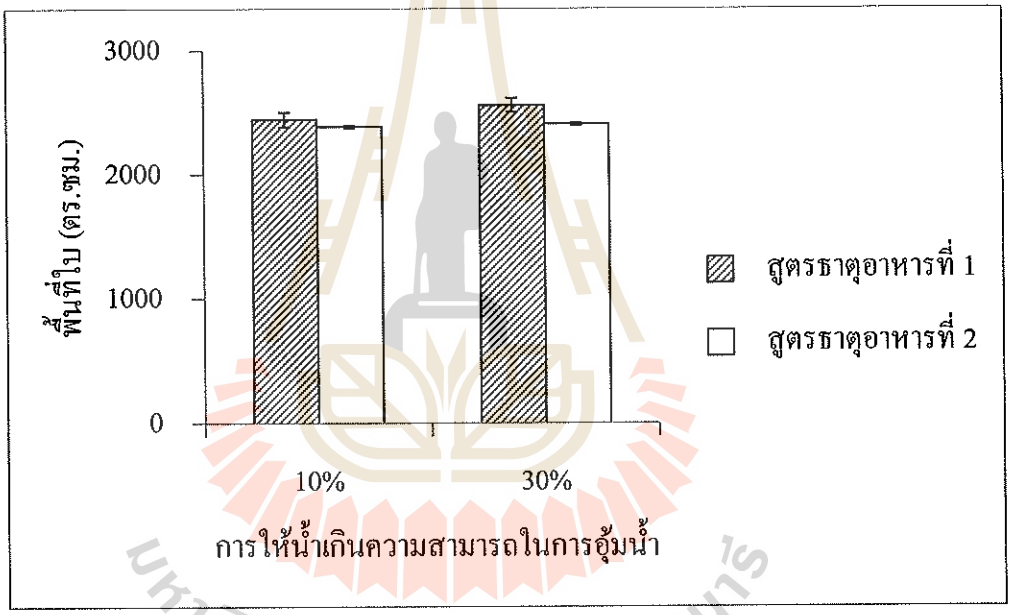


[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 8 จำนวนใบของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

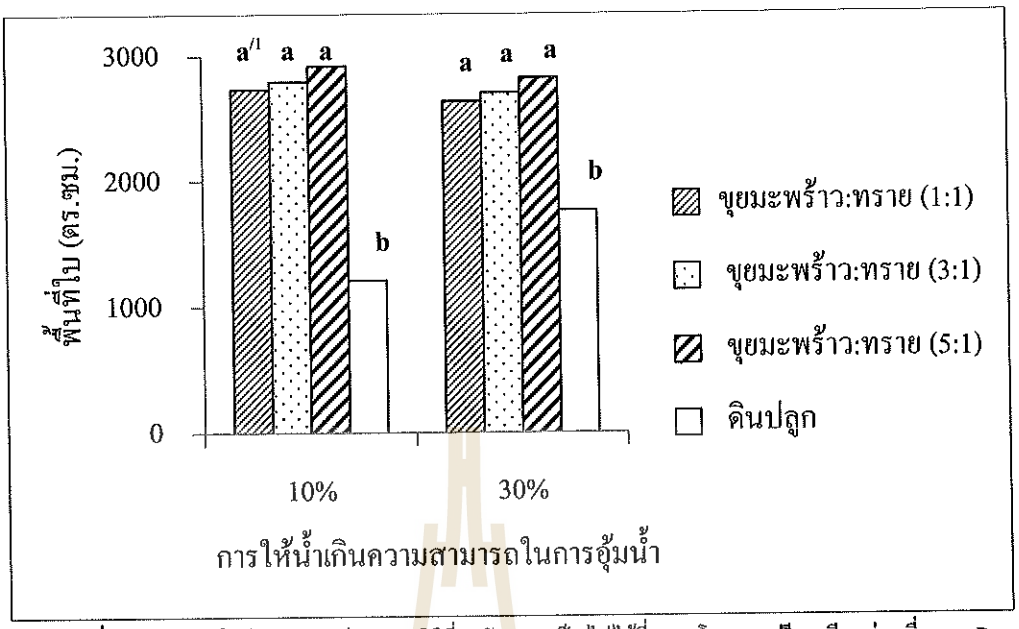
พื้นที่ใบ

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อพื้นที่ใบของผักกาดหอมระหว่างการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ทำให้พื้นที่ใบทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่วัสดุปลูก 4 ชนิด มีพื้นที่ใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 2,919, 2796, 2,735 และ 1,209 ตารางเซนติเมตร ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย 2,824, 2705, 2,637 และ 1,763 ตารางเซนติเมตร ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 9 และ 10)



ภาพที่ 9 พื้นที่ใบของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



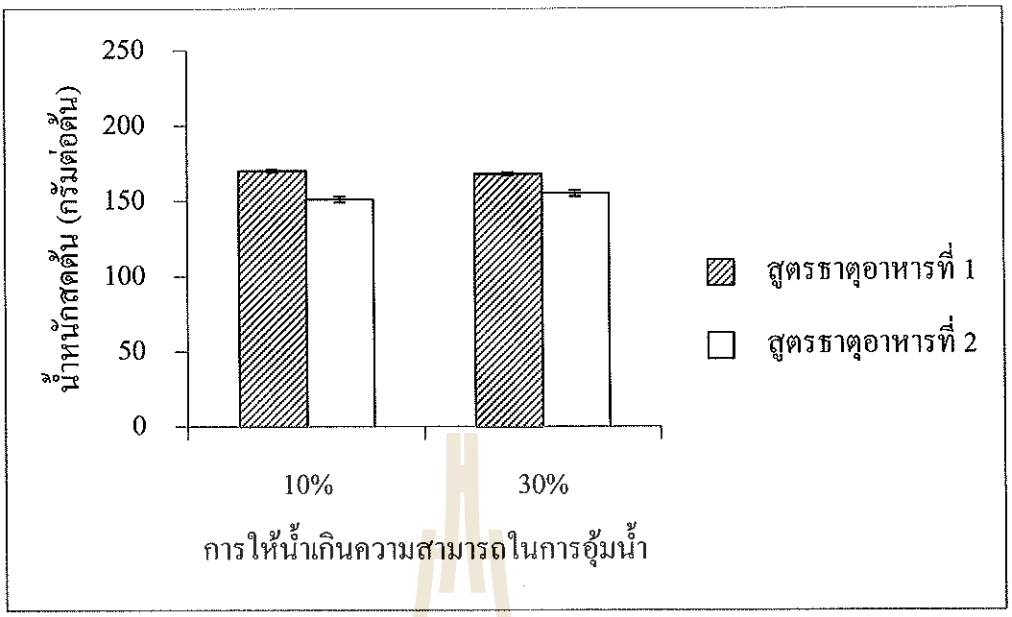
/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 10 พื้นที่ใบของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

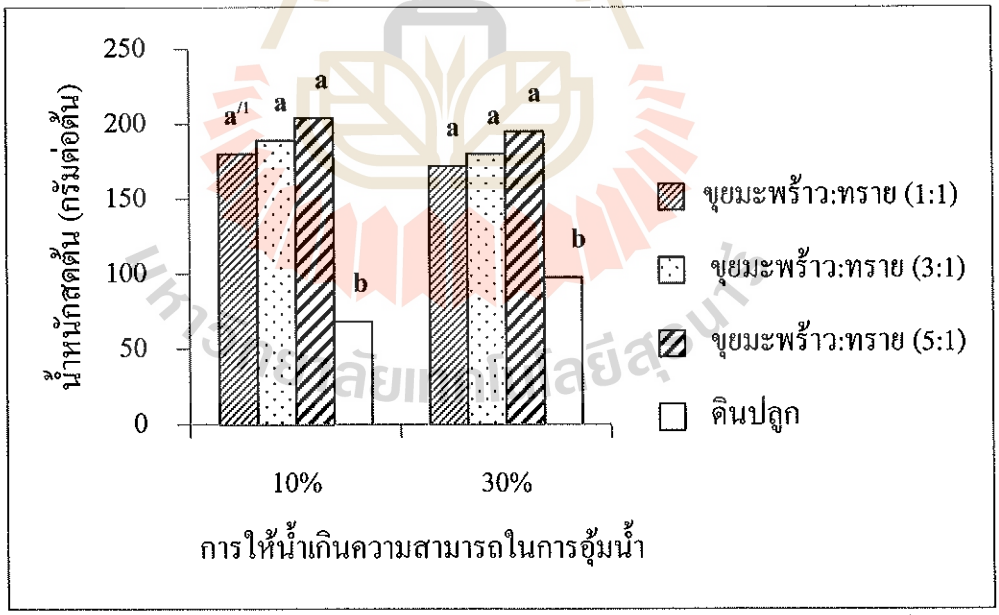
น้ำหนักสดต้น

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อน้ำหนักสดต้นของผักกาดหอมระหว่างการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ทำให้ธาตุอาหารสูตรที่ 1 มีน้ำหนักสดต้นมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 170 และ 151 กรัมต่อต้น ตามลำดับ และทำให้วัสดุปลูก 4 ชนิด มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 204, 189, 180 และ 68 กรัมต่อต้น สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 11 และ 12)

ในขณะที่การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% ทำให้น้ำหนักสดต้นทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่วัสดุปลูก 4 ชนิด มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 195, 180, 172 และ 97.7 กรัมต่อต้น สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 11 และ 12)



ภาพที่ 11 น้ำหนักสดต้นของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%



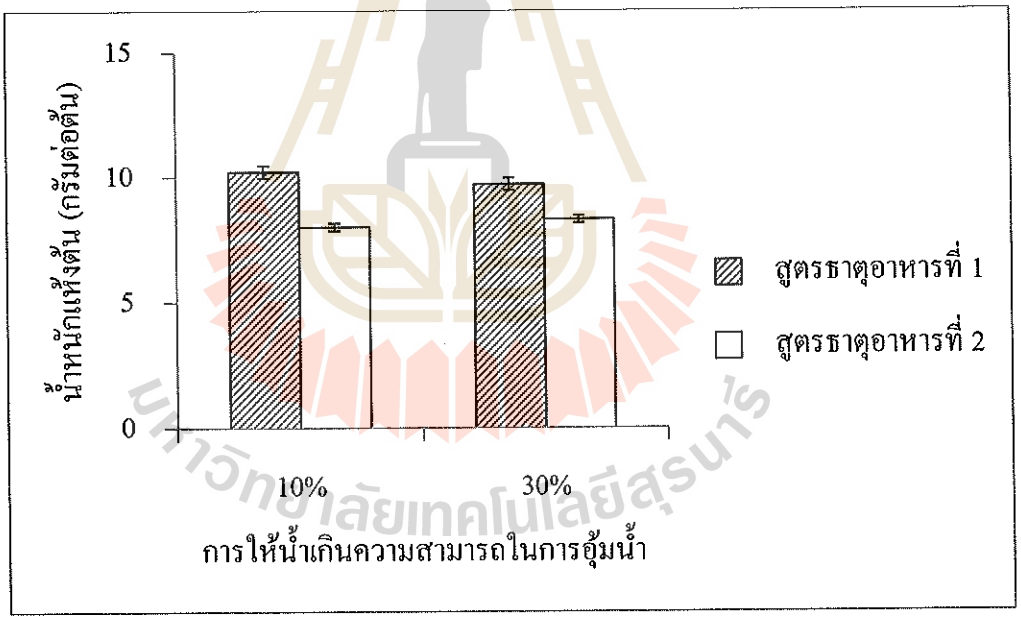
/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 12 น้ำหนักสดต้นของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

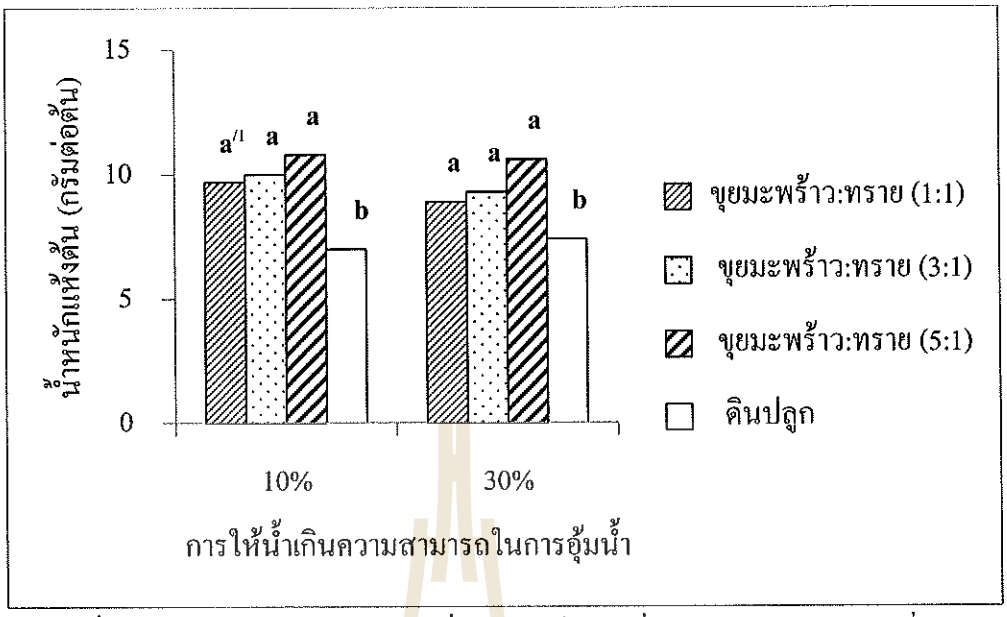
น้ำหนักแห้งต้น

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อน้ำหนักแห้งต้นของผักกาดหอมระหว่างการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ทำให้ธาตุอาหารสูตรที่ 1 มีน้ำหนักแห้งต้นมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 10.2 และ 8.0 กรัมต่อต้น ตามลำดับ และทำให้วัสดุปลูก 4 ชนิด มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งต้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 10.8, 10.0, 9.7 และ 7.0 กรัมต่อต้น สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 13 และ 14)

ในขณะที่การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% ทำให้น้ำหนักแห้งต้นทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่วัสดุปลูก 4 ชนิด มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งต้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 10.6, 9.3, 8.9 และ 7.4 กรัมต่อต้น สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 3:1, 1:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 13 และ 14)



ภาพที่ 13 น้ำหนักแห้งต้นของผักกาดหอมต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันและการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%



/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 14 น้ำหนักแห้งต้นของผักกาดหอมต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

เมื่อพิจารณาผลการทดลองการเจริญเติบโต (ความสูง ความกว้าง จำนวนใบ พื้นที่ใบ น้ำหนักสดต้น และน้ำหนักแห้งต้น) ในวัสดุปลูกที่ต่างกัน พบว่าการใช้วัสดุขุยมะพร้าวผสมทราย ทำให้การเจริญเติบโตดีกว่าการใช้ดินปลูก เนื่องจากขุยมะพร้าวกับทรายเมื่อผสมกันแล้วมีสถานะทางกายภาพที่ดีกว่าการใช้ดินปลูก โดยทำให้มีการถ่ายเทอากาศ และการถ่ายเทน้ำได้สะดวก ไม่อัดตัวกันแน่นเมื่อได้รับน้ำ (เมธิน ศิริวงษ์, 2536; อภิรักษ์ หลักชัยกุล, 2539) ซึ่งวัสดุปลูกขุยมะพร้าวมีข้อดี คือ มีน้ำหนักเบา อุ้มน้ำได้ดี มีปริมาณโพแทสเซียมสูง แต่มีปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสต่ำ (วิทยา สุริยาภณานนท์, 2524; สมเพียรเกษมทรัพย์, 2525) ข้อเสีย คือ การถ่ายเทน้ำ และอากาศไม่สะดวก และมีการอัดตัวกันแน่นเมื่อได้รับน้ำ ส่วนทรายมีข้อดี คือ หาง่าย ราคาถูก ระบายน้ำได้ดี (สนั่น ขำเลิศ, 2522; Douglas, 1988) ข้อเสีย คือ มีน้ำหนักมาก อุ้มน้ำ และเก็บสะสมธาตุอาหารได้น้อย (ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และสรสิทธิ์ วัชโรทยาน, 2531) อุมาวดี ลิ้มเสถียรกุล (2546) พบว่าต้นผักกาดหอมพันธุ์ red oak ที่ปลูกในวัสดุปลูกขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตราส่วน 3:1 มีจำนวนใบต่อต้นมากกว่าต้นที่ปลูกในทรายล้วน แสดงให้เห็นว่าการผสมทรายลงไปในขุยมะพร้าวนอกจากทำให้วัสดุมีการถ่ายเทน้ำ และอากาศได้ดีทำให้พืชมีประสิทธิภาพในการดูดธาตุอาหารได้มากขึ้น โดยวิธี active absorption ปริมาณธาตุอาหารที่พืชดูดได้มากขึ้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงสร้างอาหารหลักของพืช เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และฮอร์โมนพืช โดยจะเห็น

ได้ว่ามีการผลิใบใหม่ (leaf primordium formation) ของต้นผักกาดหอมมากกว่าที่ปลูกในดิน

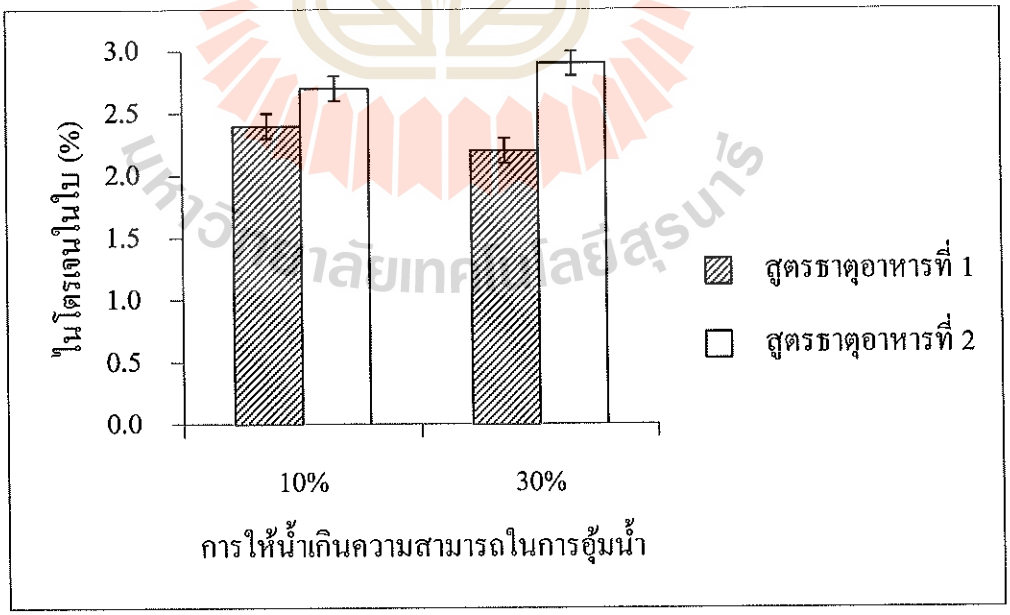
เมื่อพิจารณาผลการทดลองการเจริญเติบโตจากธาตุอาหารที่แตกต่างกัน พบว่าธาตุอาหารสูตรที่ 1 ทำให้มีน้ำหนักสดเฉลี่ยมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% แสดงว่าการให้ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนในระดับที่สูงขึ้นไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการสังเคราะห์โปรตีนของต้นผักกาดหอม ซึ่งเพ็ญนภา ไชยกูล (2546) พบว่าน้ำหนักสดของต้นผักกาดหอม red oak ที่ปลูกในความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน 105, 115 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร น้อยกว่าที่ปลูกในความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน 85 และ 95 มิลลิกรัมต่อลิตร และการให้ไนโตรเจนในระดับ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ต้นผักกาดหอมมีการเจริญเติบโตในทุกๆด้านน้อยที่สุด ทั้งนี้การให้ไนโตรเจนในรูปไนเตรท และแอมโมเนียม เมื่อเข้าสู่พืชไนเตรทจะถูกรีดิวส์ไปเป็นแอมโมเนียม และแอมโมเนียมทั้งหมดจะเข้าสู่กระบวนการ amination โดยรวมตัวกับ keto acid และเข้าสู่กระบวนการ transmination ซึ่งจะใช้คาร์บอน (carbon skeleton) มาเป็นสารหลักในการเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนชนิดต่างๆ โดยเฉพาะ glutamate และถ้าหากภายในเซลล์ของใบพืชยังมีแอมโมเนียมอยู่เป็นจำนวนมาก เอนไซม์ glutamine synthetase จะทำงานโดยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการรวมตัวของ glutamine กับแอมโมเนียม เกิดเป็น glutamate เพื่อลดพิษจากการสะสมแอมโมเนียมภายในเซลล์พืช จากกระบวนการดังกล่าวพืชจะต้องใช้คาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงจำนวนมาก เป็นผลให้พืชขาดแคลนโครงคาร์บอนที่จะนำไปใช้สร้างเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ทำให้ไม่มีการขยายขนาดของเซลล์ และไม่เกิดการแบ่งเซลล์ การเจริญเติบโตในด้านต่างๆของผักกาดหอมที่ปลูกในความเข้มข้นของไนโตรเจน 125 มิลลิกรัมต่อลิตรจึงมีการเจริญเติบโตน้อยที่สุด และพบว่าธาตุอาหารทั้ง 2 สูตรทำให้น้ำหนักสดต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% แต่ธาตุอาหารสูตรที่ 1 มีแนวโน้มน้ำหนักสดต้นมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 2 ทั้งนี้พืชจะตอบสนองต่อการเพิ่มธาตุอาหารไนโตรเจนมากที่สุดในช่วงที่พืชขาดไนโตรเจนจนถึงพืชได้รับไนโตรเจนอย่างเพียงพอ แต่การตอบสนองของธาตุอาหารไนโตรเจนของพืชจะไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อพืชได้รับไนโตรเจนเพิ่มมากจนเกินพอ (สมพร คนยงค์, 2551) ซึ่งสอดคล้องกับธาตุอาหารสูตรที่ 2 ที่มีการเพิ่มปริมาณไนเตรท แต่มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากธาตุอาหารสูตรที่ 1 ที่ไม่มีการปรับเพิ่มปริมาณไนเตรท

4.1.2 ปริมาณไนโตรเจนในใบ

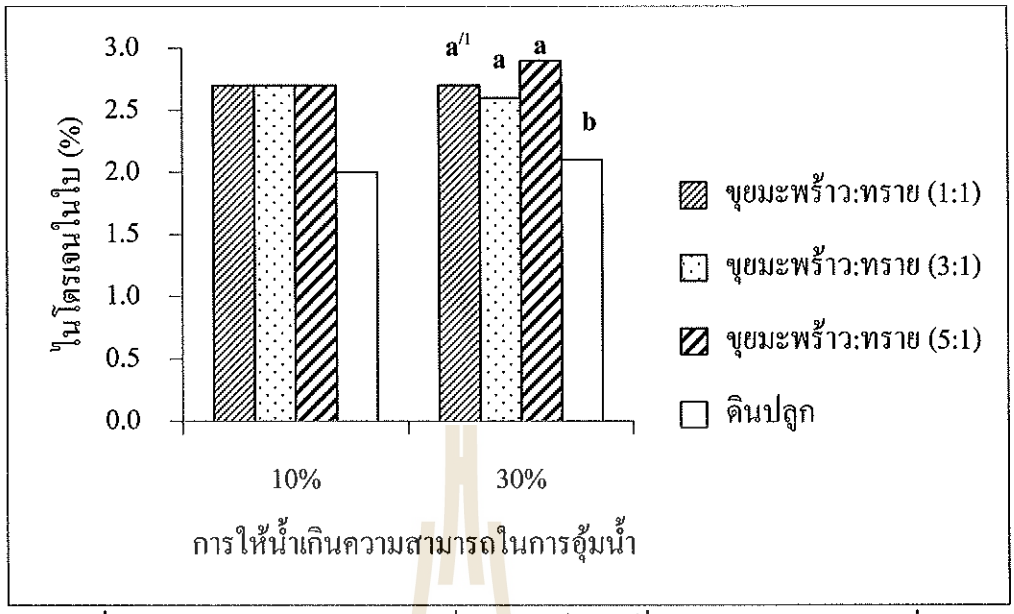
จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อปริมาณไนโตรเจนในใบทั้งการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในใบในทั้ง 2 สูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูก 4 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ภาพที่ 15 และ 16)

ในขณะที่การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% ทำให้ธาตุอาหารสูตรที่ 2 มีปริมาณไนโตรเจนในใบมากกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 2.9 และ 2.2% ตามลำดับ และทำให้วัสดุปลูก 4 ชนิดมีปริมาณไนโตรเจนในใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 2.9, 2.7, 2.6 และ 2.1% สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1, 1:1, 3:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 15 และ 16)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองปริมาณไนโตรเจนในใบจากการปลูกในวัสดุปลูกที่ต่างกัน พบว่าการใช้วัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายจะมีปริมาณไนโตรเจนในใบมากกว่าการใช้ดินปลูก เป็นเพราะว่าในวัสดุปลูกมีสถานะทางกายภาพที่ดีกว่าดินปลูก (เมธิน ศิริวงษ์, 2536; อภิรักษ์ หลักชัยกุล, 2539) ทำให้มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าจึงส่งผลให้การดูดใช้ธาตุอาหาร และการสะสมธาตุไนโตรเจนในใบของวัสดุปลูกมีมากกว่าดินปลูก และผลการทดลองสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อปริมาณไนโตรเจนในใบ พบว่าสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติโดยสูตรธาตุอาหารที่ 2 ที่มีการปรับเพิ่มปริมาณไนเตรทจะมีปริมาณไนโตรเจนในใบสูงกว่าสูตรธาตุอาหารที่ 1 ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cheng *et al.* (2014) ที่พบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในใบจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น และสอดคล้องกับการศึกษาของรุ่งนภา ช่างเจรจา และพรรณี ดอยพนาสุข (2558) ที่พบว่าการให้ธาตุอาหารไนโตรเจนในต้นชมจันทร์ในอัตราสูงทำให้มีปริมาณไนโตรเจนในใบสูงเช่นกัน



ภาพที่ 15 ปริมาณไนโตรเจนในใบหลังการเก็บเกี่ยวจากการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันและการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%



/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

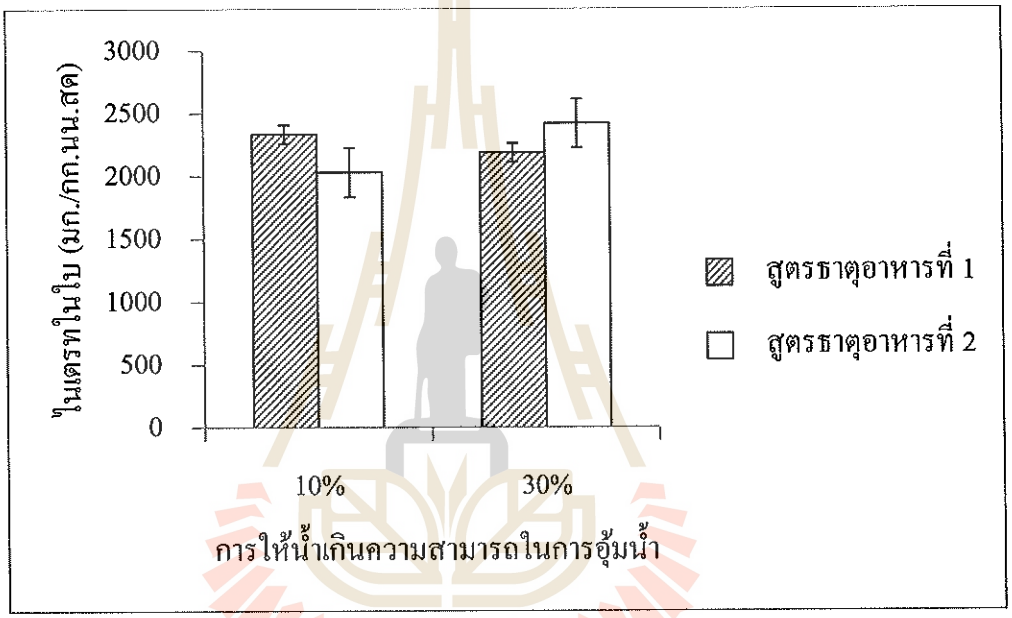
ภาพที่ 16 ปริมาณไนโตรเจนในใบหลังการเก็บเกี่ยวจากการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

4.1.3 ปริมาณไนเตรทในใบ

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อปริมาณไนเตรทในใบทั้งการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ไม่ทำให้ปริมาณไนเตรทในใบทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารแตกต่างกันทางสถิติ แต่ทำให้วัสดุปลูก 4 ชนิด มีปริมาณไนเตรทในใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 2,695, 2,004, 1,822 และ 1,613 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด สำหรับดินปลูก, วัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 3:1, 5:1 และ1:1 ตามลำดับ ในขณะที่การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% ไม่ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทในทั้ง 2 สูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูก 4 ชนิดมีปริมาณไนเตรทในใบแตกต่างกันทางสถิติ (ภาพที่ 17 และ 18)

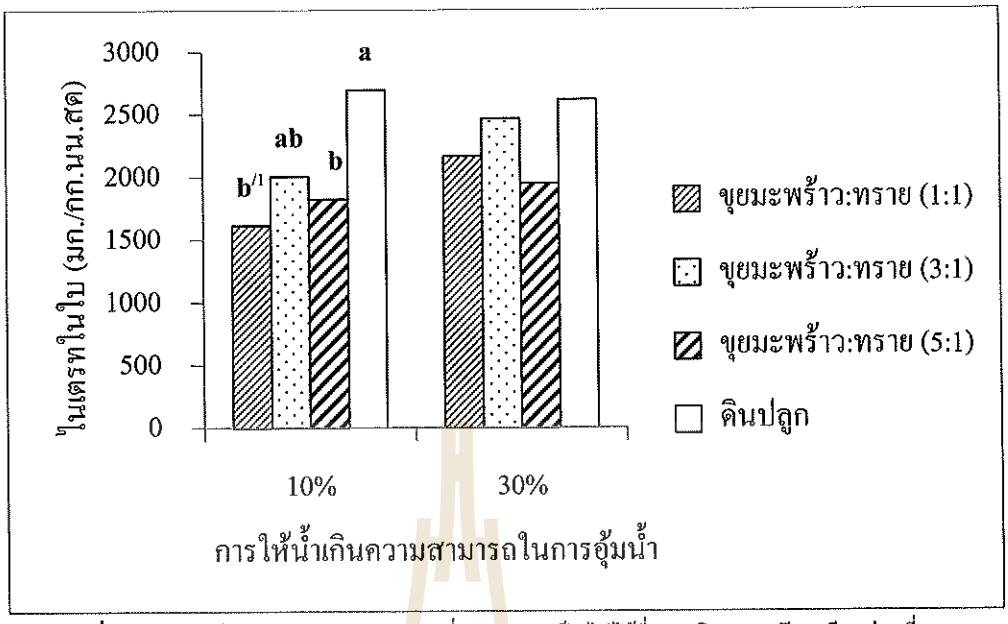
เมื่อพิจารณาผลการทดลองปริมาณไนเตรทในใบ พบว่ามีปริมาณไนเตรทในใบอยู่ในช่วง 1,200-2,800 มล./กก.นน.สด ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานกำหนด โดย EU ได้มีการกำหนดปริมาณไนเตรทสูงสุดที่ยอมให้มีอยู่ในผักกาดหอมในช่วงระหว่าง 2,500 – 3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด (European Commission, 1997) และในดินปลูกจะมีการสะสมปริมาณไนเตรทในใบสูงกว่าการใช้วัสดุปลูกเนื่องจากมีการเจริญเติบโตไม่ดี ชะงักการเจริญเติบโต และมีการดึงเอาอาหารสะสมในต้นไปใช้จึงส่งผลให้พืชมีการกระตุ้นการสะสมไนเตรทเป็นการชดเชยแรงดันออสโมติก

(osmotic pressure) ทดแทนความเข้มข้นของอินทรียสารที่ลดลง (Seginer *et al.*, 1998) ในขณะเดียวกันที่กิจกรรมเมตาบอลิซึมของสารไนเตรทนั้นถูกทำให้ชะงักเนื่องจากการเจริญเติบโตไม่ดีทำให้ผักสลัดเปลี่ยนสารไนเตรทไปเป็นกรดอะมิโนได้น้อย และไม่สามารถใช้สารไนเตรทที่สะสมได้ปกติ จึงทำให้มีการสะสมไนเตรทในผักสลัดสูงขึ้น (วุฒิพงษ์ พิมพ์โครต, 2546) และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำของวัสดุปลูกที่ 30% มีปริมาณการสะสมไนเตรทในใบสูงกว่าอาจเนื่องมาจากมีน้ำหนักสดส่วนต้นมากกว่าการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำของวัสดุปลูกที่ 10% ทำให้ผักสลัดสามารถดูดใช้ธาตุอาหารได้มากขึ้น ส่งผลให้มีการสะสมไนเตรทสูง



ภาพที่ 17 ปริมาณการสะสมไนเตรทในใบจากการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันและการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 18 ปริมาณการสะสมไนเตรทในใบจากการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

4.1.4 ปริมาณไนเตรทในสารละลายที่ได้จากการชะล้างธาตุอาหาร

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า สูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อปริมาณไนเตรทที่ได้จากการชะล้างธาตุอาหารทั้งการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ทั้ง 4 สัปดาห์ โดยในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ไม่ส่งผลให้ปริมาณไนเตรทในสารละลายทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารแตกต่างกันทางสถิติ แต่ส่งผลให้วัสดุปลูก 4 ชนิด มีปริมาณไนเตรทในสารละลายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

สัปดาห์ที่ 1 การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% มีค่าเฉลี่ย 173, 137, 110 และ 96 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, ดินปลูก, วัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 3:1 และ 5:1 ตามลำดับ และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% มีค่าเฉลี่ย 169, 117, 113 และ 111 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, ดินปลูก, วัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1 และ 3:1 ตามลำดับ (ภาพที่ 19 และ 20)

สัปดาห์ที่ 2 การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% มีค่าเฉลี่ย 224, 131, 115 และ 108 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, ดินปลูก, วัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 3:1 และ 5:1 ตามลำดับ และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% มีค่าเฉลี่ย

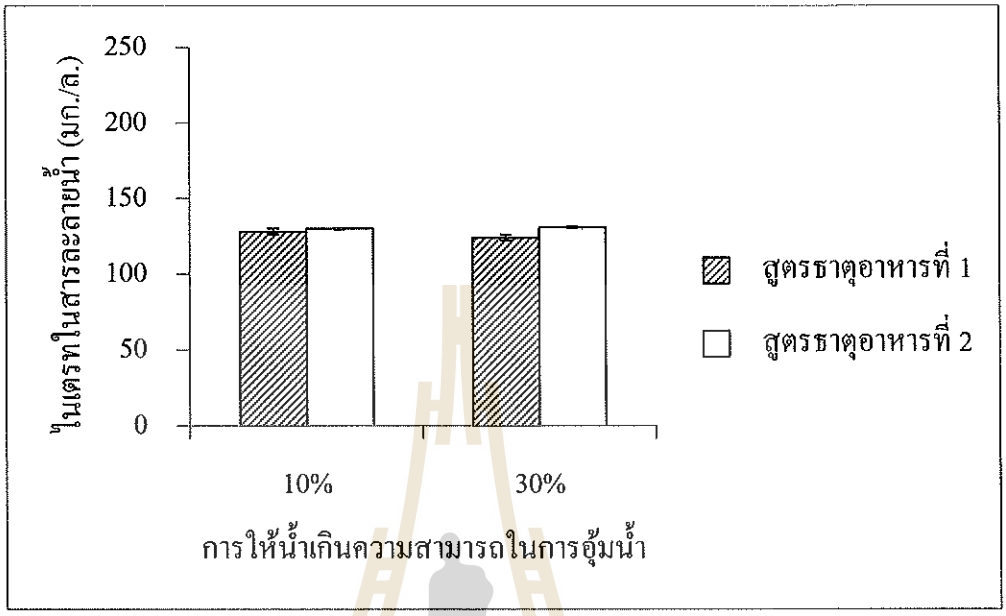
188, 144, 139 และ 106 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 5:1, 3:1 และและดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 21 และ 22)

สัปดาห์ที่ 3 พบว่าการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ส่งผลให้ธาตุอาหารสูตรที่ 2 มีปริมาณไนเตรทในสารละลายสูงกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 158 และ 115 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% และมีค่าเฉลี่ย 147 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% และยังส่งผลให้วัสดุปลูก 4 ชนิด มีปริมาณไนเตรทในสารละลายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% มีค่าเฉลี่ย 247, 106, 103 และ 90.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 3:1, ดินปลูก และวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 5:1 ตามลำดับ และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% มีค่าเฉลี่ย 207, 116, 113 และ 98 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 3:1, 5:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 23 และ 24)

สำหรับสัปดาห์ที่ 4 พบว่าการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ส่งผลให้ธาตุอาหารสูตรที่ 2 มีปริมาณไนเตรทในสารละลายสูงกว่าธาตุอาหารสูตรที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 48.3 และ 20.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% และมีค่าเฉลี่ย 33.3 และ 21.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% และยังส่งผลให้วัสดุปลูก 4 ชนิด มีปริมาณไนเตรทในสารละลายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 59.5, 44.9, 17.0 และ 15.6 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดินปลูก, วัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 5:1 และ 3:1 ตามลำดับ และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% ส่งผลให้วัสดุปลูก 4 ชนิด มีปริมาณไนเตรทในสารละลายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ มีค่าเฉลี่ย 59.1, 19.7, 15.8 และ 14.7 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับดินปลูก, วัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 5:1 และ 3:1 ตามลำดับ (ภาพที่ 25 และ 26)

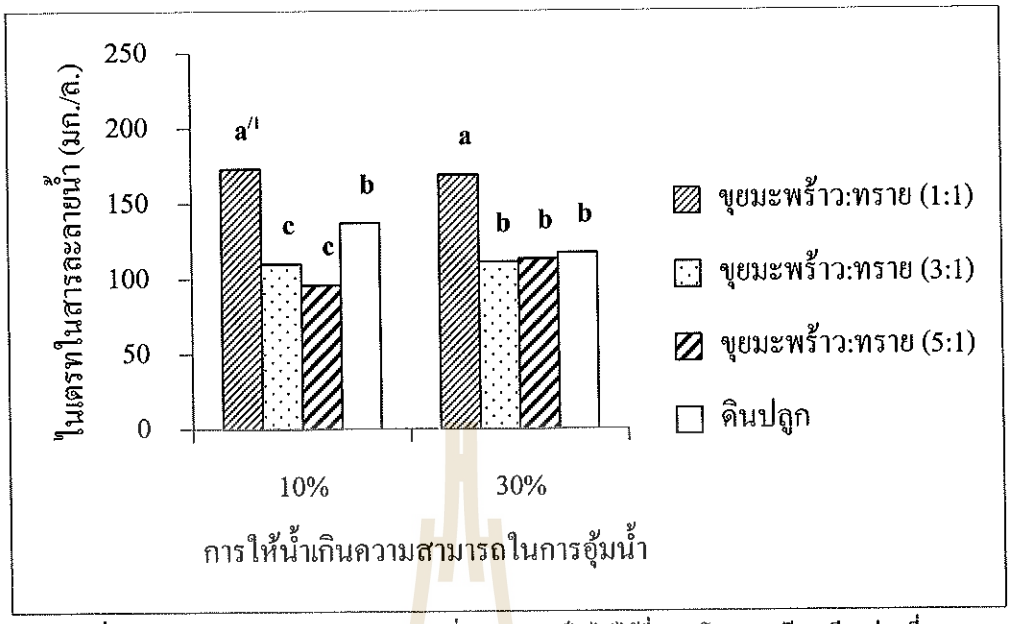
เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าวัสดุปลูกขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตราส่วน 1:1 มีปริมาณการชะล้างไนเตรทสูงในช่วงสัปดาห์ที่ 1–3 ซึ่งอาจเกิดจากทรายที่มีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำต่ำ และเกิดจากธาตุอาหารมีการเคลื่อนที่ไปกับตะกอนดินในปริมาณที่มากกว่าการละลายไปกับน้ำ (สุภาภรณ์ ศิริโสภณา, 2524) จากรายงานของ Burwell *et al.* (1975) พบว่าการสูญเสียหน้าดิน และธาตุอาหารพืชในดินจากรัฐมินิโซต้า สหรัฐอเมริกา เกิดจากการพังทลายของดิน และธาตุอาหารพืช เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในรูปที่เป็นประโยชน์จะเคลื่อนย้ายไปกับตะกอนดินมากกว่าน้ำไหลบ่า ทำให้มีการชะล้างไนเตรทสูงกว่าวัสดุปลูกขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตราส่วน 3:1 และ 5:1 และพบว่าในดินปลูกก็มีการชะล้างปริมาณไนเตรทในสารละลายสูงเช่นกันซึ่งเกิดจากสภาพของดินปลูกที่ประกอบด้วยดินเหนียว แกลบเผา และกากหม้อ เมื่อมีการให้น้ำเกิดการซึมน้ำ

ยาก โดยมีลักษณะเนื้อดินเหนียว และมีการแตกแยกของส่วนดินจึงทำให้เกิดการชะล้างไนเตรทในปริมาณที่สูง



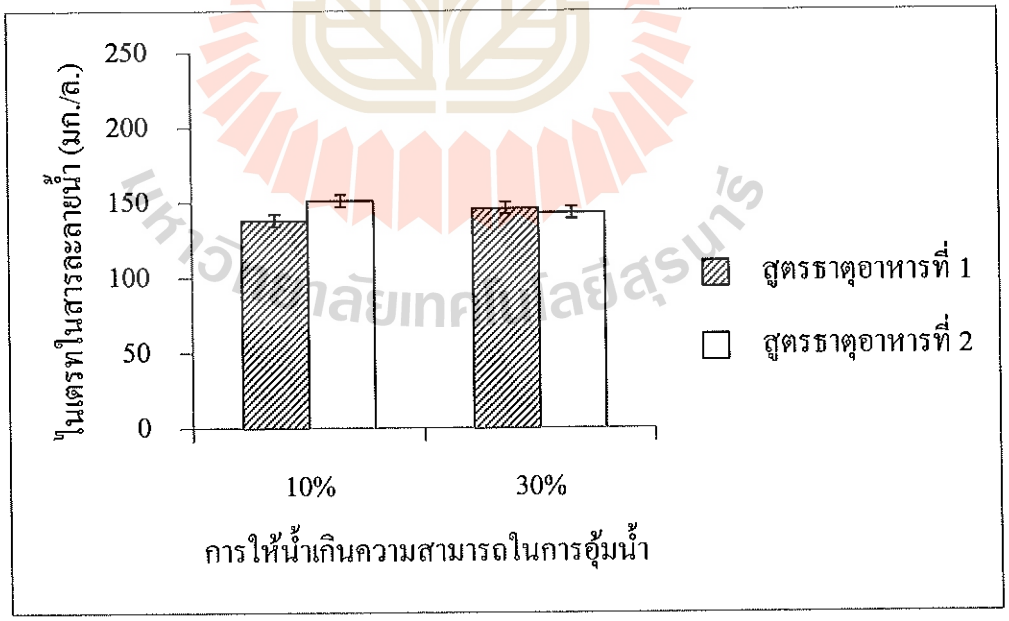
ภาพที่ 19 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

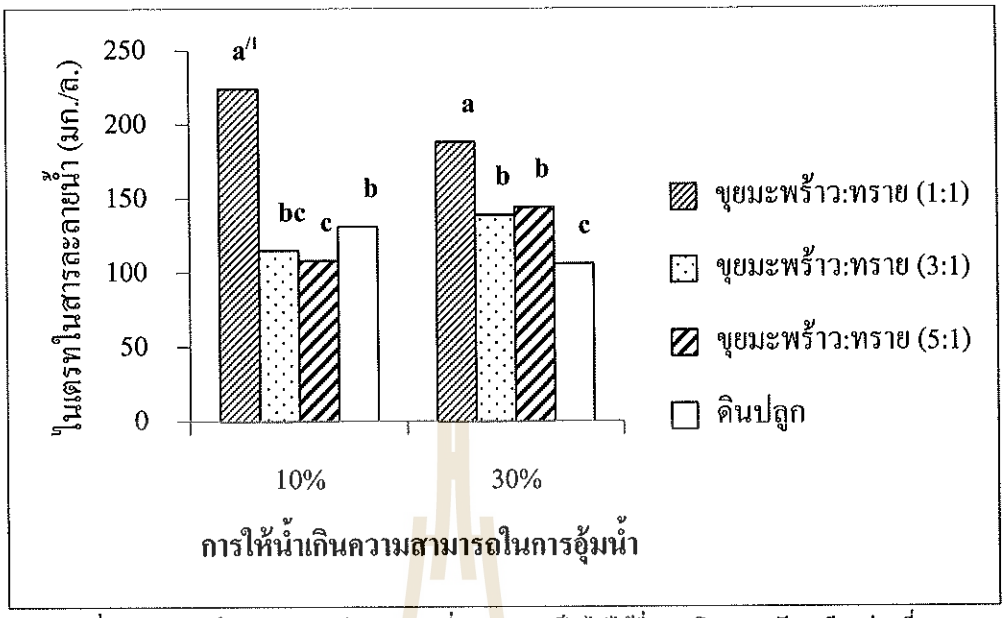


/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 20 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 1

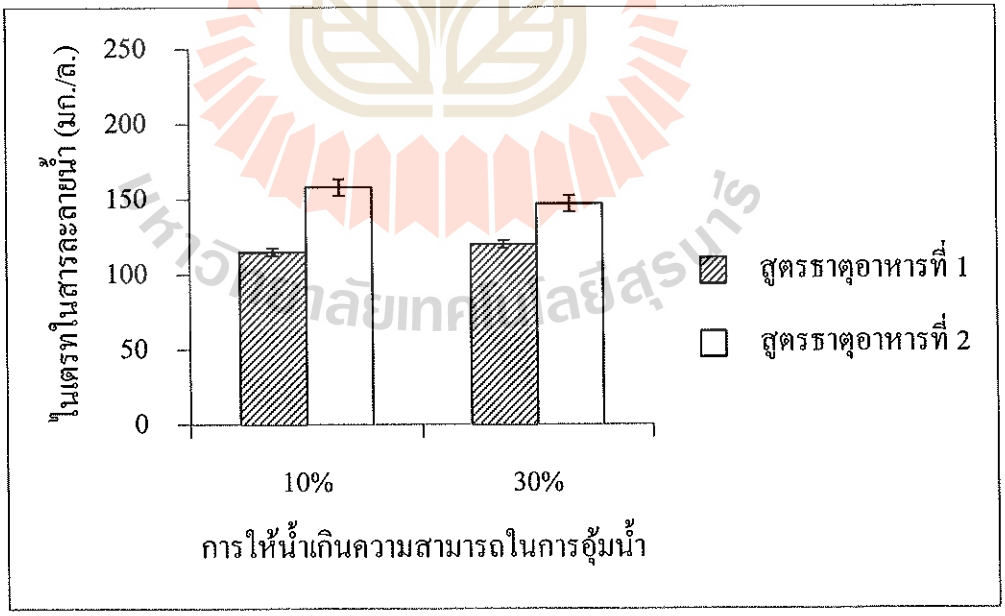


ภาพที่ 21 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 2

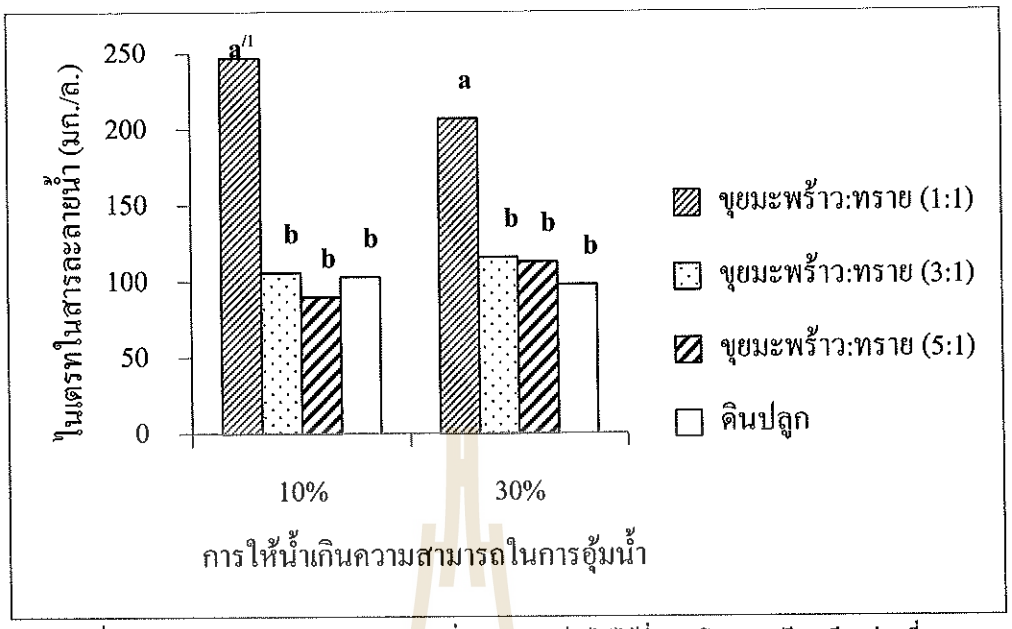


/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 22 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 2

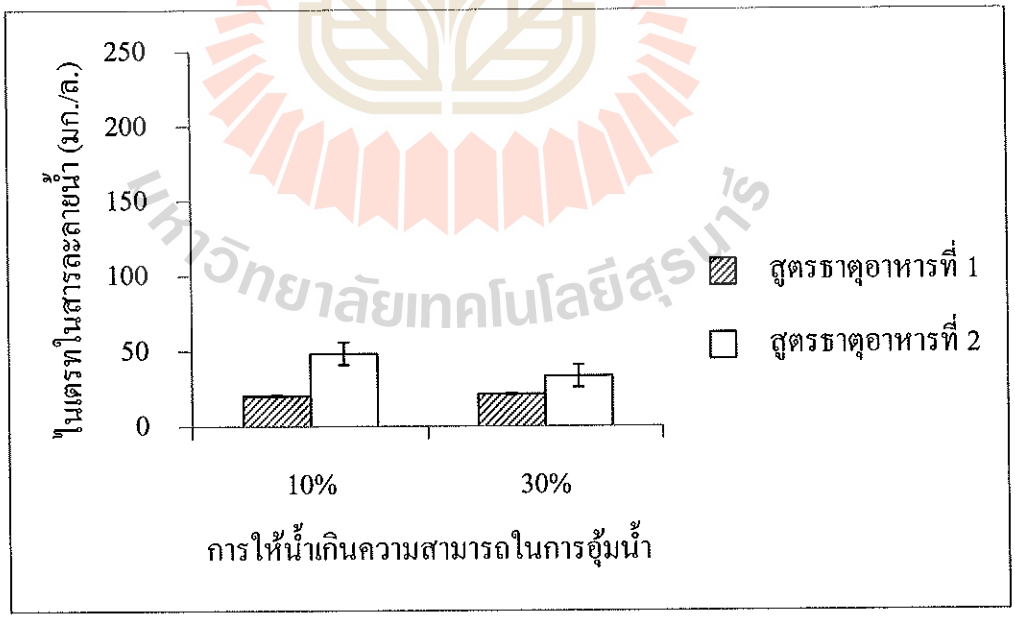


ภาพที่ 23 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 3



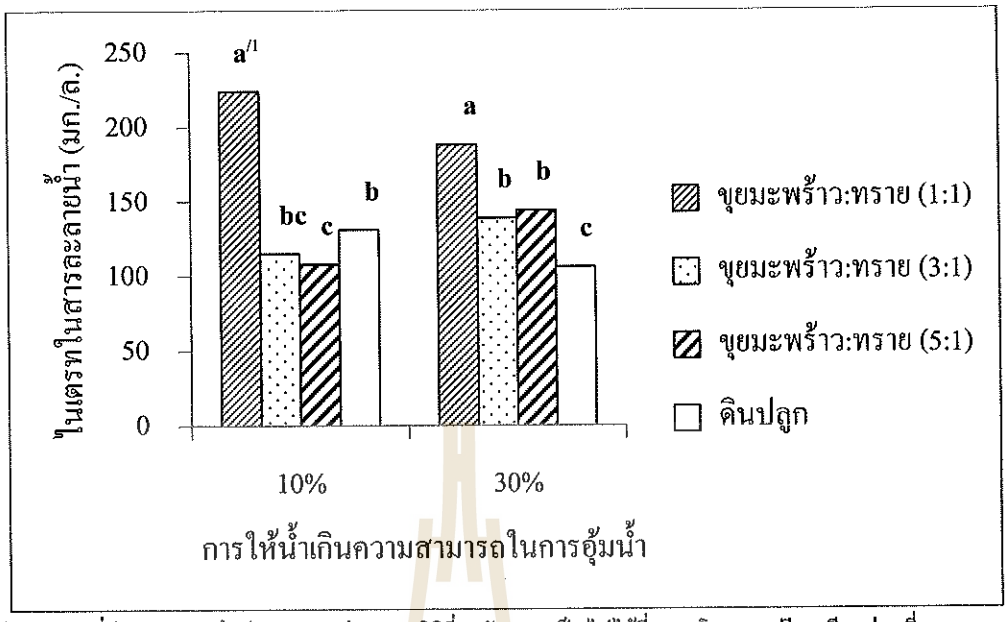
[1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 24 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 3



ภาพที่ 25 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

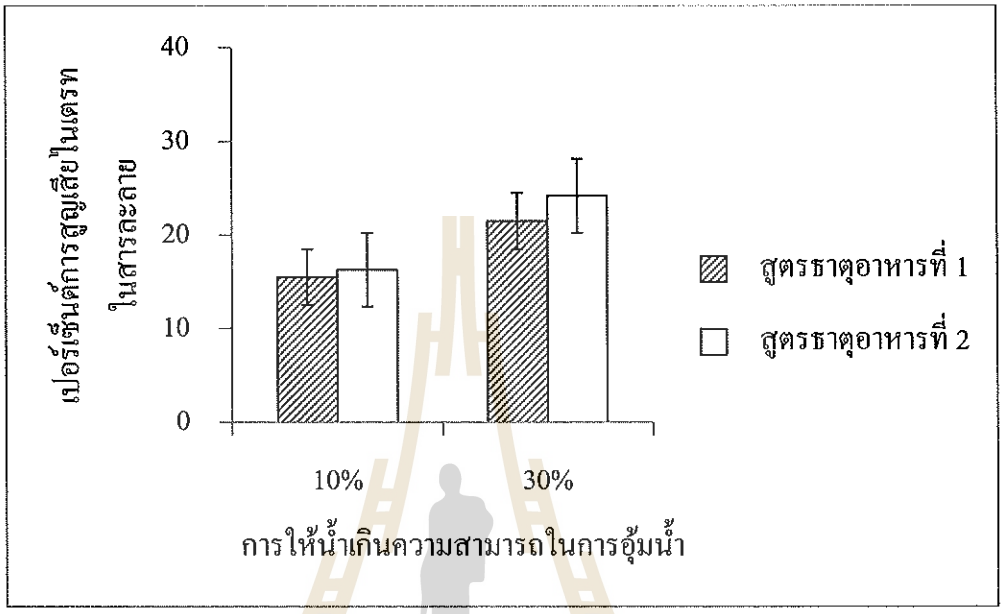
ภาพที่ 26 ปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% ในสัปดาห์ที่ 4

4.2.5 การสูญเสียไนเตรทในสารละลายจากการชะล้างธาตุอาหาร

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และวัสดุปลูกไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อเปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายทั้งการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30% พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายในทั้ง 2 สูตรธาตุอาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่วัสดุปลูก 4 ชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 25.6, 13.6, 13.2 และ 11.2% ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 5:1, 3:1 และดินปลูก ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย 32.9, 21.2, 19.5 และ 17.8% ในการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% สำหรับวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตรา 1:1, 3:1, 5:1 และดินปลูก ตามลำดับ (ภาพที่ 27 และ 28)

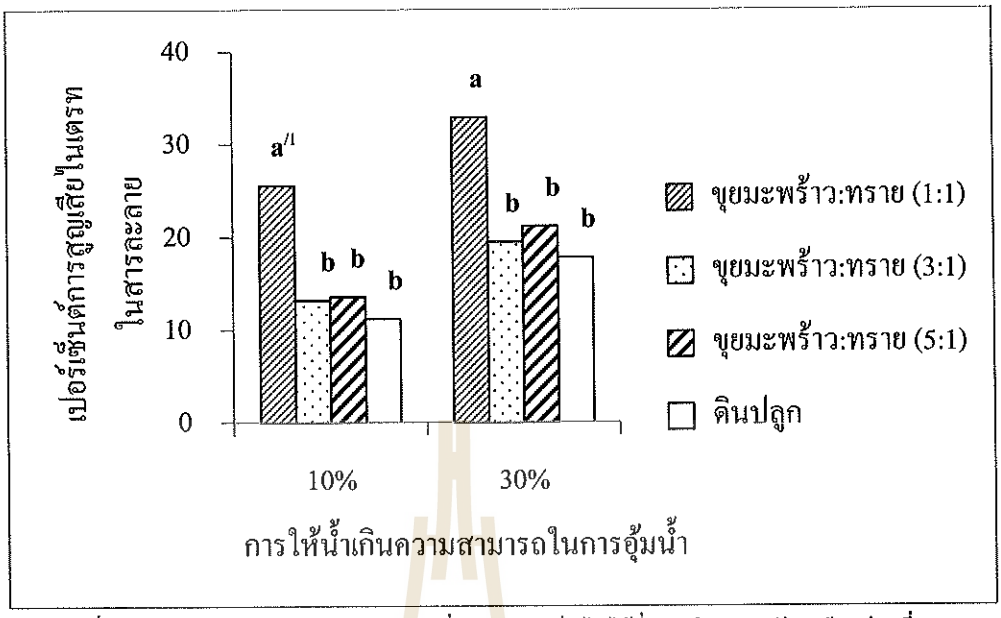
เมื่อพิจารณาผลการทดลอง พบว่าขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตราส่วนต่างๆ มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายจากการชะล้างธาตุอาหารสูงกว่าในดินปลูก ซึ่งเกิดจากในดินปลูกมีการเจริญเติบโตน้อยกว่าวัสดุปลูกจึงมีความต้องการน้ำน้อย ได้รับธาตุอาหารน้อยกว่าทำให้มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้อยลงมาด้วย แต่ในวัสดุปลูกจะมีการสูญเสียเยอะ เนื่องจากมีการเจริญเติบโตดี ต้องการน้ำ และธาตุอาหารเยอะจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเยอะโดยเฉพาะในวัสดุ

ขุยมะพร้าวผสมทรายในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งเกิดจากทรายที่มีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำต่ำทำให้มีการสูญเสียมากกว่าวัสดุปลูกอื่นๆ และการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำของวัสดุปลูกที่ 30% จะมีการสูญเสียมากกว่าเนื่องจากการให้น้ำที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมากกว่า



ภาพที่ 27 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียในเตรทในสารละลายต่อการให้สูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



/1 ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ภาพที่ 28 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายต่อการปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกันและการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10 และ 30%

4.3 การทดลองที่ 3 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้นต่อการสะสมไนเตรทในผักกาดหอมที่ปลูกในระบบ Deep Flow Technique (DFT)

4.3.1 การเจริญเติบโต

จากผลการทดลอง พบว่าสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอม โดยสูตรธาตุอาหารที่ 1 และ 2 ไม่ส่งผลให้ผักกาดหอมมีความสูงทรงพุ่ม ความกว้างทรงพุ่ม และจำนวนใบ แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยความสูงทรงพุ่มเท่ากับ 26.4 และ 28.3 เซนติเมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยความกว้างทรงพุ่มเท่ากับ 31.6 และ 33.1 เซนติเมตร ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยจำนวนใบเท่ากับ 15.5 และ 16.1 ใบต่อต้น ตามลำดับ และยังพบว่าความเข้มข้น EC ที่ 1.5 และ 2.0 mS/cm ไม่ส่งผลให้การเจริญเติบโตแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยความสูงทรงพุ่มเท่ากับ 27.6 และ 27.1 เซนติเมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยความกว้างทรงพุ่มเท่ากับ 32.6 และ 32.2 เซนติเมตร ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยจำนวนใบเท่ากับ 16.1 และ 15.4 ใบต่อต้น ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

จากผลการทดลองพบว่า สูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อการเจริญเติบโตหลังการเก็บเกี่ยวของผักกาดหอม โดยสูตรธาตุอาหารที่ 1 และ 2 ไม่ส่งผลให้

ผักกาดหอมมีพื้นที่ใบ น้ำหนักสดต้น และน้ำหนักแห้งต้น แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยพื้นที่ใบเท่ากับ 2,781 และ 2,471 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต้นเท่ากับ 161 และ 151 กรัมต่อต้น ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งต้นเท่ากับ 7.0 และ 6.7 ใบต่อต้น ตามลำดับ และยังพบว่าความเข้มข้น EC ที่ 1.5 และ 2.0 mS/cm ไม่ส่งผลให้การเจริญเติบโตหลังการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยพื้นที่ใบเท่ากับ 2,670 และ 2,582 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต้นเท่ากับ 160 และ 152 กรัมต่อต้น ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งต้นเท่ากับ 7.1 และ 6.6 กรัมต่อต้น ตามลำดับ (ตารางที่ 6)

จากการทดลองจะพบว่า สูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ไม่ทำให้แตกต่างกัน แต่ความเข้มข้น EC ที่ 1.5 mS/cm มีแนวโน้มการเจริญเติบโตมากกว่าความเข้มข้น EC ที่ 2.0 mS/cm ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Samarakoon *et al.* (2006) พบว่าที่ EC 1.4 mS/cm จะมีจำนวนใบมากกว่า EC 2.0 และ 3.0 mS/cm และเมื่อค่า EC เพิ่มขึ้น น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของผักกาดหอมจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับที่ Morgan (1999) กล่าวว่าการใช้สารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นต่ำจะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักกาดหอมได้ดีกว่าการใช้ความเข้มข้นของสารละลายสูง และผลการทดลองของสูตรธาตุอาหารจะพบว่าไม่มีความแตกต่างกันแต่ในสูตรธาตุอาหารที่ 1 ที่ไม่มีการเพิ่มปริมาณไนเตรทจะมีการเจริญเติบโตที่สูงกว่าสูตรธาตุอาหารที่ 2 แสดงว่าการเพิ่มปริมาณ ไนเตรทไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการสังเคราะห์โปรตีนของต้นผักกาดหอมพันธุ์ grand rapids และยังมีการเจริญเติบโตในทุกด้านน้อยที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ในระบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอม

กรรมวิธี	การเจริญเติบโตของผักกาดหอม		
	ความสูงของลำต้น (ซม.)	ความกว้างของทรงพุ่ม (ซม.)	จำนวนใบ (ใบต่อต้น)
ปัจจัย A (สูตรธาตุอาหาร)			
สูตรธาตุอาหารที่ 1	28.3	33.1	16.1
สูตรธาตุอาหารที่ 2	26.4	31.6	15.5
ปัจจัย B (ค่าการนำไฟฟ้า)			
ค่าการนำไฟฟ้า 1.5 mS/cm	27.6	32.6	16.1
ค่าการนำไฟฟ้า 2.0 mS/cm	27.1	32.2	15.4
CV (%)	10.87	11.48	6.68
F-test			
ปัจจัย A[/1]	ns	ns	ns
ปัจจัย B	ns	ns	ns
ปัจจัย A xปัจจัย B	ns	ns	ns

[/1] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 6 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ในระบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอม

กรรมวิธี	การเจริญเติบโตของผักกาดหอม		
	พื้นที่ใบ (ตร.ซม.)	น้ำหนักสดต้น (กรัมต่อต้น)	น้ำหนักแห้งต้น (กรัมต่อต้น)
ปัจจัย A (สูตรธาตุอาหาร)			
สูตรธาตุอาหารที่ 1	2,781	161	7.0
สูตรธาตุอาหารที่ 2	2,471	151	6.7
ปัจจัย B (ค่าการนำไฟฟ้า)			
ค่าการนำไฟฟ้า 1.5 mS/cm	2,670	160	7.1
ค่าการนำไฟฟ้า 2.0 mS/cm	2,582	152	6.6
CV (%)	22.80	36.23	21.39
F-test			
ปัจจัย A[/1]	ns	ns	ns
ปัจจัย B	ns	ns	ns
ปัจจัย A x ปัจจัย B	ns	ns	ns

[/1] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

4.3.2 ปริมาณไนโตรเจนในใบ

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมพันธุ์ grand rapids ที่ปลูกในระบบ DFT หลังครบอายุการเก็บเกี่ยว พบว่าสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อปริมาณไนโตรเจนในใบของผักกาดหอม โดยสูตรธาตุอาหารที่ 1 และ 2 ไม่ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนในใบแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 และ 4.1% ตามลำดับ และยังพบว่าความเข้มข้น EC ที่ 1.5 และ 2.0 mS/cm ไม่ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนในใบแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.1 และ 4.3% ตามลำดับ (ตารางที่ 7)

4.3.3 ปริมาณไนเตรทในใบ

จากการทดลองปลูกผักกาดหอมพันธุ์ grand rapids ที่ปลูกในระบบ DFT หลังครบอายุการเก็บเกี่ยว พบว่าสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อปริมาณไนเตรทในใบของผักกาดหอม โดยสูตรธาตุอาหารที่ 1 และ 2 ไม่ส่งผลให้ปริมาณไนเตรทในใบแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,736 และ 3,414 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ และยังพบว่า

ความเข้มข้น EC ที่ 1.5 และ 2.0 mS/cm ไม่ส่งผลให้ปริมาณไนเตรทในใบแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,407 และ 3,743 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ (ตารางที่ 7)

จากการทดลองจะพบว่า สูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ไม่ทำให้แตกต่างกัน แต่ความเข้มข้น EC ที่ 2.0 mS/cm มีแนวโน้มปริมาณไนเตรทในใบมากกว่าความเข้มข้น EC ที่ 1.5 mS/cm ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sanguandeekul (1999) พบว่าความเข้มข้นของไนเตรทจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น และพบว่าปริมาณไนเตรทในใบมีค่าเกินมาตรฐาน European Commission (เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด) ควรมีการลดปริมาณไนเตรทที่สะสมในผักอันอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค เช่น เปลี่ยนเวลาเก็บเกี่ยวผักจากเช้าเป็นเที่ยงหรือเย็น (Amr and Hadidi, 2001) การงดสารละลายธาตุอาหารพืชก่อนเก็บ (มนัชญา รัตนโชติ, 2546; ณัฐกร อินทรวิช, 2549) และเมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับการเจริญเติบโตพบว่าที่ระดับความเข้มข้น EC ที่ 2.0 mS/cm พบว่ามีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างต่ำกว่าระดับความเข้มข้น EC ที่ 1.5 mS/cm แต่กลับมีปริมาณไนเตรทที่สูงอาจเป็นเพราะผักไม่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่จึงทำให้มีปริมาณการสะสมไนเตรทที่สูง (ณัฐกร อินทรวิช, 2549) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนเตรทในใบ พบว่าการปลูกในวัสดุปลูกจะมีปริมาณไนเตรทน้อยกว่าการปลูกในระบบ DFT (เปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 7 ผลของสูตรธาตุอาหาร และความเข้มข้น EC ในระบบ DFT ต่อปริมาณไนโตรเจน และไนเตรทในใบผักกาดหอม

กรรมวิธี	ปริมาณไนเตรทและไนโตรเจน	
	ไนโตรเจนในใบ (%)	ไนเตรทในใบ (มก./กก.นน.สด)
ปัจจัย A (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	4.3	3,736
สูตรธาตุอาหารที่ 2	4.1	3,414
ปัจจัย B (ค่าการนำไฟฟ้า)		
ค่าการนำไฟฟ้า 1.5 mS/cm	4.1	3,407
ค่าการนำไฟฟ้า 2.0 mS/cm	4.3	3,743
CV (%)	5.27	16.07
F-test		
ปัจจัย A[/1]	ns	ns
ปัจจัย B	ns	ns
ปัจจัย A x ปัจจัย B	ns	ns

[/1] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

4.3.4 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในวัสดุปลูก และระบบ DFT

จากการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในวัสดุปลูก และระบบ DFT พบว่าการปลูกผักกาดหอมในวัสดุปลูกจะมีการเจริญเติบโตดีกว่าการปลูกในระบบ DFT ทั้งด้านความกว้างของทรงพุ่ม จำนวนใบ พื้นที่ใบ น้ำหนักสดต้น และน้ำหนักแห้งต้น แต่ความสูงของต้นกลับพบว่าการปลูกในระบบ DFT มีการเจริญเติบโตดีกว่า ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจน และไนเตรทในใบสูงกว่าการปลูกในวัสดุปลูก (ตารางที่ 8 และ 9) ซึ่งสอดคล้องกับวุฒิพงษ์ พิมพ์โครต (2546) พบว่าการปลูกผักกาดหอมในสารละลายธาตุอาหารจะมีการสะสมไนเตรทสูงกว่าการปลูกในดินผสมเนื่องจากการปลูกในสารละลายธาตุอาหารจะมีการเปลี่ยนถ่ายสารละลายเพื่อรักษาระดับความเข้มข้นให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยทำการเปลี่ยนทุกๆ สัปดาห์ และองค์ประกอบของไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไนเตรท และรากของต้นผักกาดหอมถูกแช่ในสารละลายจึงมีโอกาสดูดซึมสารไนเตรทไปสะสมได้ตลอดเวลา

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในวัสดุปลูก และระบบ DFT

กรรมวิธี	การเจริญเติบโตของผักกาดหอม			
	ความสูงของทรงพุ่ม (ซม.)	ความกว้างของทรงพุ่ม (ซม.)	จำนวนใบ (ใบต่อต้น)	พื้นที่ใบ (ตร.ซม.)
สูตรธาตุอาหารที่ 1				
การปลูกในวัสดุปลูก	24.3	39.8	21.0	3,022
การปลูกในระบบ DFT	29.3	34.8	16.6	2,801
สูตรธาตุอาหารที่ 2				
การปลูกในวัสดุปลูก	23.7	37.3	20.3	2,815
การปลูกในระบบ DFT	27.0	32.9	15.3	2,578

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบการเจริญเติบโต ปริมาณไนโตรเจน และไนเตรทในใบของผักกาดหอมที่ปลูกในวัสดุปลูก และระบบ DFT

กรรมวิธี	เปรียบเทียบการเจริญเติบโต และการสะสมไนเตรท ไนโตเจนของผักกาดหอม			
	น้ำสดต้น (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น)	ไนโตรเจนในใบ (%)	ไนเตรทในใบ (มก./กก.นน.สด)
สูตรธาตุอาหารที่ 1				
การปลูกในวัสดุปลูก	220	12.0	2.7	2,879
การปลูกในระบบ DFT	166	7.3	4.3	3,817
สูตรธาตุอาหารที่ 2				
การปลูกในวัสดุปลูก	187	9.5	3.2	2,785
การปลูกในระบบ DFT	164	7.5	4.2	3,669

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์ไนเตรทในสารละลายโดยวิธีการทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์

4.4.1 ความสัมพันธ์วิธีการวัดไนเตรทในสารละลายจากการทดลองที่ 1

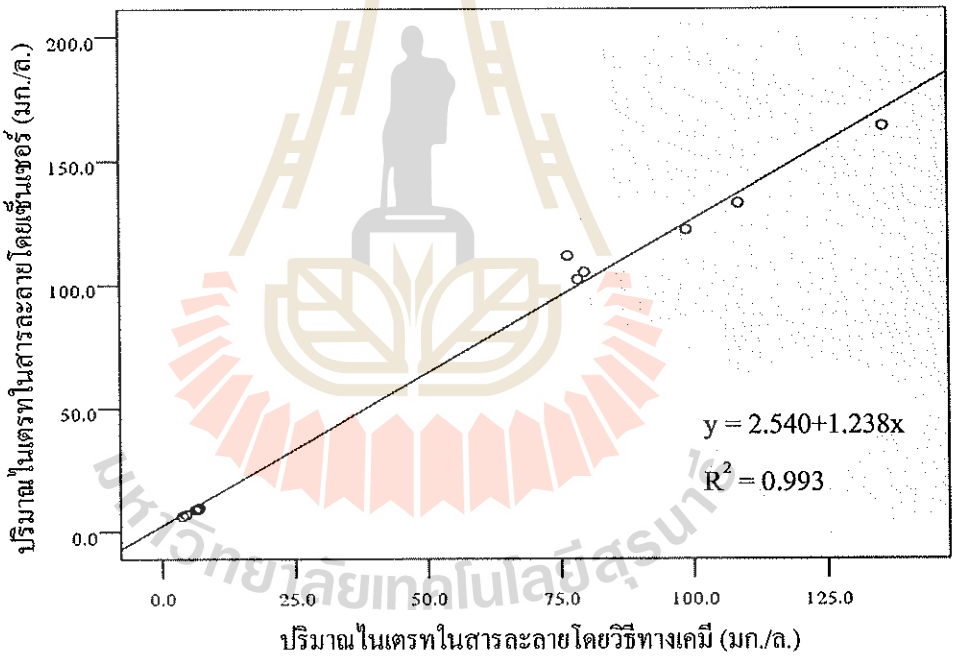
นำตัวอย่างที่มีปริมาณไนเตรทในสารละลายที่ได้จากการชะล้างในการปลูกสตรอว์เบอร์รีในวัสดุปลูกจำนวน 12 ตัวอย่างมาวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์ในระยะเวลา 7 สัปดาห์ โดยมีการใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ตัวเดียวกันในการวัดตลอด 7 สัปดาห์ และเมื่อนำค่าปริมาณไนเตรทในสารละลายที่วัดได้จากวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์มาหาความสัมพันธ์กัน พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.952, 0.986, 0.993, 0.996, 0.982, 0.996 และ 0.973 ในสัปดาห์ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ (ตารางที่ 10) และเมื่อนำค่าปริมาณไนเตรทที่ได้จากวิธีวิเคราะห์ทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์ทั้ง 7 สัปดาห์มาหาค่าเฉลี่ย และหาความสัมพันธ์กันพบว่า R^2 เท่ากับ 0.993 (ภาพที่ 29)

การอภิปรายผลการทดลอง

จากความสัมพันธ์ของวิธีการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์ พบว่ามีค่า R^2 สูงในทุกสัปดาห์ เนื่องจากค่าของการวัดด้วยวิธีทางเคมีและเซ็นเซอร์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สอดคล้องกับการทดลองของ Parab *et al.* (2013) ที่มีการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายน้ำโดยใช้วิธี Ion Chromatography (IC) และ Ion Selective Electrode (ISE) แล้วนำมาหาค่าความสัมพันธ์กัน พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และการทดลองของ ชนิศนันท์ สุงาม และ อัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์ (2557) ที่มีการใช้เซ็นเซอร์ในการวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำแบบเชิงแสงเปรียบเทียบกับการหาปริมาณออกซิเจนด้วยวิธีการไทเทรต พบว่าวิธีการวัดโดยใช้เซ็นเซอร์เชิงแสงมีผลการวัดที่มีความแม่นยำ และเสถียรมากที่สุด และจากความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยในทั้ง 7 สัปดาห์มีความสัมพันธ์ที่ดีอาจเนื่องมาจากค่า R^2 ในแต่ละสัปดาห์มีค่าสูงทำให้ค่าเฉลี่ยสูงขึ้นไปด้วย ซึ่งการมีค่าความสัมพันธ์สูงเป็นการแสดงความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างสองวิธีการวัดโดยเฉพาะการใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ในการวัดจำนวนตัวอย่างครั้งละน้อยๆ

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์วิธีการวัดไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์จากการวัดจำนวน 12 ตัวอย่างในสัปดาห์ที่ 1-7

สัปดาห์	สมการรีเกรชชั่น/พยากรณ์	R^2
1	y = 3.328+1.208x	0.952
2	y = -5.243+2.542x	0.986
3	y = 3.566+1.139x	0.993
4	y = 1.967+1.397x	0.996
5	y = 3.018+1.167x	0.982
6	y = 1.582+1.151x	0.996
7	y = 7.617+0.950x	0.973



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์การวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายด้วยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์เฉลี่ยใน 7 สัปดาห์

4.2.2 ความสัมพันธ์วิธีการวัดไนเตรทในสารละลายจากการทดลองที่ 2

นำตัวอย่างที่มีปริมาณไนเตรทในสารละลายที่ได้จากการชะล้างในการปลูกผักกาดหอมในวัสดุปลูกจำนวน 48 ตัวอย่างมาวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์ แบ่งช่วงลำดับการวัดตัวอย่างที่ 1–10, 11–20, 21–30, 31–40 และ 41–48 โดยใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ตัวเดียวกันตลอดช่วงลำดับการวัด ซึ่งทำการทดลองในระยะเวลา 4 สัปดาห์ และเมื่อนำค่าปริมาณไนเตรทในสารละลายที่ได้จากวิธีทางเคมี และไนเตรทเซ็นเซอร์โดยเรียงลำดับในการวัดตั้งแต่ลำดับที่ 1–10, 11–20, 21–30, 31–40 และ 41–48 มาหาความสัมพันธ์กันในสัปดาห์ที่ 1-4 พบว่ามี R^2 เท่ากับ 0.819, 0.585, 0.428, 0.485, 0.262 (สัปดาห์ที่ 1) 0.858, 0.726, 0.778, 0.741, 0.161 (สัปดาห์ที่ 2) 0.971, 0.920, 0.911, 0.989, 0.943 (สัปดาห์ที่ 3) 0.900, 0.892, 0.990, 0.909 และ 0.955 (สัปดาห์ที่ 4) ในลำดับการวัดที่ 1–10, 11–20, 21–30, 31–40 และ 41–48 ตามลำดับ (ตารางที่ 11)

การอภิปรายผลการทดลอง

จากความสัมพันธ์ของวิธีการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์ พบว่าสัปดาห์ที่ 1 และ 2 ในช่วงการวัดลำดับที่ 1–10 มีค่า R^2 สูงเพราะจากการสังเกตในการวัดด้วยเซ็นเซอร์มีการทำงานได้ดี ในลำดับการวัดที่ 11–20 ยังมีค่า R^2 อยู่ในช่วงที่ดี แต่มีค่าลดลงมาจากใน 10 ลำดับแรก และในลำดับการวัดตั้งแต่ลำดับที่ 21 เป็นต้นไปมีค่าความสัมพันธ์ที่ต่ำลงมา ซึ่งเกิดจากการอุดตันของ membrane ที่หัววัดเซ็นเซอร์ เนื่องจากน้ำตัวอย่างที่ได้จากการชะล้างในวัสดุปลูกมีสีขุ่น และมีตะกอนปนอยู่ทำให้เมื่อมีการวัดตัวอย่างไปมาก เริ่มมีค่าความสัมพันธ์ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการอ่านค่าปริมาณไนเตรทในสารละลายด้วยเซ็นเซอร์คลาดเคลื่อนไปทำให้มีผลต่อความสัมพันธ์ Nasser *et al.* (2018) ทดสอบการใช้ Nitrate ion selective ในการวัดปริมาณไนเตรทในน้ำ ดิน และพืช ที่มีปริมาณความเข้มข้นไนเตรทที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้ Nitrate ion selective สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้ค่าความแม่นยำที่ลดลงของการใช้เซ็นเซอร์ในการทดลองนี้อาจเกิดจากสาเหตุข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่สัปดาห์ที่ 3 และ 4 ในทุกช่วงลำดับการวัดมีค่า R^2 สูงกว่าในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 อาจเนื่องมาจากในช่วง 2 สัปดาห์แรกน้ำตัวอย่างมีความขุ่น และมีสีเข้มกว่าแต่ในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 สีน้ำตัวอย่างเริ่มมีความขุ่นน้อยลง จึงทำให้เซ็นเซอร์มีความแม่นยำในการวัดดีกว่า 2 สัปดาห์แรก การใช้เซ็นเซอร์ในการวัดตัวอย่างน้ำอาจจะต้องมีความระมัดระวังในเรื่องของสีของน้ำ และความขุ่นของตะกอนซึ่งทำให้เกิดการอุดตัน และทำให้ความแม่นยำในการวัดลดลง โดยระหว่างการวัดตัวอย่างมีการล้างหัวเซ็นเซอร์ด้วยน้ำเปล่า ดังนั้นการล้างด้วยน้ำเปล่าระหว่างการวัดตัวอย่างไม่สามารถล้างสิ่งอุดตันได้ จึงจำเป็นต้องมีการแช่สารสำหรับหัววัดทิ้งไว้ในระยะเวลานานก่อนนำเซ็นเซอร์มาใช้ได้ใหม่ หรือมีการเปลี่ยนหัวเซ็นเซอร์ใหม่ในการวัดตัวอย่างจำนวนมาก

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์วิธีการวัดไนเตรทในสารละลายโดยวิธีทางเคมี และเซ็นเซอร์จากการวัดจำนวน 48 ตัวอย่างในสัปดาห์ที่ 1–4

สัปดาห์	ความเข้มข้นธาตุอาหาร	ลำดับการวัดตัวอย่างที่	สมการรีเกรชชั่น/พยากรณ์	R^2
สัปดาห์ที่ 1	EC 1.4 Ds/m	1–10	y = 35.562+1.429x	0.819
		11–20	y = -28.042+2.662x	0.585
		21–30	y = -73.025+2.644x	0.428
		31–40	y = 60.380+0.779x	0.485
		41–48	y = 73.379+0.793x	0.262
สัปดาห์ที่ 2	EC 1.3 Ds/m	1–10	y = -120.296+2.480x	0.858
		11–20	y = -100.334+2.969x	0.726
		21–30	y = 0.320+3.347x	0.778
		31–40	y = -11.850+4.521x	0.741
		41–48	y = 332.020+2.555x	0.161
สัปดาห์ที่ 3	EC 1.1 Ds/m	1–10	y = 1.091+1.371x	0.971
		11–20	y = -5.064+1.332x	0.920
		21–30	y = 22.474+0.793x	0.911
		31–40	y = -12.375+1.057x	0.989
		41–48	y = 23.254+0.803x	0.943
สัปดาห์ที่ 4	EC 0.7 Ds/m	1–10	y = 28.329+0.684x	0.900
		11–20	y = 15.992+0.728x	0.892
		21–30	y = 8.539+1.187x	0.990
		31–40	y = 20.249+1.082x	0.909
		41–48	y = 16.997+0.914x	0.955

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5

บทสรุป

จากการศึกษาผลของสูตรธาตุอาหาร วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้างไนเตรท และการสะสมไนเตรทในผลผลิตพืช และการเปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลายโดยใช้วิธีทางเคมี และการวัดโดยใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้ธาตุอาหารในรูปแบบสารละลายทางน้ำมีการชะล้างไนเตรทมากกว่าธาตุอาหารทางดิน และธาตุอาหารที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงจะมีแนวโน้มปริมาณการชะล้างไนเตรทสูงกว่าธาตุอาหารที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ

2. การปลูกผักกาดหอมในวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายกับสูตรธาตุอาหารที่ไม่มีการปรับปริมาณไนเตรทจะมีการเจริญเติบโตดี และยังมีการชะล้างไนเตรทสูงที่สุดในช่วง 3 สัปดาห์หลังปลูก แต่ในดินปลูกมีการสะสมไนเตรทในใบสูงที่สุด โดยการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 30% ทำให้มีการเจริญเติบโต การชะล้างไนเตรท และการสะสมไนเตรทในใบมากกว่าการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ดังนั้นสูตรธาตุอาหาร วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำที่เหมาะสมในการปลูกผักกาดหอมในวัสดุปลูก คือธาตุอาหารสูตรที่ 1 (ในการทดลองที่ 2 และ 3) ในวัสดุขุยมะพร้าวผสมทราย ที่การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% เพราะการให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำที่ 10% ทำให้ประหยัดน้ำ และปุ๋ย

3. การปลูกในระบบ DFT ไม่มีผลต่อสูตรธาตุอาหาร และปริมาณความเข้มข้นปุ๋ยที่แตกต่างกัน แต่การสะสมไนเตรทเกินมาตรฐาน และสูงกว่าการปลูกในวัสดุปลูกเมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกในวัสดุปลูกของการทดลองที่ 2

4. การใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์ในการวัดปริมาณไนเตรทในสารละลาย สามารถใช้แทนการวิเคราะห์ทางเคมีได้ โดยตัวอย่างที่นำมาวัดต้องไม่มีความขุ่นเพื่อความแม่นยำในการวัด ซึ่งช่วยลดเวลาในการวัด และลดค่าใช้จ่ายจากการวิเคราะห์ทางเคมีได้

รายการอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2550). **ผักกาดหอม.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://www.doag.go.th/library/html/detail/lettuce/index.htm.

กุลชลี งามจี้. (2525). การหาความเข้มข้นของไนเตรทในผักบางชนิดจากตลาด 3 แห่งในกรุงเทพมหานคร.**วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**

โกเมนทร์ บุญเจือ. (2551). ความต้องการธาตุอาหารของอนูเบียส (*Anubias* sp.) ในระบบการปลูกพืชไร้ดินแบบ DFT. **งานวิจัย คณะเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.**

งานสารพิษ. (2531). **ไนเตรท ไนไตรท์ และสารประกอบเอ็น-ไนโตรโซ.** กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

ชนะวัฒน์ เทียมบุญประเสริฐ. (2550). การเปรียบเทียบชนิดของตาข่ายพรางแสงต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไนเตรทของผักสลัด (*Lactuca sativa* L.) ที่ปลูกในระบบ Nutrient Film Technique (NFT). **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารราชกระบัง.** 60 หน้า.

ชนิศนันท์ สุงาม และอัจจนา วงศ์ชัยสุวัฒน์. (2557). เซนเซอร์สำหรับวัดออกซิเจนที่ละลายน้ำได้. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,** 8 (1) ประจำเดือนมกราคม-มิถุนายน.

ญาดา วงศ์พรประทีป. (2550). ผลของระดับค่าการนำไฟฟ้าและชนิดของเหล็กคีเลตในสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตและปริมาณการสะสมไนเตรทของผักสลัด (*Lactuca sativa* L.) ที่ปลูกในระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบ Nutrient Film Technique (NFT). **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารราชกระบัง.**

ณัฐกร อินทรวิชะ. (2549). ผลของระดับความเข้มข้น และองค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีต่อผลผลิต และปริมาณไนเตรทของผักสลัดที่ปลูกในระบบ Nutrient Film Technique (NFT). **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารราชกระบัง.** 60 หน้า.

ดิเรก ทองอร่าม. (2547). **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน.** ธรรมรักษ์การพิมพ์, ราชบุรี. 724 หน้า.

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และสรสิทธิ์ วัชโรทยาน. (2531). การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. **ดินและปุ๋ย.** 10 (1), หน้า 59-66.

ธรรมศักดิ์ ทองเกต, วุฒิพงษ์ พิมพ์โคตร, สุเทวี ศุขปราการ และศรปราชญ์ ธไนศวรรยางค์กูร. (2546). การเจริญเติบโต การสะสมไนเตรท และการลดไนเตรทก่อนเก็บเกี่ยวในผักกาดหอมปลูกโดยไม่ใช้ดิน. **การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 3**. ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์, กรุงเทพฯ. หน้า 34.

นพดล เรียบเลิศหิรัญ. (2538). **การปลูกพืชไร้ดิน**. สำนักพิมพ์รั่วเขียว. กรุงเทพฯ. 100 น.

พัชราภรณ์ ภู่ไพบูลย์, ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม และวาสนา บัวงาม. (2552). การวิเคราะห์การสะสมไนเตรทในผักสด. **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47** สาขาพืช. กรุงเทพฯ.หน้า 289-298.

เพ็ญนภา ไชยกูล. (2546). ผลของความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน แคลเซียม และโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (*Lactuca sativa* Linn.) พันธุ์ red oak ที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกส์. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พฤกษศาสตร์) ภาควิชาพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. 88 หน้า.

พิทโยธร ไวยวัฒน์, ศรัทธา ศรีทิพงศ์ และสนอง คำสองสี. (2548). การสูญเสียไนเตรทไปกับการชะกร่อนของดินจากพื้นที่ปลูกกะหล่ำปลีบนที่ลาดชันบนที่สูงภูทับเบิกที่มีการจัดการปุ๋ยที่ต่างกัน. **สารนิพนธ์ การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยนเรศวร**. 70 หน้า.

มุกดา สุขสวัสดิ์. (2546). **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Soil Fertility)**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

มนัชญา รัตนโชติ, มนูญ ศิรินุพงศ์ และสุจริต ส่วนไพโรจน์. (2546). ระยะเวลาการงดสารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยวต่อปริมาณการสะสมไนเตรทในผักน้ำ (*Nasturtium officinale*) 2 ชนิดที่ปลูกโดยระบบ Deep Flow Technique (DFT). **การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 3**. ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์, กรุงเทพฯ. หน้า 32.

เมธิน ศิริวงศ์. (2536). อิทธิพลของวัสดุปลูก ภาชนะปลูก และปุ๋ยต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของมะเขือเทศพันธุ์สีดา มก. ในระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. กรุงเทพฯ.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2558). **ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสตรอเบอรี่** [ออนไลน์]. ได้จาก: http://pikullib.ku.ac.th/Fulltext_TAB2/TAB000025540092/TAB000025540092c.pdf

ยงยุทธ โอสถสภา.(2545). **ธาตุอาหารพืช**. กรุงเทพฯ:ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 350หน้า.

รุ่งนภา ช่างเจรจา และพรรณี ดอยพนาสุข. (2558). ผลของไนโตรเจนต่อการเจริญเติบโตและการสะสมธาตุอาหารในใบต้นชมจันทร์. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลล้านนา.**

วุฒิพงษ์ พิมพ์โคตร. (2546). การเจริญเติบโต การสะสมไนเตรท และการลดไนเตรทก่อนการเก็บเกี่ยวในผักกาดหอม. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาพืชสวนมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**. 80 หน้า.

วิทยา สุริยาภณานนท์. (2524). ดินผสมพืชสวน. **ข่าวสารเกษตรศาสตร์**. 26 (4): 12-23.

วรกฤษณ์ บุญทวิโรจน์. (2551). **ข้อดี-ข้อเสีย ระบบปลูก NFT** [ออนไลน์]. ได้จาก: http://pikullib.ku.ac.th/Fulltext_TAB2/TAB000025540092/TAB000025540092c.pdf

วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. (2548). **เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์**: ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ในระบบการวัดและระบบควบคุม. กรุงเทพฯ. 292 หน้า.

วรพันธุ์ ไชยศรีรัตนากูล, โอภาส ตรีทวีศักดิ์, วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ, อัมพร โพธิ์ใย และวิน บรรจง-ปรุ. (2559). **ไนโตรเจนเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดไนเตรท และแอมโมเนียมในดิน**. ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์. หน้า 1-31.

วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2557). การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีสำหรับตรวจวัดไอออนปรอทด้วยตาเปล่า. **ว. วิทย. มข.** 42(4) : 748-760.

ศูนย์ส่งเสริม และพัฒนาอาชีพการเกษตรเชียงราย (พืชสวน). (2554). **สตรอเบอรี่-GAP**. กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตร และสหกรณ์.

ศิริพร ลีละศิธร. (2528). วัสดุปลูกที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของผักกาดขาวปลี (*Brassica pekinensis*) และเทียนสี (*Balsamina hortensis*). **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชา ปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. กรุงเทพฯ. 155 หน้า.

สนั่น ขำเลิศ. (2522). **หลักและวิธีการขยายพันธุ์พืช**. นำอักษรการพิมพ์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 374 หน้า.

สนั่น ขำเลิศ. (2526). **หลักและวิธีการขยายพันธุ์พืช**. ฟันนี่พับลิชชิ่ง. กรุงเทพฯ. 374 หน้า.

สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์. (2538). **แร่ธาตุอาหารพืชสวน**. ขอนแก่น: โรงพิมพ์ศิริภัณฑ์ ออฟเซ็ท.

สุชาดา ศรีเพ็ญ. (2531). เทคโนโลยีการปลูกพืชไร้ดิน. **เอกสารเผยแพร่ความรู้การประชุมสัมมนาทางวิชาการ ครั้งที่ 6.** สมาคมดินและปุ๋ยแห่งประเทศไทย. 45 หน้า.

สุดชล วุ้นประเสริฐ. (2555). การศึกษาสัดส่วน และความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในการผลิตผักคะน้า และผักชีในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินในระบบปิด. **งานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 33 หน้า.

สุภาภรณ์ ศิริโสภณา. (2524). การศึกษาธาตุอาหารในน้ำ และในดินตะกอนที่มาจากการใช้ดินประเภทต่างๆ บริเวณสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช. **มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย.** กรุงเทพฯ. 406 หน้า.

สมชาย แก้ววังชัย. (2556). **เคมีเซนเซอร์ การหาปริมาณสารเคมีอย่างง่าย** [ออนไลน์]. ได้จาก: http://somchai2k.blogspot.com/2013/10/blog-post_8811.html.

สมพร คนยงค์. (2551). **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน**. โครงการตำรามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ปทุมธานี. 211 หน้า.

สมเพียร เกษมทรัพย์. (2525). **การปลูกไม้ดอก**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 451 หน้า.

อนุรักษ์ พ่วงพล. (2542). **เกษตรเศรษฐกิจในครัวเรือน ผักสวนครัวรายได้เสริม**. กรุงเทพฯ: หจก. โรงพิมพ์อักษรไทย.

อภิรักษ์ หลักชัยกุล. (2539). การศึกษาเปรียบเทียบวัสดุเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกพืชไม่ใช้ดินในผักกาดหอม. **ปัญหาพิเศษปริญญาโท ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. กรุงเทพฯ

อิทธิสุนทร นันทกิจ. (2550). การปลูกพืชในระบบ NFT (Nutrient Film Technique). **เอกสารประกอบการอบรมหลักสูตร การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน รุ่นที่ 8**. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารราชกระบัง. กรุงเทพฯ: หน้า 1-33.

อุมาวดี ลิ้มเสถียรกุล. (2546). การเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์ red oak ที่ปลูกในวัสดุขุยมะพร้าวผสมทรายเมื่อได้รับธาตุไนโตรเจน แคลเซียม และโพแทสเซียมในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**. 104 หน้า.

อรวรรณ ฉัตรสีรุ้ง. (2551). **ความอุดมสูมบูรณ์ของดิน (Soil Fertility)**. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ และอนุรักษศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อำนาจ สุวรรณฤทธิ์. (2548). **ปุ๋ยกับการเกษตรและสิ่งแวดล้อม**. กรุงเทพ:สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 156 หน้า.

Alaburda, J. and Nishihara, L. (1998). Presence of nitrogen compound in well water. **Revista de Saude Publica**. 32 (2): 160-165.

Amr, A. and Hadidi, N. (2001). Effect of cultivar and harvest date on nitrate (NO_3) and nitrite (NO_2) content of selected vegetables gown under open field and green house conditions in Jordan. **Journal of Food Composition and Analysis**. 14 : 59-67.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC) . (1980) . Brucine Colorimetric Method In William Horwitz (ed.) **Methods of Analysis**, 13th edition. Washington, DC. 554-555.

Bassioni, N.H. (1971). Temperature and pH interaction in nitrate uptake. **Plant and Soil**. 35: 445-443.

Bergveld, P. (1970). Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements, IEEE Trans. **Journal of Biomedical Engineering** 17: 70-71.

Biswas, S. and Chowdhury, B. (2004). A novel spectrofluorimetric method for the ultra trace analysis of nitrite and nitrate in aqueous medium and its application to air, water, soil and forensic samples. **Journal of Talanta** 64: 308–312.

Brown, J.R. and Smith, G.E. (1966). Soil fertilization and nitrate accumulation in vegetables. **Agronomy Journal**. 58: 209-212.

Bruning-Fann, C.S. and Kaneenee, J.B. (1993). The effect of nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on human health : a review. **Veterinary and Human Toxicology 35** (6): 521-538.

Bunjongpru, W., Sungthong, A., Porthereraphat, S., Chaisriratanakul, W. and Rayanasukha, Y. (2013). Very low drift and sensitivity of nanocrystal-TiO_2 sensing membrane on pH - ISFET fabricated by CMOS compatible process. **Journal of Applied Surface science** 267: 206-211.

Burns, I.G., Lee, A. and Escobar-Gutierrez, A.J. (2004). Nitrate accumulation in protected lettuce. **Acta Horticulturae** 633: 271-278 .

Burwell, E.R., Timmons, D.R. and Holt, R.F. (1975). Nutrient transport in surface as influenced by soil cover and seasonal period. **Soil Science Society of America, Proceedings**. 39: 523-528.

Cantliffe, D. J. (1972). Nitrate accumulation in spinach grown at different temperatures. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 97: 674-676.

Catado DA., Haroon, M., Schrader, L.E. and Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 6(1): 71-8.

Chaisriratanakul, W., Bunjongpru, W., Jeamsaksiri, W., Srisuwan, A., Porntheeraphat, S., Chaowicharat, E., Hruanun, C., Poyai, A., Phomyothin, D. and Nukeaw, J. (2016). Durable nitrate sensor by surface modification. **Journal of Surface & Coatings Technology** 306: 58–62.

Cheng, W.L., Yu, S., Bo-Ching, C. and Hung-Yu L. (2014). Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **International Journal of**

Environmental Research and Public Health. 11, 4427-4440.

Chou, J.C. and Hsiao, C.N. (2000). Comparison of the pH sensitivity of different surfaces on tantalum pentoxide, **Journal of Sensor and Actuator**. B65: 237-238.

European Commission. (1997). Commission Regulation (EC) No. 194/97 of 31 January 1997. **Official Journal of the European Communities** No. L31/48-50.

Faridbod, F., Norouzi, P., Dinarvand, R., Ganjali, M.R. (2008). Developments in the field of conducting and non-conducting polymer based potentiometric membrane sensors for ions over the past decade. **Journal of Sensor** 8(4): 2331-2412.

Jahn, B.R., Linker, R., Upadhyada, S.K., Shaviv, A. and Slaughter, D.C. (2006). Mid-infrared spectroscopic determination of soil nitrate content. **Journal of Biosystems Engineering** 94 (4): 505-515.

Jones, B.J. Jr. (1997). **Hydroponics -A practical guide for soilless grower**. Boca Raton. Florida: St. Lucie Press.

Jung-Chuan, C. and W. Chen-Yu. (2001). Sensitivity and hysteresis effect in Al_2O_3 gate pH-ISFET. **Journal of Materials Chemistry and Physics** 71: 120-124.

Linker, R., Kenny, A., Shaviv, L., Singher, and Shmulevich, I. (2004). Fourier transform infrared attenuated total reflection nitrate determination of soil pastes using principal component regression, partial least squares, and cross-correlation. **Journal of Applied Spectroscopy** 58: 516-520.

Linker, R., Shmulevich, I., Kenny, A. and Shaviv, A. (2005). Soil identification and chemometrics for direct determination of nitrate in soil using FTIR-ATR mid-infrared Spectroscopy. **Journal of Chemosphere** 61: 652-658.

Lopez Pasquali, C.E., Fernandez Hernando, P. and Durand Alegria, J.S. (2007). Spectrophotometrics simultaneous determination of nitrite, nitrate and ammonium in soil by flow injection analysis. **Analytica Chemica Acta** 600: 177-182.

Lopez Pasquali, C.E., Gallego-Pico, A. and Fernandez Hernando, P. (2010). Two rapid and sensitive automated methods for the determination of nitrite and nitrate in soil samples. **Microchemical Journal** 94: 79-82.

Matsuo, T., Esahi, M. and Abe, H. (1079). pH ISFET using Al_2O_3, Si_3N_4 and SiO_2 gate thin film. **IEEE Transaction of electron Devices ED-26**: 1939-1944.

Maynard, D.N. and Barker, A.V. (1972). Nitrate content of vegetable crops. **Horticultural Science** 7(3): 224-246.

Maynard, D.N., Barker A.V., Minotti, P.L. and Peck, N.H. (1976). Nitrate accumulation in vegetable. **Advances in Agronomy**. 28:71-118.

Alahi, M.E., Li X., Asif, I. Z., Subhas, M. and Lucy, B. (2016). Practical nitrate sensor based on electrochemical impedance measurement. **International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings.**

Asadi, M.E., Clemente, R.S., Gupta, A.S., Loof, R. and Hansen, G.K. (2002). Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in an acid-sulphate soil in Thailand. **Journal of Agricultural Water Management** 52: 197-213.

Mikolajick, T., Kuhnhold, R. and Ryssel, H. (1997). The pH-sensing properties of tatanlum pentoxide film fabricated by metal organic low pressure chemical vapor. **Journal of Sensor and Actuator**. Volume 44: 262-267.

Morgan, L. (1999). **Hydroponic lettuce production.** Caspe Publications Pty Ltd. Narrabeen, Australia.

Nasser, H., Aladdin, F. and Nasser, H. A. (2018). Determination of nitrates in samples using ion selective electrode with its new conditions. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences** 11 (1): 45-48.

Nelson, P.V. (1978). **Greenhouse operation and management**. Reston Publ. Co. Inc., Roston, Virginia. 518 p.

Parab, H., Shenoy, N., Dudwadkar, A., Kumar, S. D., Nijsure, N., Chavan, M. and Reddy, A.V.R. (2013). Potassium hydrogen sulphate-A new ionic strength adjustor for determination of nitrate in potable waters and denitration plant effluents using ion selective electrode. **International Journal of Chemical Science and Technology** 3(4): 65-70.

Polizotto, K.R., Wilcox, G.E., and Jones C.M. (1975). Response of growth and mineral composition of potato to nitrate and ammonium nitrate. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 100(2): 165-168.

Samarakoon, U.C., Weerasinghe, P.A., Weerakkody, W.A.P. (2006). Effect of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on nutrient up take, growth and yield of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in stationary culture. **Journal of Tropical Agriculture**

Research 18: 13.

Sanguandeekul, S. (1999). The effect of cultivar, nutrient solution concentration and season on the yield and quality of NFT produced lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Ph.D.Thesis Massey University**.

Santamaria, P. and Gonnella, M. (2001). Ways of reducing rocket salad nitrate content. **Acta Horticulturae** 548: 529-536.

Schwarz, M. (1995). **Soilless culture management.** Germany: Springer-Verlag Berlin Heidel bery.

Seginer, L. (1998). Nitrate concentration in greenhouse lettuce. A Modeling study. **Acta Horticulturae** 456: 189-197.

Urrestarazu, M. (1998). Nitrate accumulation reduction using chloride in the nutrient solution on lettuce growing by NFT in semiarid climate conditions. **Journal of Plant Nutrition** 21 (8).

Viets, F.G. and Hageman, R.H.. (1971). Factors affecting the accumulation of nitrate in soil, water and plants. **Agricultural Handbook No. 413**. Washington, D.C. 325 p.

White, J.W. (1974). Criteria of selection of growing media for greenhouse crop. **Florists Review** 155(74): 28-30.

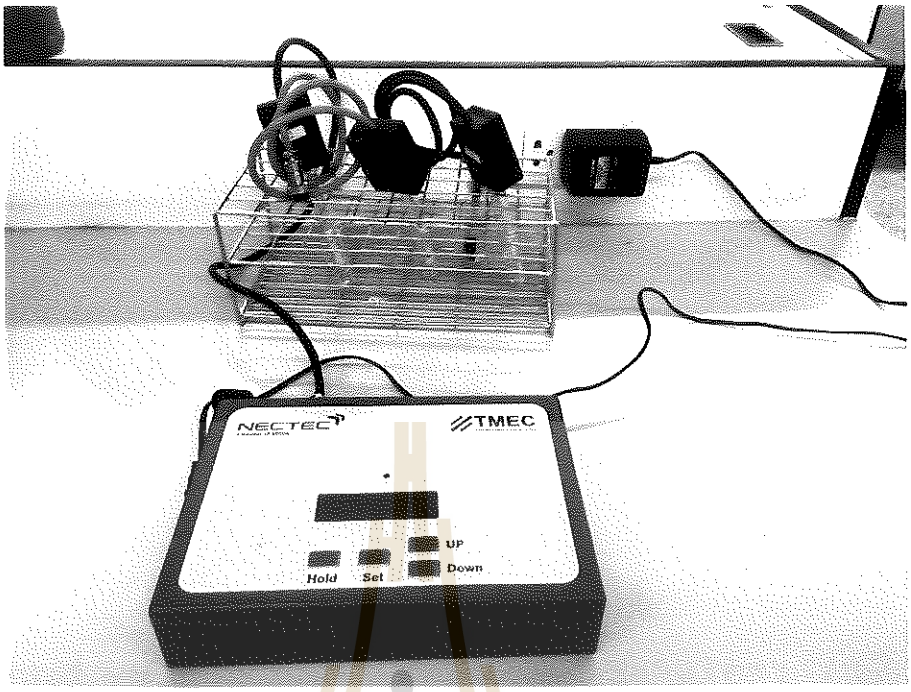
Wright, M.J. and Davison, K.L. (1994). Nitrate accumulation in crops and nitrate poisoning in animals. **Advance Agronomy** 16: 197-247.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

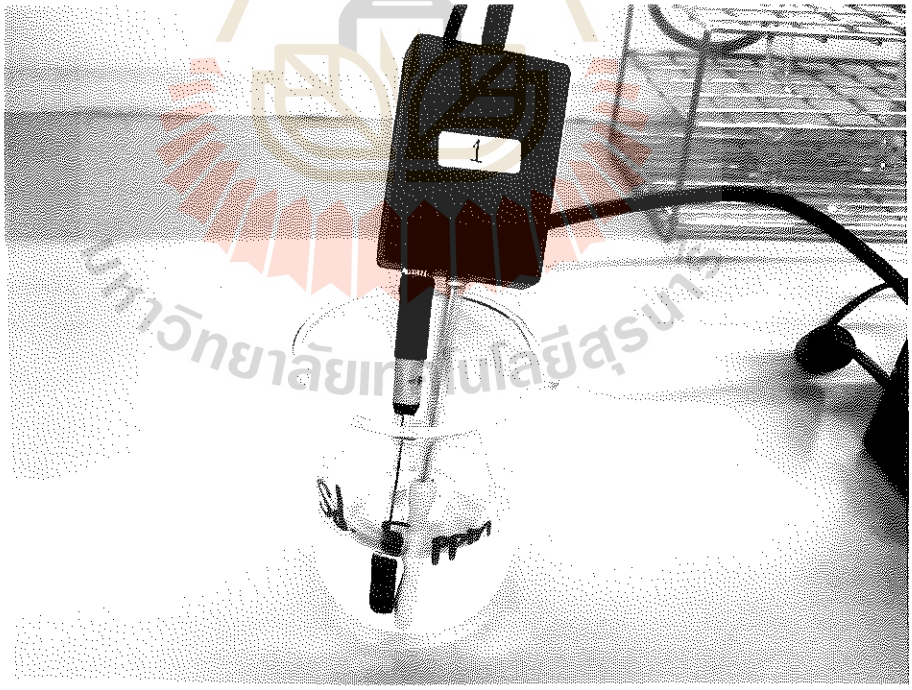
ภาคผนวก ก

ภาพผนวกที่ 1 การวัดความสูงของลำต้นผักกาดหอม

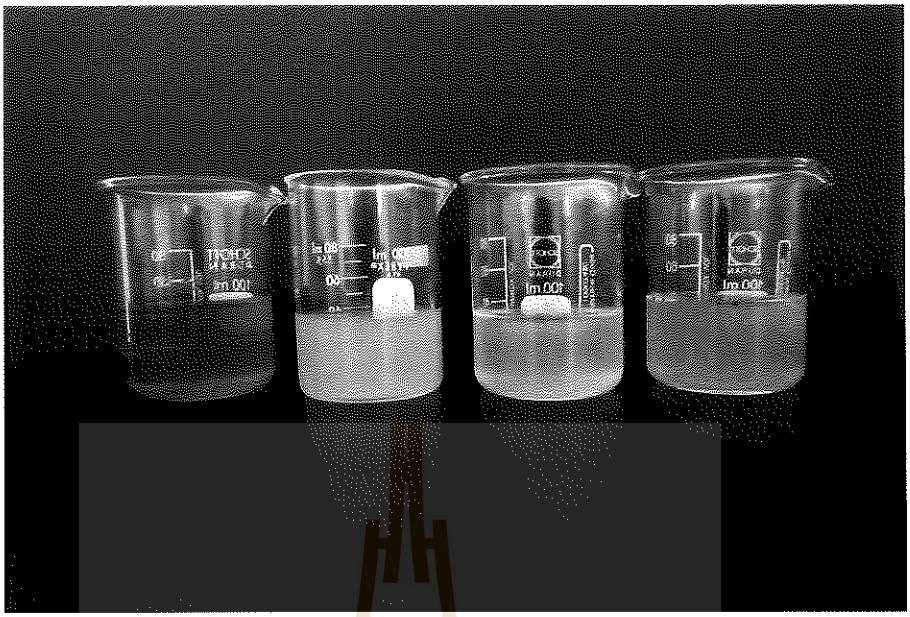
ภาพผนวกที่ 2 การวัดความกว้างทรงพุ่มผักกาดหอม



ภาพผนวกที่ 3 ไนเตรทเซ็นเซอร์



ภาพผนวกที่ 4 การวัดปริมาณไนเตรทโดยใช้ไนเตรทเซ็นเซอร์



ภาพผนวกที่ 5 ตัวอย่างน้ำที่ได้จากการชะล้างจากวัสดุปลูกทั้ง 4 สัปดาห์

ภาพผนวกที่ 6 ตัวอย่างน้ำที่ได้จากการชะล้างจากวัสดุปลูก 4 ชนิดในสัปดาห์ที่ 2

ภาคผนวก ข

ตารางภาคผนวกที่ 1 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รี ในวัสดุปลูก สัปดาห์ที่ 1-4

กรรมวิธี	สัปดาห์ที่ 1 (มก./ล.)	สัปดาห์ที่ 2 (มก./ล.)	สัปดาห์ที่ 3 (มก./ล.)	สัปดาห์ที่ 4 (มก./ล.)
สูตรธาตุอาหาร				
ปุ๋ยทางน้ำสูตรที่ 1	30.9b[/1]	29.6b	95.6a	108a
ปุ๋ยทางน้ำสูตรที่ 2	74.5a	41.9a	100a	119a
ปุ๋ยทางดินสูตรที่ 1	3.9c	4.7c	15.2b	2.1b
ปุ๋ยทางดินสูตรที่ 2	4.3c	5.7c	16.5b	4.0b
%CV	21.27	13.65	4.58	31.10
F-test[/2]	**	**	**	**

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

ตารางภาคผนวกที่ 2 ผลของสูตรธาตุอาหารที่แตกต่างกันต่อการชะล้างไนเตรทที่ปลูกสตรอว์เบอร์รี ในวัสดุปลูก สัปดาห์ที่ 5-7

กรรมวิธี	สัปดาห์ที่ 5 (มก./ล.)	สัปดาห์ที่ 6 (มก./ล.)	สัปดาห์ที่ 7 (มก./ล.)
สูตรธาตุอาหาร			
ปุ๋ยทางน้ำสูตรที่ 1	116b[/1]	97.0b	75.9b
ปุ๋ยทางน้ำสูตรที่ 2	170a	139a	157a
ปุ๋ยทางดินสูตรที่ 1	5.8c	2.2c	0.3c
ปุ๋ยทางดินสูตรที่ 2	9.8c	4.4c	1.7c
%CV	23.62	23.05	45.92
F-test[/2]	**	**	**

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 3 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อความสูงทรงพุ่มของผักกาดหอม

กรรมวิธี	ความสูงทรงพุ่ม (ซม.)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	22.2	23.1
สูตรธาตุอาหารที่ 2	21.2	22.3
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	23.1a[/1]	23.4a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	23.4a	23.9a
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	23.0a	23.0a
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	17.3b	20.3b
CV (%)	6.69	5.69
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	*	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 4 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอม

กรรมวิธี	ความกว้างทรงพุ่ม (ซม.)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	35.2	37.1
สูตรธาตุอาหารที่ 2	34.3	35.7
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	37.2a[/1]	38.5a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	37.0a	37.7a
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	36.1a	37.0a
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	28.6b	32.4b
%CV	5.44	7.01
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 5 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อจำนวนใบของผักกาดหอม

กรรมวิธี	จำนวนใบ (ใบต่อต้น)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	18.0	18.5
สูตรธาตุอาหารที่ 2	17.8	17.5
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	17.1c[/1]	16.9c
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	18.6b	19.1b
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	20.2a	20.6a
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	15.7d	15.5d
%CV	2.40	2.99
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	**
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 6 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อพื้นที่ใบของผักกาดหอม

กรรมวิธี	พื้นที่ใบ (ตร.ซม.)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	2,444	2,558
สูตรธาตุอาหารที่ 2	2,385	2,407
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	2,735a[/1]	2,637a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	2,796a	2,705a
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	2,919a	2,824a
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	1,209b	1,763b
%CV	10.63	9.72
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 7 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อน้ำหนักสดต้นของผักกาดหอม

กรรมวิธี	น้ำหนักสดต้น (กรัมต่อต้น)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	170	168
สูตรธาตุอาหารที่ 2	151	155
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	180a[/1]	172a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	189a	180a
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	204a	195a
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	68.4b	97.7b
%CV	18.98	17.92
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	*	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 8 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อน้ำหนักแห้งต้นของผักกาดหอม

กรรมวิธี	น้ำหนักแห้งต้น (กรัมต่อต้น)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	10.2	9.7
สูตรธาตุอาหารที่ 2	8.0	8.3
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	9.7a[/1]	8.9a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	10.0a	9.3a
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	10.8a	10.6a
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	7.0b	7.4b
%CV	15.16	29.59
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	*	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 9 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อปริมาณไนโตรเจนในใบของผักกาดหอมหลังครบอายุการเก็บเกี่ยว

กรรมวิธี	ไนโตรเจนในใบ (%)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	2.4	2.2
สูตรธาตุอาหารที่ 2	2.7	2.9
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	2.7	2.7a[/1]
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	2.7	2.6a
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	2.7	2.9a
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	2.0	2.1b
%CV	22.70	13.32
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	*
ปัจจัยรอง	ns	*
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 10 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการสะสมไนเตรทในใบของผักกาดหอม

กรรมวิธี	ไนเตรทในใบ (มก./กก.นน.สด)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	2,334	2,185
สูตรธาตุอาหารที่ 2	2,029	2,419
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	1,613b[/1]	2,163
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	2,004ab	2,463
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	1,822b	1,949
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	2,695a	2,614
%CV	28.42	39.26
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	ns
ปัจจัยรอง	*	ns
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 11 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 1

กรรมวิธี	ไนเตรทในสารละลายน้ำ (มก./ล)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	128	124
สูตรธาตุอาหารที่ 2	130	131
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	173a[/1]	169a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	110c	111b
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	96c	113b
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	137b	117b
%CV	11.35	9.72
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 12 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 2

กรรมวิธี	ไนเตรทในสารละลายน้ำ (มก./ล)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	138	146
สูตรธาตุอาหารที่ 2	151	143
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	224a[/1]	188a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	115bc	139b
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	108c	144b
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	131b	106c
%CV	9.96	13.49
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 13 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 3

กรรมวิธี	ไนเตรทในสารละลายน้ำ (มก./ล)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	115	120
สูตรธาตุอาหารที่ 2	158	147
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	247a[/1]	207a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	106b	116b
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	90b	113b
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	103b	98b
%CV	30.92	12.68
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	*	*
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 14 ผลของสูตรธาตุอาหารพืช วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อการชะล้างไนเตรทในสารละลายสัปดาห์ที่ 4

กรรมวิธี	ไนเตรทในสารละลายน้ำ (มก./ล)	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	20.2	21.3
สูตรธาตุอาหารที่ 2	48.3	33.3
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	44.9ab[/1]	19.7b
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	15.6b	14.7b
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	17.0b	15.8b
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	59.5a	59.1a
%CV	68.49	61.51
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	*	*
ปัจจัยรอง	*	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางภาคผนวกที่ 15 ผลของสูตรธาตุอาหาร วัสดุปลูก และระดับการให้น้ำ ต่อเปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลายจากการชะล้างธาตุอาหาร

กรรมวิธี	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียไนเตรทในสารละลาย	
	การให้น้ำเกินความสามารถในการอุ้มน้ำ	
	10%	30%
ปัจจัยหลัก (สูตรธาตุอาหาร)		
สูตรธาตุอาหารที่ 1	15.5	21.5
สูตรธาตุอาหารที่ 2	16.3	24.2
ปัจจัยรอง (วัสดุปลูก)		
วัสดุปลูก 1 ขุยมะพร้าว : ทราย (1:1)	25.6a[/1]	32.9a
วัสดุปลูก 2 ขุยมะพร้าว : ทราย (3:1)	13.2b	19.5b
วัสดุปลูก 3 ขุยมะพร้าว : ทราย (5:1)	13.6b	21.2b
วัสดุปลูก 4 ดินปลูก	11.2b	17.8b
%CV	14.72	15.96
F-test		
ปัจจัยหลัก[/2]	ns	ns
ปัจจัยรอง	**	**
ปัจจัยหลักxปัจจัยรอง	ns	ns

[/1] ตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึง มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเป็นไปได้ที่ 0.01 โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

[/2] ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, *= แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.05, ** = แตกต่างทางสถิติในระดับ 0.01

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนิศารัตน์ ไขนอก เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2534 ที่บ้านเลขที่ 119/53 ถนนจอมสุรางค์ยาตร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนสุขานารี และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา และเมื่อปี พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตพืช) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และในปี พ.ศ. 2556 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนจาก วช. ระดับบัณฑิตศึกษา และได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี