วว.

โครงการวิจัยที่ ภ. 50-08 / ย. 5 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การวิจัยการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่อง และการใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ และปุ๋ยหมักแบบครบวงจร

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 50-08
การพัฒนาเทคโนโลยีทางเลือกของการบำบัดของสารมลพิษอินทรีย์
และผลิตพลังงานทดแทนจากฟาร์มปศุสัตว์

โครงการย่อยที่ 5
การวิจัยการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องและการใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ
และปุ๋ยหมักแบบครบวงจร

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)
การวิจัยการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องและการใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ และปุ๋ยหมักแบบครบวงจร

โดย

อรรณพ จาฏามระ

สมชาย ดารารัตน์ **กาญนิถา ครองธรรมชาติ**
โสภณ บุญมั่น **ณัฐวุฒิ บุญเลี่ยม**
ทวีศักดิ์ หอมดอกไม้ **อังคณา เกตุแก้ว**
พัทจารี ใจอุ่น **สาวิตรี ชัยวิเศษ**

บรรณาธิการ วว., กรุงเทพฯ 2554
ลิขิต หาญจางสิทธิ์
บุญเรียม น้อยชุมแพ
พิสุทธิ์ พลับสวาท

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

(นางเกษมศรี หอมชื่น)
ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การวิจัยการบำบัดน้ำเสียต่อเนื่องและการใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพและปุ๋ยหมักแบบครบวงจร เป็นโครงการต่อเนื่องในชุดวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีทางเลือกของการบำบัดของสารมลพิษอินทรีย์และผลิตพลังงานทดแทนจากฟาร์มปศุสัตว์.

งานวิจัยเรื่องนี้ ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือของนักวิจัยทุกคนในฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และความช่วยเหลือของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้จัดสรรอุปกรณ์และชุดการทดลอง ที่โครงการไม่ได้รับครุภัณฑ์สำคัญในการทดลอง, คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ฉ
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	4
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	11
3. การวิจารณ์ผลการทดลอง	46
4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล	54
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	107
6. เอกสารอ้างอิง	112

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.	ประเภทและปริมาณของของเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นในประเทศไทย	6
ตารางที่ 2.	เป้าหมายการให้บริการ (ผลลัพธ์) และตัวชี้วัดของแผนงานวิจัย	10
ตารางที่ 3.	การเปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศและใช้อากาศ	11
ตารางที่ 4.	วิธีบำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ เพื่อกำจัดไนโตรเจน	13
ตารางที่ 5.	ข้อดีข้อเสียทางกายภาพและทางเคมีในกระบวนการกำจัดไนโตรเจน	14
ตารางที่ 6.	คุณภาพของน้ำที่สามารถนำมาปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก	19
ตารางที่ 7.	ปุ๋ยบางชนิดที่ใช้ในสารละลายเพื่อให้ธาตุอาหารหลัก	20
ตารางที่ 8.	สูตรมาตรฐานของสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก	22
ตารางที่ 9.	ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุอาหารแต่ละชนิดในสารละลายที่เหมาะสมสำหรับปลูกพืช	23
ตารางที่ 10.	ชนิดของธาตุอาหารจากปุ๋ยเหลวจากฟาร์มสุกร โดยตัวอย่างการศึกษาจากเมือง Saskatchewan	24
ตารางที่ 11.	ธาตุรอง, จุลธาตุ และธาตุอื่นๆ ในมูลสุกร, ค่าเฉลี่ยของข้อมูลได้มาจาก 20 แหล่ง (Robinson *et al.* (2222) อ้างในโอสถสภา (2528)	24
ตารางที่ 12.	น้ำหนักแห้ง (%) และปริมาณธาตุอาหารในโรงหมักปุ๋ยจากมูลสุกร	25
ตารางที่ 13.	คุณภาพของน้ำที่สามารถนำมาปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก	37
ตารางที่ 14.	ปุ๋ยบางชนิดที่ใช้ในสารละลายเพื่อให้ธาตุอาหารหลัก	38
ตารางที่ 15.	ช่วงความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชที่นิยมใช้ในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน	40
ตารางที่ 16.	สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกผักหลายชนิดด้วยระบบรากแช่ (NFT) ของบริษัท Accent Hydroponics จำกัด ประเทศออสเตรเลีย (ทองอร่าม 2546)	49
ตารางที่ 17.	ปริมาณของธาตุอาหารหลักในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ และเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารหลักในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	56
ตารางที่ 18.	ปริมาณของธาตุอาหารรองในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศและเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารหลักในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 19. ปริมาณธาตุอาหารหลักในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1) 57

ตารางที่ 20. ปริมาณธาตุอาหารรองในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1) 57

ตารางที่ 21. ปริมาณธาตุอาหารหลักในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2) (comment 16) 58

ตารางที่ 22. ปริมาณธาตุอาหารรองในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2) (comment 16) 58

ตารางที่ 23. จำนวนใบของผักกาดหอมเมื่ออายุต่าง ๆ (ชุดการทดลองที่ 1) 59

ตารางที่ 24. ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 1) 61

ตารางที่ 25. การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 1) 62

ตารางที่ 26. ความกว้างใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 1) 63

ตารางที่ 27. น้ำหนักสดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (กรัม) (ชุดการทดลองที่ 1) 65

ตารางที่ 28. น้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (ชุดการทดลองที่ 1) 66

ตารางที่ 29. พื้นที่ใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (ตารางเซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 1) 67

ตารางที่ 30. ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอมพันธุ์โอ๊ก (ชุดการทดลองที่ 1) 68

ตารางที่ 31. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (ชุดการทดลองที่ 1) 70

ตารางที่ 32. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 1) 71

ตารางที่ 33. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1) 74

ตารางที่ 34. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1) 75

ตารางที่ 35. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1) 77

ตารางที่ 36. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1) 78

ตารางที่ 37. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 1) 79

ตารางที่ 38. ค่าดีโอในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 1) 80

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 39. ค่าความเป็นกรด – เบสในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 1)	82
ตารางที่ 40. ค่าการนำไฟฟ้าในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 1)	83
ตารางที่ 41. จำนวนใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 2)	85
ตารางที่ 42. ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (เซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)	87
ตารางที่ 43. การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (เซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)	88
ตารางที่ 44. ความกว้างใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (เซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)	89
ตารางที่ 45. น้ำหนักสดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (กรัม) (ชุดการทดลองที่ 2)	91
ตารางที่ 46. น้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (กรัม) (ชุดการทดลองที่ 2)	92
ตารางที่ 47. พื้นที่ใบของผักกาดหอม (ตารางเซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)	93
ตารางที่ 48. ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	95
ตารางที่ 49. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	96
ตารางที่ 50. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 2)	97
ตารางที่ 51. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2)	98
ตารางที่ 52. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2)	99
ตารางที่ 53. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2)	100
ตารางที่ 54. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2)	101
ตารางที่ 55. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 2)	102
ตารางที่ 56. ค่าดีโอในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 2)	103
ตารางที่ 57. ค่าความเป็นกรดเบสในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 2)	104
ตารางที่ 58. ค่าการนำไฟฟ้าในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 2)	105

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.	วัฏจักรไนโตรเจน (Mark *et al*. 2003)	15
รูปที่ 2.	ปัจจัยที่ควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (ทองอร่าม 2546)	29
รูปที่ 3.	ลักษณะของไข่พยาธิ *Ascaris suum* ที่พบในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศก่อนผ่านการกรองด้วยถังกรองทราย	55
รูปที่ 4.	จำนวนใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	60
รูปที่ 5.	ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	61
รูปที่ 6.	การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	62
รูปที่ 7.	ความกว้างใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	63
รูปที่ 8.	น้ำหนักสดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	65
รูปที่ 9.	น้ำหนักแห้งของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	66
รูปที่ 10.	พื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	67
รูปที่ 11.	ดัชนีพื้นที่ใบ (ชุดการทดลองที่ 1)	69
รูปที่ 12.	อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1)	70
รูปที่ 13.	ประสิทธิภาพในการกำจัดทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 1)	71
รูปที่ 14.	ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1)	74
รูปที่ 15.	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1)	76
รูปที่ 16.	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1)	77
รูปที่ 17.	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1)	78
รูปที่ 18.	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 1)	80
รูปที่ 19.	ค่าดีโอในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1)	81
รูปที่ 20.	ค่าความเป็นกรด – เบสในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1)	82
รูปที่ 21.	ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1)	84
รูปที่ 22.	จำนวนใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	86
รูปที่ 23.	ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	87
รูปที่ 24.	การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	88

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 25. ความกว้างใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	90
รูปที่ 26. น้ำหนักสดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	91
รูปที่ 27. น้ำหนักแห้งของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	92
รูปที่ 28. พื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	94
รูปที่ 29. ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	95
รูปที่ 30. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)	96
รูปที่ 31. ประสิทธิภาพในการกำจัดทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 2)	98
รูปที่ 32. ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2)	99
รูปที่ 33. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2)	100
รูปที่ 34. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2)	101
รูปที่ 35. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2)	102
รูปที่ 36. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 2)	103
รูปที่ 37. ค่าดีโอในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2)	104
รูปที่ 38. ค่าความเป็นกรด – เบสในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2)	105
รูปที่ 39. ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2)	106

THE STUDY OF CONTINUOUS WASTEWATER TREATMENT AND THE COMPLETELY USE BIOGAS AND COMPOSTING

Annop Chatamra, Somchai Dararat, Kannitha Krongthamchat, Sopol Boonman, Nuttawoot Boonliam, Tavesak Homdokmi, Angkhana Ketkeaw, Pattacharee Jaiaun and Savitree Chaiwiset

ABSTRACT

The aim of this research was to investigate the use of the swine farm effluent from an anaerobic treatment process as a nutrient solution in a hydroponics culture with Nutrient Film Technique (NFT).

The study of the lettuce growth divided to 2 parts. Part 1 was the growth of lettuce (Red Oak) in the commercial nutrient solution (Treatment 1). Treatment 1 was compared to the growth of lettuce which feed on the swine farm effluent in Treatment 2, 3 and 4. The nutrient solution in Treatment 2, 3 and 4 had Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) concentration of 230 mg/L, 240 mg/L and 250 mg/L, respectively. The results showed that Red Oak in Treatment 1 was the highest growth. It meaned that it had more fresh and dry weight than other treatments. This indicated that the lettuce grew better on commercial nutrient solution than the swine farm effluent which had TKN concentration of 240, 230 and 250 mg/L. Treatment 3 had the highest efficiency to treat TKN (87.95 percent), COD (60.00 percent), and BOD (28.08 percent). In addition, the highest efficiency to treat TP (88.13 percent), TS (31.92 percent) and SS (84.43 percent) was found in Treatment 1. In Part 2, the experiment designed to plant the lettuce (Red Oak) in commercial nutrient solution (Treatment 1) compared with mixed solution of the swine farm effluent from anaerobic treatment process and commercial nutrient solution in the ratio of 50 : 50 (Treatment 2) and 75 : 25 (Treatment 3). The fresh and dry weight from Treatment 1 showed significantly difference from other Treatments. The result showed that the lettuce grew better on commercial nutrient solution than any other mixed solutions. Treatment 1 had the highest efficiency to treat TKN (66.67 percent), COD (33.00 percent), TS (33.62 percent) and SS (80 percent). Treatment 3 had the highest efficiency to treat TP (99.27 percent). Treatment 2 had the highest efficiency to treat BOD (58.81 percent).

The results indicated that three eggs of helminth *Ascaris suum* per millilitre of the swine farm wastewater were found. After the swine effluent was passed to sand filter, helminth *Ascaris suum* eggs were not found. The results also showed that the composition of the swine farm effluent had macronutrient and micronutrient elements completely, except sulphur (S).

From these 2 experimental parts, it was able to summary that the swine farm effluent from an anaerobic treatment process could not compensate commercial nutrient solution. However, the mixed solution of the swine farm effluent from anaerobic treatment process and commercial nutrient solution in the ratio of 50 : 50 had the tendency to make the lettuce growth better than that of the swine farm effluent as sole nutrient solution.

การวิจัยการบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องและการใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพและปุ๋ยหมักแบบครบวงจร

อรรณพ จาฏามระ[1], สมชาย ดารารัตน์[1], กาญนิถา ครองธรรมชาติ[1], โสภณ บุญมั่น[1], ณัฐวุฒิ บุญเลี่ยม[1], ทวีศักดิ์ หอมดอกไม้[1], อังคณา เกตุแก้ว[1], พัทจารี ใจอุ่น[1] และ สาวิตรี ชัยวิเศษ[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศในการทดแทนสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิกส์ ในรางปลูกแบบ Nutrient Film Technique (NFT).

การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณทีเคเอ็นแตกต่างกัน คือ 230 มก./ลิตร (กลุ่มทดลองที่ 2), 240 มก./ลิตร (กลุ่มทดลองที่ 3) และ 250 มก./ลิตร (กลุ่มทดลองที่ 4) เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า (กลุ่มทดลองที่ 1) พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีการเจริญเติบโตมากที่สุด คือ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมากที่สุด แตกต่างกับอีก 3 กลุ่มทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในชุดการทดลองที่ 1 พบว่า กลุ่มทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่าทีเคเอ็น (ร้อยละ 87.95) ค่าซีโอดี (ร้อยละ 60) และค่าบีโอดี (ร้อยละ 28.08) กลุ่มทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (ร้อยละ 88.13) ค่าของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ 31.92) และค่าของแข็งแขวนลอย (ร้อยละ 84.43) ชุดการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการประยุกต์ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิกส์ โดยศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าในอัตราที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตรา 50 : 50 (กลุ่มทดลองที่ 2) และอัตรา 75 : 50 (กลุ่มทดลองที่ 3)

---

[1]ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้าเพียงอย่างเดียว (กลุ่มทดลองที่ 1) พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้าเจริญเติบโตมากที่สุด คือ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมากที่สุด แตกต่างกับอีก 2 กลุ่มทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือปลูกในสารละลายน้ำทิ้งผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และอัตรา 75: 50 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในชุดการทดลองที่ 2 พบว่า กลุ่มทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่าทีเคเอ็น (ร้อยละ 66.67) ค่าซีโอดี (ร้อยละ 33) ค่าของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ 33.62) และค่าของแข็งแขวนลอย (ร้อยละ 80) กลุ่มทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (ร้อยละ 99.27) และกลุ่มทดลองที่ 2 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่าบีโอดี (ร้อยละ 58.81).

น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ มีจำนวนไข่หนอนพยาธิไส้เดือน Ascaris suum 3 ฟอง/มล.ของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร เมื่อนำน้ำทิ้งมากรองด้วยถังกรองทราย และนำมาตรวจนับไข่พยาธิจะไม่พบไข่หนอนพยาธิ การศึกษาปริมาณธาตุอาหารพืชในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ พบว่า มีธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองครบทุกธาตุ ยกเว้นธาตุกำมะถัน.

จากการศึกษาทั้ง 2 ชุดการทดลอง สรุปได้ว่า น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรไม่สามารถนำมาทดแทนสารละลายการค้าได้ แต่การใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า ในอัตรา 50:50 มีแนวโน้มให้ผลผลิตผักกาดหอมมากกว่ากลุ่มการทดลองอื่นที่ใช้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเป็นสารละลายธาตุอาหาร.

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การหมุนเวียนใช้ประโยชน์ของเสียในมุมมองของกระบวนการจัดการของเสียกำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก โดยเฉพาะในกิจการปศุสัตว์ที่สามารถใช้ของเสียเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช (OMAFRA 2000). โดยแนวทางการนำน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ในกิจกรรมการเกษตร เพื่อลดปัญหาการแย่งน้ำระหว่างภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรม (Massound *et al*. 2003) ประกอบกับนโยบายของรัฐบาลในการส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นแหล่งอาหารหรือครัวของโลก ซึ่งในการนี้ ฟาร์มปศุสัตว์เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญที่จะเกื้อหนุนนโยบายดังกล่าว. แต่ขณะเดียวกัน ประเทศคู่ค้าของประเทศไทยได้มีมาตรการในการแข่งขันที่ใช้เกณฑ์ด้านสุขภาพสิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยกำหนด, ดังนั้น การจัดการด้านคุณภาพสิ่งแวดล้อมฟาร์มปศุสัตว์ จึงเป็นการช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมดังกล่าวในตลาดโลก. การจัดการคุณภาพน้ำของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการผลิตของกิจกรรมดังกล่าว นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่เอื้ออำนวยให้การรับรองคุณภาพด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ. โดยทั่วไป น้ำเสียและของเสียจากกิจกรรมที่กล่าวข้างต้นจะถูกจัดเป็นน้ำเสียประเภทที่มีสารมลพิษอินทรีย์ความเข้มข้นสูง ประกอบกับประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศร้อนอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30°ซ. ดังนั้น จากองค์ประกอบดังกล่าว เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่สามารถผลิตพลังงานทดแทนในกลุ่มก๊าซมีเทนและไฮโดรเจน จึงเป็นทางเลือกของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความสนใจและมีการประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้น. ประกอบกับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้จัดอยู่ในกลุ่มเทคโนโลยีแบบ Green Machine (Grobicki 1997) ได้แสดงให้เห็นว่า กลุ่มประเทศในทวีปยุโรป ได้มีการใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มปศุสัตว์ในอัตราที่เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 10 ต่อปี ตั้งแต่ในช่วงปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา, โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการเกษตร. โดยในปี ค.ศ. 1987 ประเทศในทวีปยุโรปมีการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศประมาณ 200 โรงงาน (Pauss and Nynas 1990) และเพิ่มเป็น 397 โรงงาน ในปี ค.ศ. 1994 (Nyns 1994). ประกอบกับสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) ได้จัดทำร่างแผนยุทธศาสตร์การอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทยปี พ.ศ. 2544, โดยได้ครอบคลุมแนวทางการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน ซึ่งประกอบด้วย พลังงานชีวภาพ เอทานอล, ไบโอดีเซล และก๊าซชีวภาพ. โดยในส่วนของพลังงานจากก๊าซชีวภาพ ได้กำหนดมาตรการในการส่งเสริม ดังนี้:

- สนับสนุนให้หน่วยงานของรัฐและเอกชน มีการติดตั้งระบบก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดต่างๆ ทั้งขนาดเล็ก, ขนาดกลาง และขนาดใหญ่, รวมถึงส่งเสริมการสาธิตและติดตั้งระบบก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม, การสาธิตเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน, และระบบบำบัดน้ำเสียในโรงฆ่าสัตว์ของเทศบาลต่างๆ.
- สนับสนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น, รวมถึงสนับสนุนการศึกษา, วิจัย, พัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือที่สามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ.

เนื่องจากประเทศไทยกำลังประสบปัญหาการขาดแคลนพลังงาน อีกทั้งยังมีความต้องการระบบการจัดการของเสียที่มีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย. นอกจากนั้น กรมการพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ตั้งเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจาก 0.5% ของความต้องการพลังงานรวมของประเทศในปี พ.ศ. 2545 เป็นร้อยละ 8 ของความต้องการพลังงานรวมของประเทศในปี พ.ศ. 2554 ซึ่งได้รับความเห็นชอบจากคณะรัฐมนตรีเมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2546.

ประเทศไทยและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลายต่างมีเป้าหมายในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม เพื่อก้าวไปสู่ความเป็นประเทศพัฒนา. รูปแบบการพัฒนาที่แพร่หลาย คือ การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมจากแบบเกษตรกรรมเป็นแบบอุตสาหกรรม (หรือเกษตรอุตสาหกรรม), โดยที่การพัฒนาดังกล่าวจะต้องอาศัยพลังงานและทรัพยากรเป็นปัจจัยหลัก. ทั้งนี้ เนื่องจากพลังงานและวัตถุดิบ ถือเป็นต้นทุนหลักในการผลิตทางอุตสาหกรรม. ในทางปฏิบัติประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ไม่สามารถพัฒนาประเทศจนบรรลุเป้าหมายได้เนื่องจากการขาดแคลนแหล่งพลังงาน (ยกเว้นประเทศที่มีแหล่งทรัพยากรพลังงานเป็นของตนเอง) และปัญหามลพิษอันเนื่องของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต, ตลอดจนของเหลือทิ้งจากวิถีการดำเนินชีวิตแบบสังคมอุตสาหกรรม (ตารางที่ 1). การจัดการ/กำจัดขยะของเหลือทิ้งดังกล่าว จำเป็นต้องใช้พลังงานและทรัพยากร ซึ่งก่อเกิดปัญหาต่อเนื่องจากการพัฒนาเศรษฐกิจ.

ตารางที่ 1. ประเภทและปริมาณของของเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

ประเภท	ปริมาณ	ผลกระทบ
ขยะชุมชน	14 ล้านตัน/ปี	ร้อยละ 76 ของปริมาณขยะไม่ได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธี และมีประสิทธิภาพก่อให้เกิดปัญหาการสะสมของขยะซึ่งเป็นการทำลายสภาพแวดล้อมของชุมชน
ชีวมวล	160 ล้านตัน/ปี	แม้จะมีการนำไปเผาเพื่อให้พลังงานความร้อน
มูลสัตว์	100 ล้านตัน/ปี	แทนเชื้อเพลิง หรือใช้ในรูปแบบอื่นๆ แต่ก็เป็น
น้ำมันพืช	7 ล้านตัน/ปี	เพียงส่วนน้อยและเป็นการใช้งานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ
น้ำเสียอุตสาหกรรม	3,167 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี	ต้องใช้งบประมาณและพลังงานจำนวนมากในการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้

การบำบัดน้ำเสียจากกิจกรรมของฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทย โดยทั่วไป สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท. ประเภทแรก การออกแบบจะเน้นการใช้เทคโนโลยีที่ต้องการพึ่งพาพลังงานในการเติมอากาศลงสู่ถังปฏิกิริยาแบบเข้มข้น แต่ขณะเดียวกันใช้พื้นที่ในการก่อสร้างระบบค่อนข้างน้อย. การใช้พลังงานเพื่อเติมอากาศในปริมาณสูง ส่งผลให้ระบบบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่สูงมาก, ก่อปัญหาด้านงบประมาณในหลายโรงงานในอุตสาหกรรมที่เลือกใช้เทคโนโลยีประเภทนี้. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียประเภทที่สอง มีการใช้พลังงานต่ำ แต่ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างระบบค่อนข้างมาก, ก่อปัญหาการหาพื้นที่ในการก่อสร้างระบบและเป็นปัญหาที่สามารถพบได้เสมอในการก่อสร้างระบบบำบัดในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีพื้นที่จำกัด. การพิจารณาถึงปริมาณตะกอนชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ มีสัดส่วนที่สูงมากต่อปริมาณสารมลพิษอินทรีย์ที่กำจัด (0.4 กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง/กิโลกรัมของ COD ที่ถูกกำจัดไป) จึงเป็นปัญหาหนึ่งที่ยากในการแก้ไข, โดยยังไม่ได้นับรวมกับปัญหาการเดินระบบและบำรุงรักษา. จากประเด็นข้างต้นจะเห็นว่า เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่สามารถผลิตพลังงานทดแทนในรูปก๊าซมีเทนและไฮโดรเจน น่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกับประเทศกำลังพัฒนาที่มีความจำกัดของทรัพยากรค่อนข้างสูง. อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์มีค่อนข้างจำกัด เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีถังปฏิกิริยาบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงและปานกลาง. ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ มีความเหมาะสมทั้งในเชิงเศรษฐศาสตร์พลังงานและความเหมาะสมกับประเทศกำลังพัฒนา. ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดของเสียแบบไม่ใช้อากาศที่สามารถลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมและสามารถผลิตพลังงานทดแทน จึงเป็นทางเลือกที่ประเทศไทยควรให้ความสนใจ

และมีความจำเป็นอย่างสูงที่ควรได้รับการสนับสนุน, เพื่อให้การพัฒนาที่ยั่งยืนของอุตสาหกรรมที่ส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นครัวของโลก.

น้ำเสียจากฟาร์มสุกร มีลักษณะคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของน้ำเสีย คือ ไนโตรเจน, ซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญในการเจริญเติบโตของพืชและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์. เมื่อปล่อยน้ำเสียนี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะทำให้มีปริมาณของไนโตรเจนในแหล่งน้ำสูงเกินไป เป็นผลให้สาหร่ายสีเขียวเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว (Nelson 2003). ทั้งนี้ เป็นผลจากสารอาหารที่ใช้เลี้ยงสุกร ที่สุกรกินเข้าไปประมาณร้อยละ 60 (โอสถสภา 2528) ถูกขับถ่ายออกมาเป็นอุจจาระและปัสสาวะ, ซึ่งของเสียนี้มีค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุอาหาร คือ ไนโตรเจน 19 กรัม/วัน, ฟอสฟอรัส 11 – 20 กรัม/วัน และโพแทสเซียม 8 – 48 กรัม/วัน (คิดจากมูลของสุกรที่มีน้ำหนักตัว 100 กก.). นอกจากนั้น ยังพบธาตุอาหารหลัก (Macronutrient Elements) และจุลธาตุ (Micronutrient Elements) อีก. ในประเทศไต้หวัน มีการนำของเหลวที่ผ่านการบำบัดจากบ่อก๊าซชีวภาพมาใส่แปลงพืช โดยมีปริมาณธาตุอาหาร คือ ไนโตรเจน 1.3–3.0 กรัม/ลิตร, ฟอสฟอรัส 0.19–0.55 กรัม/ลิตร และโพแทสเซียม 3.70–6.72 กรัม/ลิตร (โอสถสภา 2528). ปริมาณธาตุอาหารจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณภาพของอาหารที่ใช้เลี้ยงสุกร. ในการนำธาตุอาหารจากมูลสุกรมาใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องศึกษาถึงธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เพื่อนำข้อมูลธาตุอาหารเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่าของเสียทั้งในส่วนของธาตุอาหารหลักและจุลธาตุ.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) มีรากฐานของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศมาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). วว. เป็นองค์กรภาครัฐแห่งแรกที่ได้ศึกษาวิจัยกระบวนการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้ และได้รับความไว้วางใจจาก United Nations Environment Programme (UNEP) ให้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาถังปฏิกิริยา UASB ระดับโรงงานต้นแบบในปี พ.ศ. 2534. จากองค์ความรู้ที่ วว. ได้สั่งสมมา ประกอบกับความจำกัดของทรัพยากรของประเทศ, วว. จึงได้เล็งเห็นความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียฟาร์มปศุสัตว์รูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ที่สามารถแก้ปัญหาการใช้พลังงานในปริมาณสูง, ความต้องการพื้นที่ก่อสร้างระบบมาก, รวมทั้ง สามารถลดปริมาณการทิ้งตะกอนส่วนเกิน. จึงได้เสนอชุดโครงการวิจัยนี้ เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศประสิทธิภาพสูง, พัฒนาเทคนิคการตรวจสอบสมรรถนะการทำงานและเทคนิคระบบสัญญาณเตือนความล้มเหลวล่วงหน้าของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. โดยจะดำเนินการวิจัยทั้งในส่วนของเทคโนโลยีใหม่ที่ยังไม่มีการใช้

ในเชิงพาณิชย์ได้แก่ ASBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor) และ STAR (Solar Thermophilic Anaerobic Reactor), ปรับปรุงเทคโนโลยีที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์แล้วให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทย, รวมถึงการพัฒนาเทคนิคการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ. นอกจากนั้น จะเน้นการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียต่อเนื่อง เพื่อลดปัญหาการขาดออกซิเจนและ eutrophication รวมถึงการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ในการเกษตร, โดยใช้เป็นสารอาหารธรรมชาติทดแทนสารเคมีในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก (Hydroponic) และการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ เพื่อให้ได้ระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์และผลิตพลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพสูง.

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคในการใช้สารอาหารธรรมชาติ ที่เป็นผลพลอยได้ในการบำบัดของเสียเพื่อทดแทนสารเคมี โดยกระบวนการไฮโดรโพนิก.

2. เพื่อศึกษารูปแบบหรือลักษณะทางกายภาพของถังปฏิกิริยาและการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพ.

3. เพิ่มศักยภาพในการพึ่งพาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมของประเทศ โดยเฉพาะส่วนของการจัดการของเสีย โดยกระบวนการชีวภาพที่สามารถให้ผลพลอยได้เป็นก๊าซชีวภาพและปุ๋ยหมัก.

4. เพื่อศึกษาวิธีการนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรไปใช้ประโยชน์ในการปลูกผักกาดหอม ด้วยระบบไฮโดรโพนิกในรางปลูกแบบ Nutrient Film Technique (NFT).

5. ส่งเสริมความร่วมมือในการพัฒนาบุคลากรด้านเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม โดยการประสานองค์ความรู้ของกลุ่มวิจัย ทั้งในส่วนมหาวิทยาลัยในประเทศและต่างประเทศ.

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

พัฒนาเทคนิคการในการใช้ปุ๋ยชีวภาพ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียฟาร์มปศุสัตว์ ทดแทนสารเคมีในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก.

1.4 คำจำกัดความและนิยามศัพท์เฉพาะ

ไฮโดรโพนิก (Hydroponic) หมายถึง การปลูกพืชที่ไม่ใช้วัสดุปลูก (non-substrate หรือ water culture) คือทำการปลูกพืชลงบนสารละลายธาตุอาหารพืช โดยให้รากพืชสัมผัสกับสารละลายอาหารโดยตรง.

การปลูกพืชไฮโดรโพนิกในระบบ NFT (Nutrient Film Technique) เป็นการปลูกพืชโดยแช่รากอยู่ในสารละลายโดยตรง, สารละลายธาตุอาหารจะไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (หนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร) ในรางปลูกพืช.

ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ คือ ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ. มีลักษณะเป็นถังหมัก-บ่อหมัก ให้สารอินทรีย์ในน้ำเสียสัมผัสกับจุลินทรีย์ในถังหมักอย่างเต็มที่. จุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ. ระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกสูง ระหว่าง 1,000-100,000 มก./ลิตร.

แก๊สชีวภาพ คือ แก๊สที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการย่อยสลายอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน. แก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด, ส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทนประมาณร้อยละ 50-70 และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 30-50, ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สชนิดอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไฮโดรเจนซัลไฟด์, ไนโตรเจน และไอน้ำ.

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ตารางที่ 2. เป้าหมายการให้บริการ (ผลลัพธ์) และตัวชี้วัดของแผนงานวิจัย

เป้าหมายการให้บริการ	ตัวชี้วัด
ผู้ประกอบการฟาร์มปศุสัตว์และกิจกรรมที่ทิ้งของเสียในรูปสารอินทรีย์	- เพิ่มทางเลือกในการใช้ระบบบำบัดของเสียที่สามารถผลิตพลังงานทดแทนได้ ประกอบด้วย ● เทคโนโลยีการใช้ประโยชน์น้ำเสียที่ผ่านระบบก๊าซชีวภาพใช้เพื่อการเกษตรแบบไฮโดรโพนิก.
สถาบันอุดมศึกษาและหน่วยงานวิจัย	- ประสานความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยเครือข่ายเพื่อผลิตนักวิจัยใหม่และถ่ายทอดองค์ความรู้ใหม่. - หลักสูตรฝึกอบรมด้านเทคโนโลยีการบำบัดของเสียแบบไม่ใช้อากาศ.
กลุ่มกิจการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั้งภาครัฐบาลและองค์กรเอกชน	- เทคโนโลยีทางเลือกในการจัดการทรัพยากรสิ่งแวดล้อม. - เพิ่มศักยภาพในธุรกิจอุปกรณ์การลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย.
องค์กรด้านการวิจัยและพัฒนา	- การบริหารจัดการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมด้วยแนวทางที่เหมาะสมและเอื้อประโยชน์ให้มีการประสานความร่วมมือขององค์กรต่างๆ ที่มีอยู่ภายในประเทศ เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืน.

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

2.1 การกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเทคโนโลยีแบบไม่ใช้อากาศ คือ มีขีดความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง, อัตราการเกิดตะกอนชีวภาพต่อสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายมีค่าต่ำ และมีค่าพลังงานเป็นบวกในเทอมของสมดุลพลังงาน, เนื่องจากกระบวนการมีผลพลอยได้เป็นก๊าซมีเทนที่สามารถเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้. นอกจากนี้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศยังมีการใช้พลังงานในการเดินระบบที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้อากาศ. ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบในเทอมของตัวแปรที่สำคัญ ในการเลือกใช้เทคโนโลยีการบัดน้ำเสียของทั้งระบบไม่ใช้อากาศและใช้อากาศ.

ตารางที่ 3. การเปรียบเทียบระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศและใช้อากาศ

	ใช้อากาศ (Aerobic)	**ไม่ใช้อากาศ (Anaerobic)**
ความต้องการพลังงาน	0.7-1 kwh/kg COD	0.07-0.1 Kwh/kg COD
พลังงานที่ผลิตได้	-	0.25-0.35 m^3 CH_4/kg COD
อัตราการผลิตมวลชีวภาพ (sludge)	0.2-0.6 kg/kg COD	0.03-0.1 kg/kg COD
คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด	BOD 20 mg/l	BOD 50-1000 mg/l
(Effluent quality)	SS 30 mg/l	SS 100-500 mg/l
	NH_3 5 mg/l	NH_3 ไม่สามารถกำจัดได้
อัตราการรับภาระสารอินทรีย์	0.5-2 kg/m^3-d	2-25 kg COD/m^3-day

สำหรับข้อด้อยของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ สามารถประมวลได้ ดังนี้.

- ความสามารถฟื้นตัวกลับมาทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ จะใช้เวลามาก เมื่อระบบบำบัดถูกยับยั้งการทำงานโดยปัจจัยทางด้านเคมีและฟิสิกส์.
- น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีค่า BOD และ COD ที่ค่อนข้างสูง.
- ไม่สามารถกำจัดสารประกอบไนโตรเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอมโมเนียและสารกลุ่มฟอสเฟต.

นอกจากนั้น ในบางพื้นที่ที่มีปัญหาของการแพร่ระบาดของสาหร่าย (eutrophication) เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจะถูกลดข้อได้เปรียบอย่างดี เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ถูกประเมินว่า ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสเฟตได้. อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีเอกสารวิชาที่ระบุว่า แอมโมเนียและไนเทรตในน้ำเสียสามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ โดยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Graaf *et al*. 1990), ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้.

$$5NH_4^+ + 3NO_3^- \longrightarrow 4N_2 + 9\,H_2O + 2H^+ \qquad \text{……..(1)}$$

ดังนั้น การวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์กระบวนการดังสมการที่ 1 จะทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศลดปัญหาการตกค้างของสารประกอบไนโตรเจนกลุ่มแอมโมเนียได้ และสามารถประยุกต์ใช้กับน้ำเสียประเภทต่างๆ ได้ครอบคลุมมากขึ้น.

การกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จัดเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 (Tertiary Wastewater Treatment) เป็นวิธีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดไนโตรเจนที่ใช้ในงานจริงปัจจุบัน (ดังตารางที่ 4), สำหรับวิธีการที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่และมีประสิทธิภาพสูง ได้แก่:

1) การกำจัดแอมโมเนียแบบ Air Stripping.
2) Breakpoint Chlorination.
3) การแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับแอมโมเนีย (Ion Exchange).

ดังแสดงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการ ในตารางที่ 5.

ตารางที่ 4. วิธีบำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ เพื่อกำจัดไนโตรเจน

วิธีการบำบัด	สารประกอบไนโตรเจน			ร้อยละของการกำจัดรวม
	Organic	NH_3-NH_4^+	NO_3^-	
<u>การกำจัดแบบ Conventional</u>				
การบำบัดขั้นแรก	10 – 20	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	5 – 10
การบำบัดขั้นที่สอง	15 - 50	10	น้อยมาก	10 – 30
<u>กระบวนการทางชีวภาพ</u>				
การย่อยสลายของแบคทีเรีย	ไม่จำกัด	40 – 70	น้อยมาก	30 –70
1. กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	80 – 90	70 – 95
2. การย่อยสลายของสาหร่าย(Algae)	เปลี่ยนเป็น NH_3-NH_4^-น้อย	เปลี่ยนเป็นเซลล์	เปลี่ยนเป็นเซลล์	50 – 80
กระบวนการไนตริฟิเคชัน	เปลี่ยนเป็น NH_3-NH_4	เปลี่ยนเป็น NO_3^-	ไม่จำกัด	5 –20
บ่อเติมอากาศ	-	กำจัดเป็นบางส่วน	กำจัดเป็นบางส่วน	20 – 90
<u>กระบวนการทางเคมี</u>				
Breakpoint Chlorination	ไม่แน่นอน	90 –100	ไม่จำกัด	80 – 95
กระบวนการโคแอกคูเลชัน	50 – 70	น้อยมาก	น้อยมาก	20 – 30
การดูดติดผิวของคาร์บอน	30 – 50	น้อยมาก	น้อยมาก	10 – 20
การแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับแอมโมเนีย	น้อยมาก	80 – 97	ไม่จำกัด	70 – 95
การแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับไนเทรต	น้อยมาก	น้อยมาก	75 - 90	70 – 90
<u>กระบวนการทางฟิสิกส์</u>				
การกำจัดแอมโมเนียแบบAir stipping	ไม่จำกัด	60 – 95	ไม่จำกัด	50 – 90
กระบวนการเมมเบรนแบบ Electrodialysis	100 ของแขวนลอย	30 – 50	30 – 50	40 – 50
กระบวนการกรอง	30–95ของแขวนลอย	น้อยมาก	น้อยมาก	20 – 40
กระบวนการเมมเบรนแบบReverse Osmosis	60 - 90	60 - 90	60 - 90	80 – 90

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางแสดงประสิทธิภาพของการกำจัดไนโตรเจน โดยคิดเป็นร้อยละของไนโตรเจนที่เข้าระบบ

ตารางที่ 5. ข้อดีข้อเสียทางกายภาพและทางเคมีในกระบวนการกำจัดไนโตรเจน

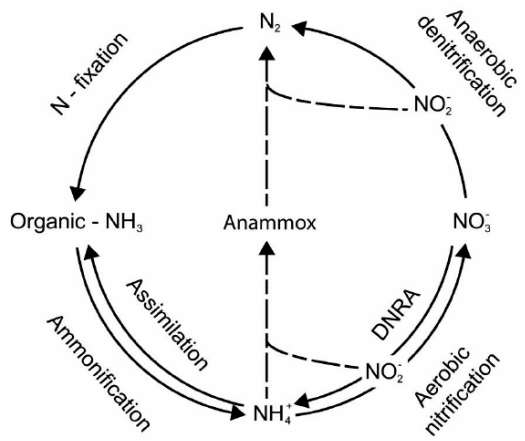
	ข้อดี	ข้อเสีย
Air Stripping	1. สามารถควบคุมสำหรับเลือกกำจัดแอมโมเนียได้ 2. สามารถใช้ร่วมกับการกำจัดฟอสฟอรัส โดยใช้ปูนขาว 3. สามารถกำจัดไนโตรเจนจนถึงค่ามาตรฐานไนโตรเจนทั้งหมดได้ 4. ไม่ sensitive ต่อสารพิษ	1. อุณหภูมิมีผลต่อวิธีนี้ 2. เมื่ออุณหภูมิต่ำ แอมโมเนียสามารถละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้ปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นอีก 3. จะเกิดละอองและน้ำแข็งในฤดูหนาว 4. แอมโมเนียอาจเกิดปฏิกิริยากับ SO_2 ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ 5. กระบวนการนี้ต้องใช้ปูนขาวเพื่อปรับ pH เป็นการเพิ่มต้นทุนและปัญหาของการใช้ปูนขาวและการบำรุงรักษา 6. เกิดตะกอนคาร์บอเนตบนภาชนะบรรจุและท่อ 7. เกิดปัญหาเกี่ยวกับเสียงและทิวทัศน์
Breakpoint Chlorination	1. ที่สภาวะควบคุมที่เหมาะสม แอมโมเนียทั้งหมดจะเกิดการออกซิเดชัน 2. กระบวนการนี้สามารถใช้ร่วมกับกระบวนการกำจัดไนโตรเจนชนิดอื่นเพื่อทำให้กำจัดไนโตรเจนได้เพิ่มขึ้น 3. เป็นการฆ่าเชื้อในน้ำทิ้ง 4. ต้องการพื้นที่น้อย 5. ไม่ไวต่อสารพิษและอุณหภูมิ 6. ต้นทุนต่ำ 7. สามารถประยุกต์ใช้กับวิธีอื่นได้	1. จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบคลอรีนจำนวนมากที่อาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ 2. น้ำเสียที่ต้องการปริมาณคลอรีนแตกต่างกัน ทำให้ค่าใช้จ่ายสูง 3. กระบวนการนี่ไวต่อ pH มีผลต่อปริมาณคลอรีนที่เติมลงไป 4. ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง เนื่องจากต้องใช้ปริมาณสารเคมีมาก 5. เกิด Tribalomethane เป็นผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ 6. เติมคลอรีน ทำให้ TDS เพิ่ม 7. ไม่สามารถกำจัดให้ถึงค่ามาตรฐานไนโตรเจนทั้งหมดได้ 8. ต้องควบคุมดูแล pH เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดก๊าซ NCl_3 9. ต้องการผู้ควบคุมที่มีทักษะสูง
Ion Exchange	1. สามารถใช้ในสภาพอากาศที่ไม่สามารถกำจัดด้วยกระบวนการทางชีววิทยาได้และที่ที่ต้องการน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐาน 2. มีค่า TDS ต่ำ 3. ได้แอมโมเนียที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีก 4. สามารถกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดจนถึงค่ามาตรฐาน 5. ง่ายต่อการควบคุมคุณภาพน้ำ	1. สารอินทรีย์จากการบำบัดทางชีววิทยา จะไปจับกับเรซิน (เกิดพันธะ) 2. จะต้องมีการกรองก่อน เพื่อป้องกันการเกิด Headloss ที่มากเกินไปจากการสะสมของของแข็ง 3. ปริมาณ cation ชนิดอื่นที่มีค่าสูง จะลดประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย 4. การ Regeneration Recovery จะต้องใช้วิธีการอื่นเพิ่มเข้าไป (เช่น Gas Stripping) 5. ต้นทุนและการดำเนินการสูง 6. น้ำเสียที่ได้จากการคืนสภาพ จะต้องทำการกำจัด 7. ต้องการผู้ควบคุมที่มีทักษะสูง

2.2 การกำจัดไนโตรเจนแบบ Anammox process

Van Dongen *et al*. (2001) แสดงให้เห็นว่า การรวมกระบวนการ partial nitrification process และ Anammox process เป็น innovative biotechnological ที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของแอมโมเนียในปริมาณความเข้มข้นสูง โดยใช้พลังงานที่ต่ำ. กระบวนการบำบัดแบบ Anammox process เป็นเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่พัฒนาขึ้นใหม่ สำหรับกำจัดแอมโมเนียอิออนและไนเทรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ. การกำจัดแอมโมเนียอิออนของกระบวนการดังกล่าว ไม่จำเป็นต้องใช้สารมลพิษอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน แต่ใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียอิออนไปเป็นไนโตรเจน, ดังแสดงในสมการที่ 1.

$$NH_4^+ + 1.32NO_2^- + 0.066HCO_3^- + 0.13H^+ \longrightarrow 1.02N_2 + 0.26NO_3^- + 2.03H_2O + 0.066CH_2O_{0.5}N_{0.15}. \quad (1)$$

กระบวนการ Anaerobic ammonium oxidation ที่เปลี่ยนแอมโมเนียและไนไทรต์ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้โดยตรงภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน, โดยใช้ไนไทรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน (Marc *et al*. 1999), มีสมการการเกิดปฏิกิริยาอย่างง่าย ดังนี้.

$NH_4^+ + NO_2^- \text{ --> } N_2 + 2H_2O$ (Bo and Tage 2002)	

รูปที่ 1. วัฏจักรไนโตรเจน (Mark *et al*. 2003).

ดังนั้น หากน้ำเสียมีส่วนประกอบของแอมโมเนียและไนไทรต์ แบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะสามารถนำมาใช้ในการบำบัดแอมโมเนีย ไนโตรเจนในน้ำเสียนั้นได้.

Christian *et al*. (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียสังเคราะห์เข้มข้นโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนแล้วต่อด้วยกระบวนการ anaerobic ammonium oxidation. ผลการทดลองพบว่า แอมโมเนียสามารถเปลี่ยนเป็นไนไทรต์ได้ร้อยละ 58 และการเกิดปฏิกิริยา anaerobic ammonium oxidation ในระบบเอเอสบีอาร์ด้วยอัตราการรับภาระบรรทุกไนโตรเจน 2.4 $kgNm^{-3}d^{-1}$ สามารถบำบัดไนโตรเจนได้มากกว่าร้อยละ 90.

Didem *et al*. (2004) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้กระบวนการ anaerobic ammonium oxidation ในการบำบัดไนโตรเจน. โดยศึกษาในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนแบบสมบูรณ์ (completely stirred tank reactor; CSTR) เดินระบบ 511วัน และมีการใส่แอมโมเนียและไนไทรต์เข้าไปในถัง. ผลการศึกษา พบว่า ร้อยละ 90 ของแอมโมเนียมและร้อยละ 99 ของไนไทรต์ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจนและไนเทรต.

ระบบบำบัดแบบเอเอสบีอาร์ (anaerobic sequencing batch reactor; ASBR) จัดเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่ใช้ออกซิเจนแบบตะกอนแขวนลอย ที่มีการเดินระบบในรูปแบบของการเติมน้ำเสียเป็นช่วงๆ (batch feed system). ระบบสามารถจำแนกการเดินระบบออกเป็น 4 ระยะ คือ การป้อนน้ำเสีย (feeding), การเกิดปฏิกิริยา (reaction), การตกตะกอนและทำให้ตะกอนรวมตัวแน่น (settling) และการระบายน้ำเสียออกจากระบบ (liquid withdrawal). โดยได้รับการพัฒนาจากกลุ่มนักวิจัยของ Iowa State University (Zaiat 2001), สมบัติที่สำคัญของการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสบีอาร์คือ การสร้างสภาวะที่เอื้ออำนวยในการตกตะกอนของมวลชีวภาพในถังปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มระยะเวลากักพักชลศาสตร์ที่สั้น, รวมถึง ถังปฏิกรณ์สามารถสร้างกระบวนการคัดเลือกและพัฒนาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ให้เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ได้. ทั้งนี้ ระบบเอเอสบีอาร์จึงเหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพในระบบบำบัดได้โดยง่ายและไม่สิ้นเปลืองทรัพยากร (คลองธรรมชาติและดารารัตน์ 2546).

2.3 การใช้ประโยนช์น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดระบบก๊าซชีวภาพ

การวิจัยการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมาเป็นแหล่งอาหารของพืช โดยใช้กระบวนการไฮโดร-โพนิก เป็นที่สนใจมากในปัจจุบัน (Garland *et al*. 2000 และ Rababoh and Ashbolt 2000). Garland

et al. (2000) ดำเนินการวิจัยเพื่อนำน้ำเสียจากบ่อเกรอะมาหมุนเวียนปลูกพืชโดยระบบไฮโดรโพนิกสำหรับใช้ในยานอวกาศในอนาคต. เนื่องค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างสูง ทำให้มีการศึกษาเพื่อลดค่าใช้จ่ายในด้านของสารละลายธาตุอาหาร เช่น การศึกษาของพิมพ์มหา (2549) ทำการศึกษาเพื่อลดต้นทุนการเตรียมสูตรสารละลายธาตุอาหารหลักในการผลิตพืชผักไฮโดรโพนิก, โดยเน้นใช้ปุ๋ยเดี่ยว ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูกและหาได้ในท้องถิ่นเป็นแหล่งอาหารหลักแทนการใช้สารเคมีที่หาได้ยากและราคาแพง, พบว่า ปุ๋ยเดี่ยวที่ใช้มีปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด, ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ คือที่ร้อยละ 45.57, 40.42 และ 57.48, ตามลำดับ.

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาเรื่องการนำน้ำเสียเพื่อกลับมาใช้ประโยชน์ร่วมกับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก เพื่อลดค่าใช้จ่ายเรื่องธาตุอาหารและนำน้ำเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์. ดังการศึกษาของบินสมประสงค์และคณะ (2547) ได้ศึกษาการใช้ Fruit Water จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกพืชโดยระบบไฮโดรโพนิก. โดย Fruit Water มีปริมาณธาตุอาหาร คือ ไนโตรเจน 273 มก./ล., โพแทสเซียม 120 มก./ล., ฟอสเฟต 65 มก./ล., พบว่า ผักกาดหอมไม่สามารถเจริญเติบโตได้. ส่วนผักบุ้งสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำ fruit water เจือจางผสมกับปุ๋ยเคมี ปริมาตร 250 มล. ซึ่งการเจริญเติบโตของผักบุ้งดีเทียบเท่ากับการปลูกผักบุ้งในสารละลายปุ๋ย.

การศึกษาของแก้วโบราณ (2544) ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกแบบเติมอากาศและสารละลายไม่หมุนเวียน, โดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลทรายที่ผ่านการบำบัด : น้ำประปา ที่ 5 ระดับความเข้มข้น คือ 0 : 100; 25 : 75; 50 : 50; 75 : 25 และ 100 : 0. ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับน้ำทิ้ง 100 : 0 มีการสะสมโลหะหนัก 3 ชนิด คือ โครเมียม, แคดเมียม และตะกั่วมากที่สุด และมีการสะสมธาตุอาหารหลัก 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากที่สุด. ที่ระดับน้ำทิ้ง : น้ำประปา ที่ 50 : 50, มีการเจริญเติบโตส่วนยอด, อัตราการเจริญเติบโต, ความกว้างของใบ, พื้นที่ทรงพุ่ม, ดัชนีพื้นที่ใบ, น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งมากที่สุด. ในส่วนการปลูกผักกาดหอมในวัสดุปลูกโดยใช้น้ำทิ้ง, พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกในขุยมะพร้าวมีการสะสมโครเมียมสูงที่สุด และมีการเจริญเติบโตส่วนยอด, อัตราการเจริญเติบโต, ความกว้างของใบ, พื้นที่ทรงพุ่ม, ดัชนีพื้นที่ใบ, น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งมากที่สุด และวัสดุปลูกขี้เถ้าแกลบทำให้มีการสะสมของตะกั่วและทองแดงสูงกว่าใช้วัสดุปลูกชนิดอื่น.

การศึกษาของจิระเกียรติกุลและวชิรปัทมา (2547) ได้นำน้ำสกัดชีวภาพหรือน้ำหมักชีวภาพหรือปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (Bioextract) มาใช้ร่วมกับสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ปลูกผักคะน้าในระบบไม่ใช้ดิน. งานวิจัยนี้ ศึกษาความเข้มข้นของน้ำสกัดชีวภาพ (1:200, 1:400, 1:600, 1:800 และ 1:1,000) ที่ผสมกับสารละลายธาตุอาหารในอัตราส่วน 1 : 1 เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของคะน้าที่ปลูก, พบว่า การเจริญเติบโตของคะน้าที่ปลูกโดยใช้สารละลายธาตุอาหารผสมกับน้ำสกัดชีวภาพที่มีความเข้มข้นต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ, แต่ที่ความเข้มข้น 1 : 200 มีแนวโน้มของการเติบโตของผักคะน้าใกล้เคียงกับการใช้สารละลายธาตุอาหารอย่างเดียว ในขณะที่มีต้นทุนต่อกระถางถูกกว่า.

สารละลายธาตุอาหารนับเป็นหัวใจสำคัญของการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก เนื่องจากพืชจะได้รับธาตุอาหารต่างๆ จากสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งผู้ปลูกเตรียมขึ้นจากการนำปุ๋ยหรือสารเคมีมาละลายน้ำ จึงสามารถกำหนดปริมาณธาตุอาหารให้เป็นไปตามที่พืชต้องการได้. อย่างไรก็ตาม การเตรียมสารละลายธาตุอาหาร ยังมีรายละเอียดที่ผู้ปลูกจำเป็นต้องรู้ ดังต่อไปนี้:

1. คุณภาพน้ำที่ใช้ใช้เตรียมสารละลาย

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นที่สุดในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน, โดยเฉพาะระบบ NFT ต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าระบบอื่น คุณภาพน้ำเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน, ซึ่งคุณสมบัติของน้ำจะเป็นสิ่งที่มีผลต่อการเลือกชนิดพืชที่ปลูก, ระบบปลูกที่เหมาะสม และวิธีการจัดการธาตุอาหารพืชขณะปลูก, ซึ่งคุณสมบัติของน้ำจะต้องทำการวิเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการ. น้ำที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก คือ น้ำฝน, เนื่องจากเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่จะต้องมีภาชนะเก็บขนาดใหญ่พอที่จะเก็บน้ำได้เพียงพอที่จะนำมาใช้เตรียมสารละลายโดยตรงหรือมาใช้ผสมกับน้ำแหล่งอื่นในกรณีที่ปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอ.

ในการปลูกพืชผักเป็นการค้าควรนำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปน้ำที่เหมาะสมที่จะนำมาเตรียมสารละลายได้ควรมีปริมาณธาตุต่างๆ, ดังตารางที่ 6.

ตารางที่ 6. คุณภาพของน้ำที่สามารถนำมาปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก

ธาตุที่เจือปนในน้ำ		น้ำหนักโมเลกุล	ค่าสูงสุดของธาตุที่สามารถมีอยู่ในน้ำได้	
			มิลลิโมล/ลิตร	มิลลิกรัม/ลิตร
โซเดียม	Na^{+}	23.0	0.5	11.5
คลอรีน	Cl^{-}	35.5	1.0	35.5
แคลเซียม	Ca^{++}	40.1	2.0	80.2
แมกนีเซียม	Mg^{++}	24.3	0.5	12.2
ซัลเฟต	SO_4^{++}	96.1	0.5	48.1
ไบคาร์บอเนต	HCO_3^{-}	61.0	4.0	244.0
เหล็ก	Fe^{++}	55.9	0.5	28.0
แมงกานีส	Mn^{++}	54.9	10.0	549.0
ทองแดง	Cu^{++}	63.5	1.0	63.5
โบรอน	B^{+++}	10.8	25.0	270.0
สังกะสี	Zn^{++}	65.4	5.0	327.0
ฟลูออไรด์	F^{-}	19.0	25.5	475.0
ค่าการนำไฟฟ้า	EC		0.5mS/cm 25° C	
ค่าความเป็นกรดเบส	PH		5.5-6	

ที่มา: Benoit (1992) อ้างในทองอร่าม (2547)

แมกนีเซียม, แอมโมเนียม และฟอสเฟต, เป็นผลผลิตจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งภายในสภาวะที่เหมาะสมจะรวมตัวกันเป็น Struvite, โดยอยู่ในรูปของ Orthorhombic Crystalline mineral เกาะบนพื้นผิวของอุปกรณ์ในถังปฏิกิริยาแบบไม่ใช้อากาศ (Perez Rodriguez *et al.* 1992).

2. ชนิดของปุ๋ยหรือสารเคมีที่ใช้ในสารละลาย

ปุ๋ยหรือสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายธาตุอาหารพืชจะต้องเป็นสารที่ละลายน้ำได้หมด ซึ่งปกติจะมีราคาแพง. ดังนั้น ต้องหาแหล่งธาตุอาหารในรูปของปุ๋ยซึ่งจะมีราคาถูกกว่าสารเคมีทั่วไป (ตารางที่ 7), แต่บางธาตุต้องใช้สารเคมี โดยเฉพาะจุลธาตุ ซึ่งมีราคาแพง. อย่างไรก็ตาม ธาตุเหล่านี้ใช้ในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น, นอกจากธาตุเหล็ก ซึ่งต้องใช้ในรูปคีเลตที่มีราคาแพงและต้องใช้ในปริมาณมาก. นอกจากนั้น ในปุ๋ยบางชนิดที่ให้ธาตุอาหารหลักยังมีจุลธาตุบางตัวปนอยู่ด้วย จึงไม่จำเป็นต้องเติมจุลธาตุเหล่านั้นอีก.

ตารางที่ 7. ปุ๋ยบางชนิดที่ใช้ในสารละลายเพื่อให้ธาตุอาหารหลัก

ชนิดของปุ๋ย	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	ธาตุอื่นที่มีอยู่
แอมโมเนียมซัลเฟต	20			กำมะถัน 28 %
แอมโมเนียมไนเทรต	34			
แอมโมเนียมซัลเฟต ไนเทรต	26			แคลเซียมออกไซด์ 14%
แอมโมเนียมคลอไรด์	26			
ยูเรีย	46			
แคลเซียมไนเทรต	10-20			แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ประมาณ 28%
โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต	12	61		
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	21	53		
แอมโมเนียมฟอสเฟต				
แอมโมฟอส เอ	11	48		
แอมโมฟอส บี	16	20		
โพแทสเซียมไนเทรต	14		44	
โพแทสเซียมแอมโมเนียมไนเทรต	16		28	
โพแทสเซียมออโทฟอสเฟต		32-53	30-50	
โพแทสเซียมเมตาฟอสเฟต		60	40	
โซเดียมโพแทสเซียมไนเทรต	15		15	
ไนโตรฟอสกา	10-16.5	11-30	12-26.5	
ซุปเปอร์ฟอสเฟต				
ซิงเกิล		15-20		
ดับเบิล		36-42		

ตารางที่ 7. (ต่อ)

ชนิดของปุ๋ย	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	ธาตุอื่นที่มีอยู่
ทริปเปิล		45-50		ยิบซั่ม 50% และเหล็ก, อะลูมิเนียม, ซิลิกา, กำมะถัน และฟลูออรีน
แคลเซียมเมตาฟอสเฟต		65		ฟลูออรีนเล็กน้อย
โมโนแคลเซียมฟอสเฟต		48-55		
โพแทสเซียมแมกนีเซียมซัลเฟต			48-53	แมกนีเซียมซัลเฟตไม่ต่ำกว่า 25% และคลอรีนเล็กน้อย
โพแทสเซียมซัลเฟต			42-48	กำมะถันและคลอรีนเล็กน้อย
โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต		52.2	34.6	
โพแทสเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต			20	แมกนีเซียมประมาณ 20%
โพแทสเซียมซิลิเกต			25	

ที่มา: พงษ์ปรีชา (ม.ป.ป.)

3. สูตรของสารละลายธาตุอาหาร ปัจจุบันสารละลายธาตุอาหารมีอยู่หลายสูตรขึ้นกับชนิดพืชที่ปลูก, ฤดูปลูก, แสง, อุณหภูมิขณะที่ปลูก, สถานที่ปลูก, ตลอดจนวัตถุประสงค์ของการปลูก. การปลูกพืชเป็นการค้าจะต้องปลูกในปริมาณมากเพื่อให้มีผลกำไร จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้สูตรที่เหมาะสมและมีความเข้มข้นของธาตุอาหารน้อยที่สุด เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มผลกำไร. จากการที่ต้นทุนค่าสารละลายเป็นค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการดำเนินการ, เนื่องจากมีความจำเป็นต้องใช้จ่ายอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาปลูก, ต่างจากค่าวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นการลงทุนเพียงครั้งเดียวแต่ใช้ได้เป็นเวลานาน. สูตรสารละลายธาตุอาหารพืชที่เป็นสูตรมาตรฐานและมักถูกดัดแปลงเพื่อให้เหมาะสมกับพืชต่างๆ มีอยู่หลายสูตร, เช่น Knop's 1865, Sach's 1860, Shive's และ Hoagland's ดังตารางที่ 8.

ตารางที่ 8. สูตรมาตรฐานของสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก

ชนิดสารเคมี	ธาตุที่พืชได้รับ	รูปของธาตุที่พืชได้รับ	ปริมาณความเข้มข้นที่ใช้ (กรัม/ลิตร)			
			Knop	Sach	Shive	Hoagland
โพแทสเซียมไนเทรต	K, N	K^+, NO_3^-	0.20	1.00		0.51
โพแทสเซียมไดไฮโดรฟอสเฟต	K, P	K^+, PO_4^{2-}	0.20		0.31	0.14
แคลเซียมฟอสเฟต	Ca, P	Ca^{2+}, PO_4^{2-}		0.50		
แคลเซียมไนเทรต	Ca, N	Ca^{2+}, NO_3^-	0.80		1.06	1.18
แคลเซียมซัลเฟต	Ca, S	Ca^{2+}, SO_4^{2-}		0.50		
แมกนีเซียมซัลเฟต	Mg, S	Mg^{2+}, SO_4^{2-}	0.20	0.50	0.55	0.49
แอมโมเนียมซัลเฟต	N, S	NH_4^+, SO_4^{2-}			0.09	
โซเดียมคลอไรด์	Na, Cl	Na^+, Cl^-		0.25		
เฟอรัสซัลเฟต	Fe, S	Fe^{2+}, SO_4^{2-}		trace	0.005	
เฟอรัสฟอสเฟต	Fe, P	Fe^{2+}, PO_4^{2-}	trace			
Fe-EDTA	Fe					0.005

ที่มา: Hewitt (1975) อ้างในพงษ์ปรีชา (ม.ป.ป.).

อย่างไรก็ดี ไม่มีสารละลายสูตรใดสมบูรณ์แบบ, จึงจำเป็นต้องปรับสูตรที่เลือกใช้ให้เหมาะสมหรือแม้แต่ปรุงสูตรธาตุอาหารพืชขึ้นเอง. ควรให้ความสำคัญกับการปรับหรือจัดสัดส่วนของธาตุอาหารให้เหมาะกับพืชที่ปลูกและสภาพแวดล้อม เช่น ในสภาพแดดจัดและอากาศร้อน, สัดส่วนของธาตุอาหารหลักคือ $N:P_2O_5:K_2O$ เท่ากับ 2:1:3. ถ้าเป็นฤดูมรสุม, อากาศชื้นและมีเมฆหมอก ควรใช้สัดส่วน $N:P_2O_5:K_2O$ เป็น 2:1:3. แต่ต้องปรับสัดส่วนตามชนิดผักที่ปลูกด้วย เช่น ถ้าเป็นการปลูกผักกินใบ เช่น ผักกาดหอม, ต้องให้มีสัดส่วนของไนโตรเจนสูงกว่าการปลูกผักกินผล เช่น มะเขือเทศ. นอกจากการกำหนดปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ตามสูตรพื้นฐานและสัดส่วนของธาตุอาหารหลักแล้ว ยังอาจเตรียมสารละลายโดยยึดหลักช่วงความเข้มข้นและค่าเฉลี่ยของธาตุอาหารตามความต้องการของพืช ดังตารางที่ 9.

ตารางที่ 9. ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุอาหารแต่ละชนิดในสารละลายที่เหมาะสมสำหรับปลูกพืช

ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหารในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
ไนโตรเจน	150-1000	300
แคลเซียม	300-500	400
แมกนีเซียม	50-100	75
ฟอสฟอรัส	50-100	75
โพแทสเซียม	100-400	250
กำมะถัน	200-1000	400
ทองแดง	0.1-0.5	0.5
โบรอน	0.5-5.0	1
เหล็ก	2.0-10.0	5
แมงกานีส	0.5-5.0	2
โมลิบดินัม	0.001-0.002	0.001
สังกะสี	0.5-1.0	0.5
คลอรีน	0.1-1.0	0.5

ที่มา: นภดล (2538) อ้างในพงษ์ปรีชา (ม.ป.ป.).

การปลูกพืชแบบ Nutrient Film Technique (NFT) เป็นระบบที่สารละลายธาตุอาหารพืชมีการหมุนเวียน, มีหลักการทำงานอย่างง่ายๆ คือสารละลายธาตุอาหารพืชจะไหลผ่านรากพืชลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มบาง (หนาประมาณ 2-3 มิลิเมตร), โดยที่รากพืชจะได้รับสารอาหารและออกซิเจนที่ช่วยในการหายใจของพืชโดยตรง, อย่างเต็มที่. การไหลเวียนของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ, ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว, เหมาะสำหรับปลูกพืชกินใบได้หลายชนิด เช่น ผักสลัดพันธุ์ต่างประเทศ อย่างเช่น Green Oak, Red Oak, Red Coral, Frillice Iceberg, Butterhead Cos (Romaine) และผักของไทย เช่น คะน้า, กวางตุ้ง, ผักบุ้ง, คื่นฉ่าย.

2.4 การศึกษาธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์จากมูลสุกร

Schoenau นักวิจัยของหน่วยงาน Agricultural and Food ประเทศแคนาดา ทำการศึกษาธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจากปุ๋ยคอกและปุ๋ยอินทรีย์ ในโครงการ Managing Manure as a Fertilizer เมื่อปี พ.ศ. 2549, โดยทำการศึกษาในปุ๋ยเหลวจากมูลสุกร (สุกรขุน) เพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช, ผลการศึกษาดังตารางที่ 10.

ตารางที่ 10. ชนิดของธาตุอาหารจากปุ๋ยเหลวจากฟาร์มสุกร โดยตัวอย่างการศึกษาจากเมือง Saskatchewan

	ปุ๋ยเหลวจากฟาร์มสุกร (สุกรขุน)
	ปอนด์/พันแกลลอน
ไนโตรเจน (N)	15 – 50
ฟอสฟอรัส (P)	1 – 20
โพแทสเซียม (K)	8 – 20
กำมะถัน (S)	0.1 – 3
ทองแดง (Cu)	0.05 – 0.5
แมงกานีส (Mn)	0.05 – 0.5
สังกะสี (Zn)	0.05 – 1.0
โบรอน (B)	0.01

ที่มา : Agricultural and Food (2549)

ตารางที่ 11. ธาตุรอง, จุลธาตุ และธาตุอื่นๆ ในมูลสุกร, ค่าเฉลี่ยของข้อมูลได้มาจาก 20 แหล่ง (Robinson *et al.* (2222) อ้างในโอสถสภา (2528)

ธาตุ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย	พิสัย
แคลเซียม (Ca)	%	3.2	1.1 – 5.9
แมกนีเซียม (Mg)	%	0.8	0.4 – 1.3
กำมะถัน (S)	%	0.3	0.2 – 0.4
ทองแดง (Cu)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	249	22 – 636
สังกะสี (Zn)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	526	128 – 982
เหล็ก (Fe)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	1,940	764 – 4700
แมงกานีส (Mn)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	342	144 – 562
โคบอลต์ (Co)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	6.1	2.2 – 15.2
โมลิบดินัม (Mo)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	0.3	0.2 – 0.5

West and Turnbull (n.d.) แนะนำการวางแผนการจัดการเกี่ยวกับมูลสุกร และการศึกษาธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์จากมูลสุกรในโครงการ Swine Manure System, ซึ่งทำการวิเคราะห์ ณ ห้องปฏิบัติการ Ontario Soil Test Laboratory ภาควิชา Land Resource Science มหาวิทยาลัย Guelph, ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ดังตารางที่ 12.

ตารางที่ 12. น้ำหนักแห้ง (%) และปริมาณธาตุอาหารในโรงหมักปุ๋ยจากมูลสุกร

	ปุ๋ยมูลสุกรเหลว			ปุ๋ยมูลสุกรแห้ง		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
น้ำหนักแห้ง	3.30	0.10	11.50	28.20	14.70	51.30
ไนโตรเจน	0.37	0.01	0.78	0.68	0.13	1.35
ฟอสฟอรัส	0.09	0.01	0.33	0.33	0.33	0.62
โพแทสเซียม	0.15	0.01	0.49	0.29	0.29	0.75
แคลเซียม	0.10	0.00	0.43	0.79	0.79	2.53
แมกนีเซียม	0.04	0.00	0.10	0.22	0.22	1.01

ที่มา : West and Turnbull, ม.ป.ป.

2.5 การนำมูลสุกรเพื่อใช้ประโยชน์

1. นำไปทำปุ๋ยใช้ในการปลูกพืช สิ่งขับถ่ายของสุกรที่เป็นของแข็งจะต้องผ่านการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เสียก่อน, ธาตุอาหารต่างๆ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้. การใช้ประโยชน์จากมูลสุกรมีทั้งในรูปของมูลแข็งและมูลเหลว. การใช้มูลเหลวในแง่แร่ธาตุที่พืชต้องการ โดยเฉพาะไนโตร-เจน, มูลเหลวจะให้ไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ได้ทันที, เนื่องจากมียูเรียเป็นส่วนประกอบสำคัญ จึงมีการใช้มูลเหลวด้วยการฉีดพ่น ซึ่งจะให้ผลผลิตมากกว่ามูลแข็งที่ไม่มียูเรีย (เลาศรีรัตนชัย 2531). การพ่นน้ำสกัดมูลสุกร (น้ำสกัดมูลสุกรได้จากการนำมูลสุกรแห้งแช่น้ำในอัตราส่วน 1:10 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ทุก 1 เดือน และทุก 2 เดือน มีผลทำให้น้ำหนักรวมทั้งต้น, น้ำหนักใบ, ผลผลิตหัวมันสำปะหลังต่อไร่ และเปอร์เซ็นต์แป้งของมันสำปะหลังสูง. การพ่นน้ำสกัดมูลสุกร สามารถเพิ่มคุณค่าทางอาหารของมันเส้นได้ โดยการลดเยื่อใยของมันเส้น, เพิ่มเปอร์เซ็นต์แป้ง และเพิ่มขนาดหัวของมันสำปะหลัง (หม่อมงามและคณะ 2548).

2. ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ แต่ต้องไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นเชื้อโรคปะปนอยู่มากจนก่อให้เกิดอันตราย (คันโท 2532; ทับเจริญและคณะ 2535).

3. นำไปใช้เลี้ยงปลา โดยการสร้างคอกเลี้ยงสุกรบนบ่อปลา เมื่อสุกรขับถ่ายออกมาจะหล่นลงไปในบ่อ หรือใช้วิธีตักมูลสุกรที่เลี้ยงแหล่งอื่นมาใส่ลงในบ่อปลา (สุขุประการ 2535 ; กรมควบคุมมลพิษ 2547).

4. การนำมูลสุกรไปเพาะหนอนแมลงวัน เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารโปรตีนทดแทนแหล่งที่มีราคาสูง (สุขุประการ 2535 และส่วนน้ำเสียเกษตรกรรม สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ 2547).

5. การนำมูลสุกรไปเลี้ยงไรแดง เพื่อใช้เป็นอาหารสำหรับใช้เลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อน (ส่วนน้ำเสียเกษตรกรรม สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ 2547).

6. นำมูลสุกรไปผ่านกระบวนการหมักได้ก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพที่ได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นหลัก. สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในฟาร์ม เช่น การปั่นกระแสไฟฟ้าและให้ความร้อน. สิ่งที่เหลือจากบ่อก๊าซชีวภาพ ได้แก่ น้ำร้อยละ 86 และกากร้อยละ 14 (ตันโชติกุล 2539). พลังงานไฟฟ้าช่วยลดต้นทุนการใช้พลังงานในฟาร์ม, ส่วนมูลสุกรที่เหลือจากการหมักสามารถนำไปเป็นปุ๋ยอินทรีย์ ได้อย่างดี (กวมทรัพย์ 2539).

2.6 การปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก

ไฮโดรโพนิก เป็นคำที่มาจากภาษากรีก 2 คำ, คือ คำว่า hydro ซึ่งแปลว่าน้ำ และคำว่า ponos แปลว่าทำงานหรือแรงงาน. เมื่อรวมกัน จึงมีความหมายว่าการทำงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำ. การปลูกพืชโดยวิธีไฮโดรโพนิกเป็นการปลูกพืชโดยใช้หลักวิชาการแบบวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ โดยเลียนแบบการปลูกพืชบนดิน, แต่ไม่นำดินมาใช้เป็นวัสดุปลูก. พืชสามารถเจริญเติบโตได้โดยอาศัยธาตุอาหารต่างๆ ที่ละลายลงในน้ำเพื่อทดแทนธาตุอาหารที่มีอยู่ในดิน.

2.6.1 ข้อดีของการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก (วิสุทธิแพทย์และคณะ 2548 ; ทองอร่าม 2547)

1. สามารถปลูกพืชได้ต่อเนื่องตลอดปี เมื่อเก็บผลผลิตผักแล้วสามารถปลูกพืชผักรุ่นต่อไปได้ทันที เนื่องจากไม่ต้องทำการพักดิน, ตากดิน, กำจัดวัชพืช และเตรียมแปลงปลูกใหม่และแหล่งอาหารของพืชได้จากธาตุอาหารต่างๆ, ปลูกพืชได้ทุกฤดูกาลและทุกสภาพอากาศ.

2. สามารถปลูกพืชได้แม้ในที่ที่ไม่มีพื้นที่สำหรับปลูกพืช ผู้อยู่อาศัยในที่ที่มีพื้นที่จำกัด เช่น ตึกแถว, ทาวน์เฮาส์, อาคารชุด และหอพัก, ไม่มีพื้นที่สำหรับปลูกพืช, สามารถปลูกพืชผักสวนครัว, สมุนไพร หรือไม้ดอกไม้ประดับได้ โดยใช้ระบบไฮโดรโพนิกขนาดเล็ก, วางบริเวณพื้นที่ว่างที่มีอยู่เล็กน้อย เช่น ริมหน้าต่าง, ทางเดิน, ดาดฟ้า, พื้นที่เล็กๆ หลังบ้าน.

3. สามารถปลูกพืชในพื้นที่ที่ดินไม่เหมาะสม ในบางพื้นที่ไม่สามารถทำการเพาะปลูกพืชได้ เนื่องจากดินขาดความอุดมสมบูรณ์ เช่น ดินทะเลทราย, พื้นที่เป็นหิน, ภูเขา, ดินเค็ม, ดินกรด, ดินด่าง, อยู่ในเขตแห้งแล้งหรือขาดแคลนน้ำ, สามารถปลูกพืชได้ด้วยวิธีไฮโดรโพนิก. นอกจากไม่ต้องใช้ดินเป็นแหล่งอาหารสำหรับพืชแล้ว ยังเป็นวิธีที่ใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ (ทองอร่าม 2547).

4. พืชเจริญเติบโตได้เร็วและให้ผลผลิตสูง การปลูกพืชด้วยวิธีดั้งเดิมไม่สามารถกำหนดปริมาณธาตุอาหารให้พอดีกับความต้องการของพืชได้ และยังมีการสูญเสียธาตุอาหารจากกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในดินและในอากาศ, ตลอดจนการแย่งธาตุอาหารจากวัชพืช. การปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก สามารถกำหนดปริมาณธาตุอาหารให้ตรงกับความต้องการของพืช. พืชได้รับสารอาหารในรูปอนินทรีย์โดยตรง ทำให้การใช้ปุ๋ยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ, ไม่มีปัญหาการแย่งธาตุอาหารโดยวัชพืช, จึงทำให้พืชเจริญเติบโตเร็วและได้ผลผลิตสูง (ทองอร่าม 2547).

5. ผลผลิตมีความสม่ำเสมอ, สะอาด และคุณภาพดี เนื่องจากมีการควบคุมปริมาณธาตุอาหารตามที่พืชต้องการ ตลอดจนควบคุมปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมได้ทั่วถึง. ทำให้ได้ผลผลิตที่มีความสม่ำเสมอ, มีรูปร่าง, สี, ขนาด, ใกล้เคียงกัน. ผลผลิตไม่ได้สัมผัสกับดิน จึงสะอาดและดูน่ารับประทาน. การปลูกพืชวิธีนี้ จึงเป็นวิธีที่เหมาะที่จะผลิตพืชผักที่ต้องการผลผลิตที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอ เช่น ผักส่งออก (ทองอร่าม 2547), ผักทดแทนการนำเข้า และผักส่งขายในซูเปอร์มาร์เกต.

6. ใช้แรงงานน้อยลง เนื่องจากไม่ต้องมีการเตรียมดิน, ไม่ต้องทำการให้น้ำ, ใส่ปุ๋ย, กำจัดวัชพืช, มีศัตรูพืชน้อยกว่า, จึงใช้แรงงานในการกำจัดน้อยกว่า. การเพาะเมล็ด, การย้ายปลูก, การเตรียมแปลงปลูก และการเก็บเกี่ยว ทำได้ง่ายกว่า, จึงใช้แรงงานน้อยกว่า.

7. ลดการใช้สารเคมี เนื่องจากมีการควบคุมสภาพแวดล้อม, ควบคุมศัตรูพืชได้ง่าย, เนื่องจาก การไม่ใช้ดินในการปลูกพืช ทำให้ไม่มีปัญหาโรคแมลงที่อยู่ในดิน ตลอดจนไม่มีปัญหาวัชพืช. ส่วนโรคแมลงที่ระบาดทางอากาศ สามารถลดการใช้สารเคมีได้โดยการใช้โรงเรือนตาข่าย.

8. นำวิธีการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิกมาใช้ในการศึกษาวิจัย เช่น การศึกษาของพิมพ์มหา (2549), ทำการศึกษาเพื่อลดต้นทุนการเตรียมสูตรสารละลายธาตุอาหารหลักในการผลิตพืชผักไฮโดรโพนิก. โดยเน้นใช้ปุ๋ยเดี่ยว ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูกและหาได้ในท้องถิ่นเป็นแหล่งอาหารหลัก แทนการใช้สารเคมีที่หาได้ยากและราคาแพง, พบว่า ปุ๋ยเดี่ยวที่ใช้มีปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด, ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ คือ ร้อยละ 45.57, 40.42 และ 57.48, ตามลำดับ.

2.6.2 ข้อจำกัดของการปลูกพืชด้วยเทคนิคไฮโดรโพนิก

1. ค่าใช้จ่าย ในการลงทุนครั้งแรกมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ทำให้ผลผลิตที่ได้มีราคาแพง, ต้องเลือกปลูกพืชที่มีราคา. ค่าใช้จ่ายที่ทำให้ต้นทุนสูงจะเป็นค่าก่อสร้างโรงเรือน, ค่าสารเคมี, ค่าอุปกรณ์ และค่าดูแลรักษา. การลงทุนระยะแรกอาจไม่คุ้ม แต่จะให้ผลคุ้มค่าในระยะยาว และต้องดำเนินการในพื้นที่มาก จะมีความคุ้มทุนมากกว่าการใช้พื้นที่ที่น้อยลง.

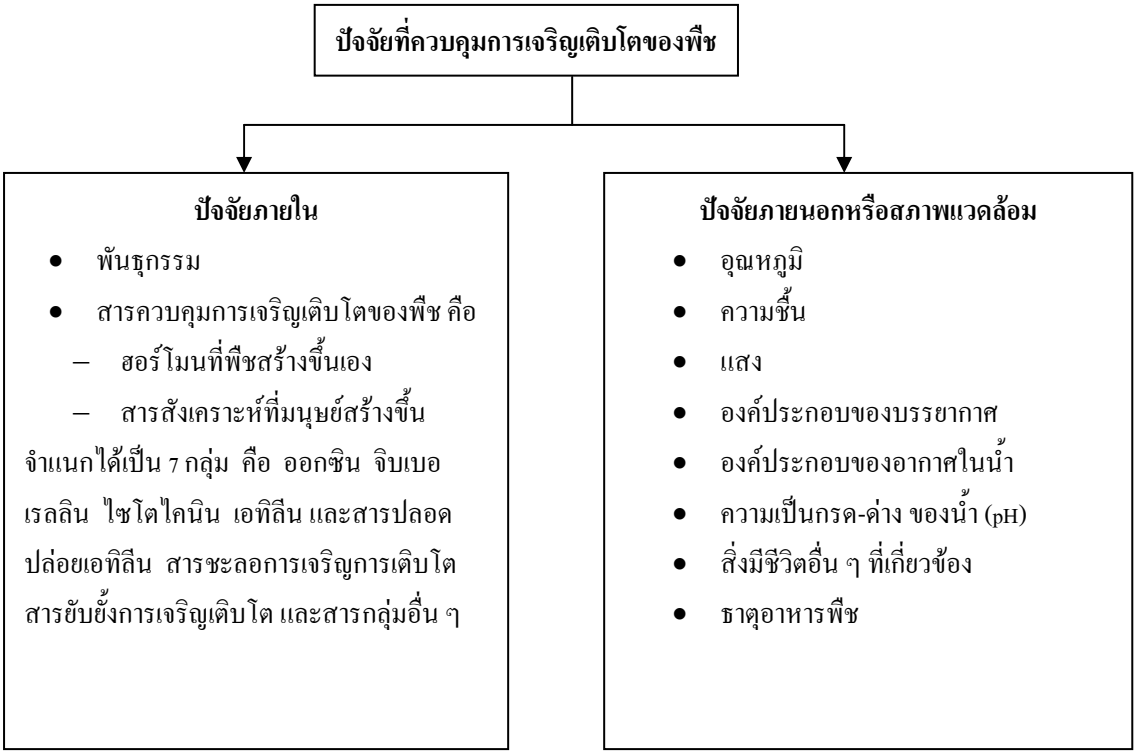
2. ต้องใช้เทคนิคขั้นสูง ผู้ปลูกต้องมีความรู้ความเข้าใจในเทคนิคที่เลือกใช้เป็นอย่างดี. นอกจากนี้ ยังต้องมีความรู้ในเรื่องธาตุอาหารพืช, น้ำ, สรีระวิทยาของพืช, สารละลาย และเครื่องมือควบคุมระบบต่างๆ อีกด้วย.

3. โอกาสเกิดโรคที่มาจากน้ำได้ง่ายและยากต่อการควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกในสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นระบบหมุนเวียนหรือไม่หมุนเวียน. ถ้ามีการเกิดโรคเกี่ยวกับระบบราก จะแพร่กระจายอย่างรวดเร็วและยากต่อการป้องกันกำจัด, พืชแต่ละต้นใช้สารละลายในแหล่งเดียวกัน เชื้อจะระบาดไปทั่วระบบในเวลาอันสั้นโดยติดไปในสารละลาย.

2.6.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกด้วยวิธีไฮโดรโพนิก(การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน) (ทองอร่าม 2547)

การเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชไม่ว่าจะปลูกด้วยวิธีดั้งเดิมหรือด้วยวิธีไฮโดรโพนิก ถูกควบคุมโดยปัจจัยทั้งภายในและภายนอก. การเรียนรู้ถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ เป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการกำหนดความสำเร็จหรือล้มเหลวในการปลูกพืช. การเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกด้วยวิธีไฮโดรโพนิกขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้:

1. ปัจจัยภายใน ได้แก่ พันธุกรรมและสารควบคุมการเจริญเติบโต, โดยพันธุกรรมจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการเจริญเติบโต, สารควบคุมการเจริญเติบโตเป็นตัวกำหนดระดับของการเจริญเติบโต.



รูปที่ 2. ปัจจัยที่ควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (ทองอร่าม 2546).

1) พันธุกรรม เกี่ยวข้องกับยีนซึ่งอยู่ในโครโมโซมของพืช และยีนเป็นตัวถ่ายทอดพันธุกรรม และเป็นตัวกำหนดลักษณะต่างๆ เช่น ความสูง, รูปร่าง, สี, โดยลักษณะต่างๆ นี้จะถูกถ่ายทอดทางพันธุกรรมของพ่อและแม่ไปสู่ลูกหลาน. นอกจากนั้น ยังเป็นตัวกำหนดว่า พืชจะเจริญเติบโตดี ให้ผลผลิตสูงหรือสามารถต้านทานศัตรูพืชได้ดีเพียงใด. ปัจจัยทางพันธุกรรมจะมีอิทธิพลร่วมกับสภาพแวดล้อม, ดังนั้น ทั้งยีนและสภาพแวดล้อมจึงมีผลต่อพันธุกรรมของพืช. ในประเทศที่มีการปลูกพืชโดยวิธีไฮโดรโพนิกเป็นการค้า จะมีการปรับปรุงพันธุ์พืชเพื่อปลูกด้วยวิธีไฮโดรโพนิก เพื่อให้ผลผลิตสูงกว่าการปลูกพืชในดิน (พงษ์ปรีชา ม.ป.ป.) เช่น ญี่ปุ่น, เนเธอร์แลนด์, เบลเยี่ยม, ต่างจากประเทศไทยที่ส่วนใหญ่ใช้พันธุ์พืชพันธุ์เดียวกับที่ใช้ปลูกในดิน.

2) สารควบคุมการเจริญเติบโต ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เมล็ด, ต้น, ใบ, ดอก และผล ของพืชมีสารควบคุมการเจริญเติบโตและการพัฒนาของส่วนต่างๆ อยู่ตลอดเวลา. สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเป็นสารอินทรีย์ทั้งพืชสร้างขึ้นเอง (plant hormone) และมนุษย์สังเคราะห์ขึ้น. สารควบคุมการเจริญเติบโตจะไปควบคุมการทำงานของยีน ในการสร้างโปรตีน, กระตุ้นการทำงาน

ของเอนไซม์ต่างๆ หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเยื่อหุ้มทั้งหลาย. สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้.

3) ออกซิน (Auxins) มีคุณสมบัติเป็นสารเร่งการเจริญเติบโต, ควบคุมการขยายขนาดของเซลล์, การยืดตัวของเซลล์ และมีผลในการกระตุ้นการเกิดราก IAA (indol-3- acetic acid), เป็นออกซินที่พืชสังเคราะห์ขึ้นและเป็นออกซินที่มีกิจกรรมทางสรีรวิทยาในพืชมากที่สุด. นอกจากนี้ยังมีออกซินสังเคราะห์ เช่น NAA (Naphthaleneacetic Acid), IBA (Indole-3-Butyric Acid) ใช้สำหรับการชักนำการออกรากในพืชบางชนิดที่ออกรากยาก (เฟื่องจันทร์ 2544).

4) จิบเบอเรลลิน (Gibberellins) มีคุณสมบัติในการกระตุ้นการยืดตัวของเซลล์ การแบ่งตัวของเซลล์, การกระตุ้นการงอกของเมล็ดและตา, เพิ่มการติดผล, การเปลี่ยนเพศดอก, เร่งการออกดอก. สารจิบเบอเรลลินมีมากกว่า 112 ชนิด (เฟื่องจันทร์ 2544).

5) ไซโตไคนิน (Cytokinin) ไซโตไคนินควบคุมการแบ่งเซลล์ทำงานควบคู่กับออกซิน, กระตุ้นการเจริญทางด้านข้างของพืช, กระตุ้นการเจริญของตาข้าง, การพัฒนารูปร่าง และโครงสร้างของอวัยวะและเนื้อเยื่อ, ทำให้สิ้นสุดการพักตัวของเมล็ด, ชะลอการแก่ของพืช. ไซโตไคนินที่พืชสังเคราะห์ได้เองตามธรรมชาติคือ ซีอาติน (Zeatin) ส่วนสารสังเคราะห์ในกลุ่มนี้ได้แก่ ไคเนติน (Kinetin) (เฟื่องจันทร์ 2544).

6) เอทิลีน (Ethylene) เอทิลีนเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิดเดียวที่อยู่ในรูปก๊าซ, มีอิทธิพลในการควบคุมการแก่ของพืช เช่น เร่งการสุกของผลไม้, เร่งการเหี่ยวของดอกไม้. นอกจากนี้ ยังมีผลในการเร่งการออกดอกของพืชบางชนิด. รูปของเอทิลีนที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรเป็นของแข็งหรือของเหลว แต่สามารถปลดปล่อยก๊าซเอทิลีนได้คือ Ethephon (2-Chloroethylphosphonic Acid).

7) สารชะลอการเจริญเติบโตของพืช (plant growth retardant) พืชไม่สามารถสร้างขึ้นเองได้, แต่เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตร, มีคุณสมบัติในการชะลอการแบ่งเซลล์และการยืดตัวของเซลล์บริเวณใต้ปลายยอดของกิ่ง, จึงมีผลให้ความสูงของพืชลดลง. นอกจากนี้ ยังใช้ประโยชน์ในการเร่งการออกดอกของพืชบางชนิด, เพิ่มการติดผลและคุณภาพของผลไม้, ตลอดจนมีผลในการเพิ่มผลผลิตพืชผัก. สารชะลอการเจริญเติบโตของพืชที่ใช้กันแพร่หลายคือ Chlormequat และ Daminozide.

8) สารยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช (plant growth inhibitor) มีคุณสมบัติในการยับยั้งการแบ่งเซลล์, ยับยั้งการทำงานของฮอร์โมนบางชนิด และยับยั้งการเจริญเติบโตทั่วๆ ไป. สารยับยั้งการเจริญเติบโตที่พบในธรรมชาติมีกว่า 200 ชนิด แต่สารที่สำคัญที่สุดคือ ABA (abscisic acid) ซึ่งมีผลควบคุมการหลุดร่วงของใบ, ดอก และผล, การพักตัวของพืช และการคายน้ำ. ไม่มีการนำสารนี้

มาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร, แต่มีการสังเคราะห์สารหลายชนิดเช่น Maleic Hydrazide, Chloroflurenol หรือ Morphactin, Dikegulac-Sodium ที่มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช และใช้ประโยชน์ในการกระตุ้นการแตกตาข้าง, ยับยั้งการงอกของหัว และลดความสูงของไม้พุ่ม.

2. ปัจจัยภายนอก ได้แก่ สภาพแวดล้อม, เป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งการตอบสนองต่อปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ไม่ได้แตกต่างกัน, ไม่ว่าจะปลูกพืชด้วยวิธีดั้งเดิมหรือด้วยวิธีไฮโดรโพนิก. ปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชมีอยู่หลายปัจจัย (ทองอร่าม 2550), แต่มีปัจจัยที่สำคัญดังต่อไปนี้:

1) แสง เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช, เป็นสิ่งสำคัญในการสร้างอาหารหรือการสังเคราะห์แสงของพืช, การเจริญเติบโต, การงอกของเมล็ด, การโค้งงอ และการออกดอก. ในการสังเคราะห์แสง มีคลอโรฟิลล์เป็นตัวรับแสงไปใช้เป็นพลังงานในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เป็นคาร์โบไฮเดรตและออกซิเจน. บทบาทของแสงที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ความเข้มแสง, ความยาวของช่วงแสงหรือระยะเวลาที่พืชได้รับแสง และคุณภาพของแสง. การปลูกพืชในประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อน ความเข้มแสงที่มากเกินไป มีผลทำให้ใบพืชได้รับอันตรายมีผลต่อการสังเคราะห์แสง. การปลูกพืชในที่โล่งจึงต้องมีการให้ร่มเงาเพื่อลดความเข้มแสง. เมื่อแสงมีความเข้มมากขึ้น อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามไปด้วย จะส่งผลให้อุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ปลูกพืชไม่เหมาะสม.

2) อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพืชจะอยู่ระหว่าง 15–40 องศาเซลเซียส. อุณหภูมิควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของพืช, โดยมีผลโดยตรงต่อการสังเคราะห์แสง, การหายใจ, การดูดธาตุอาหาร, การคายน้ำ และกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ. โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเร่งกระบวนการทางเคมีต่างๆ ในพืช. กระบวนการเหล่านี้ควบคุมโดยเอนไซม์ ซึ่งจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิแคบๆ. อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมจะทำให้เอนไซม์ทำงานลดลง, มีผลให้ปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ในพืชลดลงหรือหยุดไปด้วย. เมื่อถึงจุดนี้พืชจะอยู่ในภาวะเครียดและหยุดเจริญเติบโต และอาจตายได้ในที่สุด. การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชจึงเป็นเรื่องสำคัญ.

3) ความชื้นสัมพัทธ์ มีผลโดยตรงต่อการคายน้ำของพืช. เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงจะทำให้พืชคายน้ำน้อยลง, ส่งผลให้การลำเลียงแร่ธาตุอาหารต่างๆ จากรากไปสู่ใบลดลง และยังทำให้อุณหภูมิที่ใบสูงขึ้น. นอกจากนี้ ความชื้นสัมพัทธ์สูงยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคบางโรคได้ง่าย.

4) องค์ประกอบของบรรยากาศ พืชต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์แสง. โดยปรกติ อากาศมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 0.03, ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของพืช. นอกจากในบริเวณที่มีพืชหนาแน่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของพืชได้ในเวลากลางวัน, เนื่องจากมีการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นมาก. นอกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว พืชยังต้องการออกซิเจนในการหายใจ เพื่อเปลี่ยนพลังงานเคมีที่สะสมไว้ในรูปคาร์โบไฮเดรตให้เป็นพลังงานที่ใช้ในปฏิกิริยาเคมีต่างๆ.

5) คุณภาพน้ำ พืชที่ปลูกได้รับธาตุอาหารต่างๆ จากสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งต้องใช้น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ. ถ้าน้ำมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ โรคจะแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว.

6) ความเป็นกรด-เบส พีเอชของน้ำมีผลทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตของพืช เกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร.

7) ธาตุอาหารพืช พืชที่ยังคงความสดอยู่จะมีปริมาณน้ำประกอบอยู่ร้อยละ 80-95, ถ้าเก็บต้นพืชมาชั่งจะได้น้ำหนักสด. เมื่อวางทิ้งไว้พืชจะเหี่ยวลงเนื่องจากสูญเสียน้ำอยู่ตลอดเวลา และถ้านำไปอบที่อุณหภูมิ 70°ซ. เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง, น้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในต้นพืชจะระเหยไป เมื่อนำไปชั่งอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักแห้ง จะพบว่า พืชมีน้ำหนักลงลงอย่างมากเหลือเพียงร้อยละ 10–20 ของน้ำหนักสดที่ชั่งครั้งแรก (กระบวน (2542) อ้างในพงษ์ปรีชา (ม.ป.ป.)).

2.7 ธาตุอาหารพืช

ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิกนั้น ปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ น้ำและธาตุอาหาร, เนื่องจากเป็นปัจจัยที่จัดหาให้แก่พืชโดยตรง. การเตรียมสารละลายธาตุอาหาร สามารถควบคุมปริมาณธาตุอาหารแต่ละชนิดให้เหมาะสมต่อความต้องการของพืชแต่ละชนิดได้. โดยทั่วไป ธาตุอาหารที่พืชต้องการมีทั้งสิ้น 16 ธาตุ ซึ่ง 3 ธาตุ, ได้แก่ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน, ได้จากน้ำและอากาศ. ส่วนอีก 13 ธาตุจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามปริมาณที่พืชต้องการ คือ.

2.7.1 ธาตุที่พืชต้องการในปริมาณมากหรือมหธาตุ (Macronutrient Elements) คือธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและพืชมีความต้องการในปริมาณมากเมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ มีทั้งหมด 6 ธาตุ ได้แก่:

1. ไนโตรเจน เป็นธาตุสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของกรดแอมิโน, โปรตีน, นิวคลีโอไทด์ และคลอโรฟิลล์. สารเหล่านี้เป็นสารประกอบที่สำคัญมากต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช. พืชที่ได้รับ

ไนโตรเจนเพียงพอจะเจริญเติบโตดี, มีใบสีเขียวเข้ม. ในพืชผัก ไนโตรเจนมีส่วนสำคัญในการเพิ่มคุณภาพ เนื่องจากเป็นตัวทำให้ผักมีลักษณะอวบน้ำ. พืชผักรับประทานต้นหรือใบจึงต้องการไนโตรเจนสูง เพื่อให้ต้นและใบมีความกรอบ, มีกากหรือเส้นใยน้อย, ซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคต้องการ. ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) และไนเทรต-อิออน (NO_3^-). แต่ไนโตรเจนส่วนใหญ่ในสารละลายจะอยู่ในรูปไนเทรตอิออน เนื่องจากแอมโมเนียมอิออนในปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อพืชได้. ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก ควรมีสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแอมโมเนียมอิออนและไนเทรตอิออน. ปริมาณแอมโมเนียมอิออนไม่ควรเกินร้อยละ 50 ของความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในสารละลาย. แต่สัดส่วนที่เหมาะสมมักใช้ไนเทรตอิออนร้อยละ 75 และแอมโมเนียมอิออนร้อยละ 25. สารเคมีที่ให้ไนเทรตอิออน คือ แคลเซียมไนเทรตและโพแทสเซียมไนเทรต. พืชโดยทั่วไปมีความต้องการธาตุไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก เป็นธาตุอาหารที่สำคัญมากในการส่งเสริมการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืช. พืชที่ได้รับไนโตรเจนอย่างเพียงพอ ใบจะมีสีเขียวสด, มีความแข็งแรง, โตเร็ว และทำให้พืชออกดอกและผลที่สมบูรณ์. เมื่อพืชได้รับไนโตรเจนมากๆ อาจทำให้เกิดผลเสียได้เหมือนกัน เช่น คุณภาพของเมล็ด, ผล และใบ เสื่อมคุณภาพลงได้. พืชแก่ช้าผิดปกติ เนื่องจากไนโตรเจนส่งเสริมให้มีการเจริญเติบโตอยู่เรื่อยๆ. ผลผลิตของพืชที่ให้เมล็ดลดลง เนื่องจากในสภาพที่มีไนโตรเจนสูงนั้น พืชมุ่งในการสร้างยอด, ลำต้น, กิ่ง และใบมากกว่าสร้างดอกและเมล็ด, ทำให้พืชอวบน้ำมาก, ต้นอ่อนล้มง่าย, ความต้านทานต่อโรคของพืชลดลง, ทำให้โรคและแมลงเข้ารบกวนทำลายได้ง่าย (ภาควิชาปฐพีวิทยา 2548).

2. ฟอสฟอรัส มีหน้าที่เกี่ยวกับการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งเป็นกระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญมาก. พลังงานที่ได้จากการสังเคราะห์แสงและเมแทบอลิซึมของสารประกอบคาร์โบไฮเดรตจะถูกเก็บไว้ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต (อะดิโนซีนไตรฟอสเฟตหรือ ATP) สำหรับใช้ในการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของพืช. นอกจากนั้น ฟอสฟอรัสยังเป็นส่วนประกอบของนิวคลีโอไทด์และไลปิดอีกด้วย. ในแง่การเจริญเติบโตของพืช ฟอสฟอรัสทำให้การแบ่งเซลล์และการพัฒนาของส่วนที่เจริญเติบโตของพืช (ยอดและราก) เป็นไปได้ดี. ฟอสฟอรัสยังช่วยให้พืชออกดอกและแก่เร็ว ทำให้พืชมีความแข็งแรงและต้านทานต่อโรคแมลง. สำหรับพืชผัก ฟอสฟอรัสทำให้พืชตั้งตัวได้เร็ว โดยเฉพาะระยะแรกๆ ของการเจริญเติบโต. ฟอสฟอรัสยังมีส่วนในการทำให้พืชผักเก็บเกี่ยวได้เร็วและมีรสชาติดีขึ้นด้วย. รูปของฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ได้คือ โมโนไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) และไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$). ส่วนจะอยู่ในรูปใดมากกว่ากัน จะขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลายในขณะนั้น. ในการปลูกพืชในดินมักมีปัญหาความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัส เมื่อพีเอชไม่เหมาะสม, เช่น ถ้าพีเอชต่ำ ฟอสฟอรัสจะทำปฏิกิริยากับเหล็กและ

อลูมิเนียม, แต่ถ้าพีเอชสูงฟอสฟอรัสจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแมกนีเซียม ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง. แต่ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิกจะไม่เกิดปัญหานี้เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณธาตุอาหารและพีเอชให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้.

3. โพแทสเซียม มีหน้าที่เกี่ยวกับการทำงานด้านสรีรวิทยาของพืช เป็นธาตุจำเป็นในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตและการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาลในพืช, จึงเป็นธาตุที่จำเป็นมากต่อพืชผักประเภทหัว. นอกจากนี้ โพแทสเซียมยังควบคุมการปิดเปิดของปากใบและกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์. ในพืชผักรับประทานต้นและใบ มีความต้องการโพแทสเซียมไม่น้อยกว่าไนโตรเจน เนื่องจากเป็นธาตุที่ช่วยส่งเสริมคุณภาพ, เช่น ช่วยให้กะหล่ำปลีห่อหัวได้ดี, น้ำหนักดี, มีเนื้อแน่นและเป็นเงาน่ารับประทาน. ส่วนผักกาดต่างๆ ที่รับประทานใบ ถ้าได้รับโพแทสเซียมเพียงพอจะไม่เฉาง่าย เมื่อตัดส่งตลาด จึงสดอยู่ได้นาน. ในพืชผักกินผล เช่น มะเขือเทศ ความต้องการโพแทสเซียมจะสูงในช่วงที่มีการพัฒนาของผล. รูปของโพแทสเซียมที่พืชนำไปใช้ได้คือโพแทสเซียมอิออน (K^+). แต่ถ้ามีโพแทสเซียมมากเกินไปจะรบกวนการนำแคลเซียมและแมกนีเซียมไปใช้. สารเคมีที่ให้โพแทสเซียมมีอยู่หลายตัว เช่น โพแทสเซียมไนเทรตและโพแทสเซียมฟอสเฟต.

4. แคลเซียม เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์. หน้าที่หลักภายในพืช จึงเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของเนื้อเยื่อและเซลล์พืช. นอกจากนั้น ยังมีบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์อีกด้วย. การดูดใช้แคลเซียมของพืชจะขึ้นกับอิออนตัวอื่นในสารละลาย, โดยเฉพาะเมื่อมีไนเทรตจะทำให้ดูดใช้แคลเซียมได้ดีขึ้น. รูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือแคลเซียมอิออน (Ca^{2+}). แหล่งแคลเซียมที่ดีที่สุดคือ แคลเซียมไนเทรต เนื่องจากละลายง่าย, ราคาไม่แพง, อีกทั้งยังให้ธาตุไนโตรเจนได้ด้วย. ความเข้มข้นของแคลเซียมที่มากเกินไปจะมีผลต่อการนำโพแทสเซียมและแมกนีเซียมมาใช้.

5. แมกนีเซียม เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์, นอกจากนี้ ยังมีบทบาทในในการดูดซึมธาตุอาหารและการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟอสเฟต. แมกนีเซียมที่พืชสามารถนำไปใช้ได้อยู่ในรูป แมกนีเซียมอิออน (Mg^{2+}). สารเคมีที่ใช้เป็นแหล่งแมกนีเซียมคือแมกนีเซียมซัลเฟต. ในการเตรียมสารละลายสำหรับปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก จะต้องระวังในเรื่องปริมาณแมกนีเซียม เนื่องจาก ปริมาณของแมกนีเซียมที่มากเกินไปจะรบกวนการนำโพแทสเซียมและแคลเซียมมาใช้.

6. กำมะถัน เป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพืชมากพอๆ กับฟอสฟอรัส. พืชแต่ละชนิดจะมีกำมะถันในปริมาณต่างกัน. พืชตระกูลถั่ว, หอม, กะหล่ำปลี, หน่อไม้ฝรั่ง, กระเทียม, ต้องการกำมะถันเพื่อเพิ่มกลิ่นและรสชาติให้ดีขึ้น กำมะถันมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีนและกรดแอมิโนบางชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิสเทอีน (cysteine) และเมไทโอนีน (methionine). นอกจากนั้น กำมะถันยังมีผลทางอ้อมต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ของพืชด้วย. รูปของกำมะถันที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้คือ ซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}), ซึ่งในการเตรียมสารละลายธาตุอาหารมักมีส่วนประกอบของเกลือซัลเฟตหลายชนิดอยู่ เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต, แคลเซียมซัลเฟต, เป็นต้น, พืชที่ปลูกในสารละลายจึงมักไม่ขาดธาตุนี้.

2.7.2 ธาตุที่ต้องการในปริมาณน้อยหรือจุลธาตุ (Micronutrient Elements) คือธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชแต่พืชต้องการในปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่นๆ ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิกจะต้องระมัดระวังการควบคุมปริมาณธาตุกลุ่มนี้เป็นพิเศษกว่าธาตุในกลุ่มมหธาตุ เพราะความเข้มข้นระหว่างความเป็นพิษและการขาดมีระยะค่อนข้างแคบ นอกจากนั้นการประเมินอาการขาดทำได้ค่อนข้างยาก การแก้ปัญหาการขาดจุลธาตุทำได้ง่ายกว่าการแก้ปัญหาความเป็นพิษ เมื่อเกิดอาการเป็นพิษขึ้นมักจะต้องปลูกใหม่ ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารกลุ่มนี้ขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลายและการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของธาตุอาหารหลักบางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส. ดังนั้นการควบคุมพีเอชของสารละลายและความเข้มข้นของธาตุอาหารจึงเป็นเรื่องสำคัญ ธาตุที่พืชต้องการในปริมาณน้อยนี้มีอยู่ 7 ธาตุ ได้แก่:

1. เหล็ก เป็นธาตุที่ไม่ค่อยมีการเคลื่อนย้ายในพืช. เหล็กเป็นส่วนประกอบของเฟอริดอกซิน (Ferridoxin) ซึ่งเป็นสารสำคัญในกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนของพืช. นอกจากนั้นยังเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์, รูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ คือเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอริกไอออน (Fe^{3+}). สารเคมีที่ให้ธาตุเหล็กและมีราคาถูก คือ เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$), ซึ่งละลายน้ำได้ง่ายแต่ตกตะกอนเร็ว, จึงต้องระวังในเรื่องพีเอชของสารละลาย. นิยมใช้เหล็กในรูปคีเลต ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ สามารถคงตัวอยู่ในรูปสารละลายธาตุอาหารพืชและพืชสามารถนำไปใช้ได้ดี.

2. แมงกานีส เป็นธาตุที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงและการทำงานร่วมกับธาตุอื่น เช่น เหล็ก, แคลเซียม และแมกนีเซียม. ความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสจะถูกควบคุมโดยค่าพีเอชของสารละลาย. รูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้คือ แมงกานีสไอออน (Mn^{2+}).

3. สังกะสี เป็นธาตุที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์ Indole-3-Acetic Acid (IAA) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการขยายตัวของเซลล์. มีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด และยังมีบทบาทใน

การสร้างแป้งของพืชด้วย. รูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ คือ ซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ที่อาจได้จากซิงก์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) หรือซิงก์คลอไรด์ ($ZnCl_2$).

4. ทองแดง เป็นธาตุที่มีความจำเป็น เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของโปรตีน ช่วยในกระบวนการหายใจ และส่งเสริมให้พืชนำเหล็กมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น. รูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชคือ คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}), ที่อาจได้จากคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) หรือคอปเปอร์คลอไรด์ ($CuCl_2$).

5. โบรอน หน้าที่ของโบรอนในพืชยังไม่ทราบแน่ชัด โบรอนมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์และเคลื่อนย้ายคาร์โบไฮเดรต, การสร้างกรดแอมิโนและโปรตีน, การงอกและการเจริญเติบโตของละอองเกสรตัวผู้และกิจกรรมต่างๆ ของเซลล์, เช่น การแบ่งเซลล์, การขยายตัวของเซลล์, การเจริญเติบโตของเซลล์. นอกจากนั้น โบรอนยังมีอิทธิพลต่อสัดส่วนการดูดใช้ธาตุที่มีประจุบวก (cation) และธาตุที่มีประจุลบ (anion) ของพืช. โดยจะส่งเสริมให้มีการดูดใช้ธาตุที่มีประจุบวกได้ดีขึ้น และธาตุที่มีประจุลบลดลง, ที่เด่นชัดคือการดูดใช้แคลเซียมจะดีขึ้นถ้ามีโบรอนเพียงพอ. รูปที่เป็นประโยชน์สำหรับพืชคือโบเรตไอออน (BO_3^{3-}) ซึ่งมีในน้ำธรรมชาติ หรือได้จากการเติมกรดบอริก (H_3BO_3).

6. โมลิบดินัม เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ 2 ชนิด คือไนโตรจีเนส (Nitrogenese) ซึ่งสำคัญต่อการตรึงไนโตรเจนจากอากาศ และไนเทรตรีดักเทส (nitrate reductase) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการรีดิวส์ไนเทรตให้เป็นไนไทรต์ พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในรูปโมลิบเดตไอออน (MoO_4^{2-}) ซึ่งอาจได้จากสารแอมโมเนียมโมลิบเดตหรือโซเดียมโมลิบเดต.

7. คลอรีน ถ้าความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 1 ส่วนใหญ่จะเป็นพิษต่อพืช. บทบาทภายในพืชยังไม่ทราบแน่ชัด แต่ถ้าขาดคลอรีนพืชจะเหี่ยวง่าย. ในน้ำจะมีคลอรีนอยู่ในรูปคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้. ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะไปยับยั้งการนำธาตุที่อยู่ในรูปประจุลบตัวอื่นๆ มาใช้ประโยชน์.

2.8 สารละลายธาตุอาหาร

สารละลายธาตุอาหารเป็นหัวใจสำคัญของการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก เนื่องจาก พืชจะได้รับธาตุอาหารต่างๆ จากสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งเตรียมขึ้นจากการนำปุ๋ยหรือสารเคมีมาละลายน้ำ, จึงสามารถกำหนดปริมาณธาตุอาหารให้เป็นไปตามที่พืชต้องการได้. การเตรียมสารละลายธาตุอาหารมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังต่อไปนี้.

2.8.1 คุณภาพน้ำที่ใช้ใช้เตรียมสารละลาย

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นที่สุดในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน, โดยเฉพาะระบบ NFT ต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าระบบอื่น. คุณภาพน้ำเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน ซึ่งคุณสมบัติของน้ำจะเป็นสิ่งที่มีผลต่อการเลือกชนิดพืชที่ปลูก, ระบบปลูกที่เหมาะสม และวิธีการจัดการธาตุอาหารพืชขณะปลูก.

น้ำที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิก คือ น้ำฝน, เป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง. แต่จะต้องมีภาชนะเก็บขนาดใหญ่พอที่จะเก็บน้ำได้เพียงพอ, ที่จะนำมาใช้เตรียมสารละลายโดยตรงหรือมาใช้ผสมกับน้ำแหล่งอื่นในกรณีที่ปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอ.

ในการปลูกพืชผักเป็นการค้าควรนำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ. โดยทั่วไปน้ำที่เหมาะสมที่จะนำมาเตรียมสารละลายได้ควรมีปริมาณธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 13.

ตารางที่ 13. คุณภาพของน้ำที่สามารถนำมาปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโพนิก

ธาตุที่เจือปนในน้ำ		น้ำหนักโมเลกุล	ค่าสูงสุดของธาตุที่สามารถมีอยู่ในน้ำได้	
			มิลลิโมล/ลิตร	มิลลิกรัม/ลิตร
โซเดียม (Sodium)	Na^{+}	23.0	0.5	11.5
คลอรีน (Chlorine)	Cl^{-}	35.5	1.0	35.5
แคลเซียม (Calcium)	Ca^{++}	40.1	2.0	80.2
แมกนีเซียม (Magnesium)	Mg^{++}	24.3	0.5	12.2
ซัลเฟต (Sulphate)	SO_4^{++}	96.1	0.5	48.1
ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate)	HCO_3^{-}	61.0	4.0	244.0
เหล็ก	Fe^{++}	55.9	0.5	28.0
แมงกานีส	Mn^{++}	54.9	10.0	549.0
ทองแดง	Cu^{++}	63.5	1.0	63.5
โบรอน	B^{+++}	10.8	25.0	270.0
สังกะสี	Zn^{++}	65.4	5.0	327.0
ฟลูออร์ไลน์	F^{-}	19.0	25.5	475.0
ค่าการนำไฟฟ้า	EC		0.5mS/cm 25° C	
ค่าความเป็นกรด - เบส	PH		5.5-6	

ที่มา : Benoit (1992) อ้างในทองอร่าม (2546).

2.8.2 ชนิดของปุ๋ยหรือสารเคมีที่ใช้ในสารละลาย ปุ๋ยหรือสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายธาตุอาหารพืชจะต้องเป็นสารที่ละลายน้ำได้หมด ซึ่งจะมีราคาแพง. ดังนั้น ต้องหาแหล่งธาตุอาหารในรูปของปุ๋ย ซึ่งมีราคาถูกกว่าสารเคมีทั่วไป (ตารางที่ 14). แต่ธาตุบางชนิด จำเป็นต้องใช้สารเคมีโดยเฉพาะจุลธาตุ, ซึ่งมีราคาแพง แม้จะใช้ในปริมาณเล็กน้อย. นอกจากธาตุเหล็กซึ่งต้องใช้ในรูปคีเลตที่มีราคาแพงและต้องใช้ในปริมาณมาก. นอกจากนั้น ในปุ๋ยบางชนิดที่ให้ธาตุอาหารหลักยังมีจุลธาตุบางตัวปนอยู่ด้วย จึงไม่จำเป็นต้องเติมจุลธาตุเหล่านั้นอีก.

ตารางที่ 14. ปุ๋ยบางชนิดที่ใช้ในสารละลายเพื่อให้ธาตุอาหารหลัก

ชนิดของปุ๋ย	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	ธาตุอื่นที่มีอยู่
แอมโมเนียมซัลเฟต	20			กำมะถัน 28 %
แอมโมเนียมไนเทรต	34			
แอมโมเนียมซัลเฟต ไนเทรต	26			แคลเซียมออกไซด์ 14%
แอมโมเนียมคลอไรด์	26			
ยูเรีย	46			
แคลเซียมไนเทรต	10-20			แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ประมาณ 28%
โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต	12	61		
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต แอมโมเนียมฟอสเฟต	21	53		
แอมโมฟอส เอ	11	48		
แอมโมฟอส บี	16	20		
โพแทสเซียมไนเทรต	14		44	
โพแทสเซียมแอมโมเนียมไนเทรต	16		28	
โพแทสเซียมออโทฟอสเฟต		32-53	30-50	
โพแทสเซียมเมตาฟอสเฟต		60	40	
โซเดียมโพแทสเซียมไนเทรต	15		15	
ไนโตรฟอสกา	10-16.5	11-30	12-26.5	
ซุปเปอร์ฟอสเฟต				
ซิงเกิล		15-20		
ดับเบิล		36-42		
ทริปเปิล		45-50		ยิบซั่ม 50% และ เหล็ก อะลูมิเนียม ซิลิกา กำมะถัน และฟลูออรีน

ตารางที่ 14. (ต่อ)

ชนิดของปุ๋ย	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	ธาตุอื่นที่มีอยู่
แคลเซียมเมธาฟอสเฟต		65		ฟลูออรีนเล็กน้อย
โมโนแคลเซียมฟอสเฟต		48-55		
โพแทสเซียมซัลเฟต			42-48	กำมะถัน และคลอรีนเล็กน้อย
โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต		52.2	34.6	
โพแทสเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต			20	แมกนีเซียมประมาณ 20%
โพแทสเซียมซิลิเกต			25	

ที่มา : ถวัลย์ (2534) อ้างในพงษ์ปรีชา (ม.ป.ป.).

2.8.3 สูตรของสารละลายธาตุอาหาร ปัจจุบันสารละลายธาตุอาหารมีอยู่หลายสูตร ขึ้นกับชนิดพืชที่ปลูก, ฤดูปลูก, แสง, อุณหภูมิขณะที่ปลูก, สถานที่ปลูก, ตลอดจนวัตถุประสงค์ของการปลูก. สูตรสารละลายธาตุอาหารพืชที่เป็นสูตรมาตรฐานและมักถูกดัดแปลงเพื่อให้เหมาะสมกับพืชต่างๆ มีอยู่หลายสูตร เช่น สูตร Knop 1865, Sach 1860, Shive และ Hoagland, ดังตารางที่ 8.

ในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก ไม่มีสารละลายสูตรใดสมบูรณ์แบบ จึงจำเป็นต้องปรับสูตรที่เลือกใช้ให้เหมาะสม, ควรให้ความสำคัญกับการปรับหรือจัดสัดส่วนของธาตุอาหารให้เหมาะกับพืชที่ปลูกและสภาพแวดล้อม. นอกจากการกำหนดปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ตามสูตรพื้นฐานและสัดส่วนของธาตุอาหารหลักแล้ว, ยังอาจเตรียมสารละลายโดยยึดหลักช่วงความเข้มข้นและค่าเฉลี่ยของธาตุอาหารตามความต้องการของพืช, ดังตารางที่ 15.

ตารางที่ 15. ช่วงความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชที่นิยมใช้ในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

ธาตุอาหาร	ช่วงของธาตุอาหารที่พืชใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1. ไนโตรเจน (N)	
ในรูปของไนเทรต (NO_3^-)	70 - 200
ในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+)	0 - 30
2. ฟอสฟอรัส (P)	30 – 90
3. โพแทสเซียม (K)	200 – 400
4. แคลเซียม (Ca)	150 – 400
5. แมกนีเซียม (Mg)	25 – 75
6. กำมะถัน (S)	60 - 333
7. เหล็ก (Fe)	0.5 – 5
8. แมงกานีส (Mn)	0.1 – 1
9. โบรอน (B)	0.1 – 1
10. สังกะสี (Zn)	0.02 - 2
11. ทองแดง (Cu)	0.02 - 2
12. โมลิบดินัม (Mo)	0.01 – 1

ที่มา: Hanger (1992) อ้างในทองอร่าม (2550).

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาของ Traka *et al.* (n. d.) ศึกษาการการตอบสนองของมะเขือเทศกับการใช้น้ำเสียเป็นปุ๋ยร่วมกับการให้น้ำในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน. ทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียชุมชนนำมาบำบัดและฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนก่อน, จากนั้น ปลูกพืชในวัสดุปลูก 2 ชนิด ได้แก่ เพอร์ไลต์และเพอร์ไลต์ : ซีโอไลต์, นำน้ำเสียที่บำบัดแล้วรดพืชที่ปลูก โดยไม่มีการเติมธาตุอาหารเพิ่ม. เปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในวัสดุปลูกชนิดเดียวกัน แต่ใช้สารละลายมาตรฐาน. ผลการศึกษา พบว่า การติดดอกและการร่วงของดอกมะเขือเทศโดยใช้วัสดุปลูกเพอร์ไลต์และเพอร์ไลต์ : ซีโอไลต์แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. การติดดอกและดอกร่วงนี้ เป็นผลจากความไม่สมดุลของธาตุอาหารที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้งชุมชน อาจทำการแก้ไขโดยการเพิ่มธาตุอาหาร.

รายงานของ Boyden and Rababah (1996) ที่ได้ศึกษาการนำน้ำเสียชุมชนมาใช้ประโยชน์เป็นธาตุอาหารพืชในการปลูกผักกาดหอม, พริก, ข้าวโพด และมะเขือเทศ. โดยนำน้ำเสียฆ่าเชื้อก่อนใช้ในการปลูกพืช และเปรียบเทียบกับสารละลายสูตรมาตรฐาน. ผักกาดหอมทำการปลูกโดยระบบไฮโดรโพนิก พบว่า ผักกาดหอมจะใช้ประโยชน์โดยการดึงไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียมาใช้ประโยชน์ได้ร้อยละ 80 และ 77, ตามลำดับ. สำหรับในข้าวโพด จะนำน้ำเสียชุมชนมาผสมกับน้ำและให้ไปพร้อมกับการรดน้ำ, เปรียบเทียบกับปุ๋ยที่ใช้ตามท้องตลาด พบว่า ช่วยเพิ่มผลผลิตได้ร้อยละ 50.

การศึกษาของ Chaves *et al.* (1999) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองนำน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้ในการปลูกผักกาดหอมและต้น Ell (*Anguilla anguilla*). ผลตอบสนองของผักกาดหอมต่อน้ำจากการเลี้ยงปลา เปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้า, พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกด้วยระบบปิดสามารถให้ผลผลิตได้ 10 – 30 ต้นต่อตารางเมตร, ซึ่งเมื่อครบกำหนด 5 สัปดาห์ น้ำหนักสด 115 – 155 กรัม/ต้น. ในระหว่างการปลูกพืชไม่แสดงอาการขาดธาตุอาหารและเป็นโรค.

การศึกษาของ Rababah and Ashbolt (2000) การประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกในการบำบัดน้ำเสียชุมชนขั้นต้น โดยใช้ระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT ด้วยการปลูกผักสลัด, พบว่า หลังทำการปลูกพืชในระบบไฮโดรโพนิกครบ 7 วัน (1 รอบการเปลี่ยนน้ำสารละลาย), ประสิทธิภาพในการบำบัดค่า TP ได้ร้อยละ 77, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่า COD ได้ร้อยละ 87, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD ได้ร้อยละ 87, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 99. การศึกษาเรื่องค่าดีโอในสารละลายน้ำเสียชุมชนผสมน้ำเปล่าที่อัตรา 1:1, จะมีปริมาณ DO สูงที่สุด (DO = 4.0 mg./l.) ซึ่งปริมาณ DO จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นประมาณ 5 mg./l. หลังจากปลูกพืชในระบบไฮโดรโพนิกผ่านไป 24 ชั่วโมง.

การศึกษาของ Mavrogianpoulos *et al.* (2002) ถึงการใช้น้ำเสียเป็นสารละลายธาตุอาหารในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก โดยใช้กรวดเป็นวัสดุปลูกในพืช Giant reed *(Arundo donax),* พบว่า Giant Reed สามารถเจริญเติบโตได้ในระบบไฮโดรโพนิกที่ใช้กรวดเป็นวัสดุปลูกได้ดี, โดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแบบบ่อเปิดเป็นสารละลายธาตุอาหารในระบบปลูก.

การศึกษาของ Rababah and Ashbolt (2000) ถึงการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นนำมาใช้เพื่อปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก, พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายมาตรฐานมีการเจริญเติบโตสูงสุด, รองลงมา คือ น้ำเสีย : สารละลายมาตรฐาน ที่ระดับ 1:1 และน้ำเสีย : สารละลายมาตรฐาน ที่ระดับ 1 : 3 มีการเจริญเติบโตน้อยที่สุด.

การศึกษาของ Fabien Monnet *et al.* (2002) ศึกษาการปลูกกุหลาบช่อในระบบ NFT เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน, พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 89, ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดีร้อยละ 95, และประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยร้อยละ 94.

การศึกษาของ Vaillant *et al*. (2003) ศึกษาการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้พืช *Dutura Innosia,* ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณไนโตรเจนถูกบำบัดร้อยละ 97, และปริมาณ BOD_5 ลดลงเหลือ 45 มก./ล.

การศึกษาของ Adler *et al*. (2003) ในการปลูกผักกาดหอมเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ, ด้วยระบบ conveyor production system (CPS) ซึ่งใช้เทคโนโลยี thin-film ในการปลูกผักกาดหอมเพื่อบำบัดน้ำเสีย, สามารถลดค่าฟอสฟอรัสในน้ำได้จาก 0.52 ลดลงเหลือ <0.01 มก./ล.

การศึกษาของ Vaillant *et al*. (2004) ประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกปลูกพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ Woodly Digitalis (*Digitalis Lanata* Ehrh.) และ foxglove (*Digitalis Purpurea* L.) เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน, พบว่า พืช Woodly Digitalis และพืช Foxglove ต่างมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 79 และ 84, ตามลำดับ, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าบีโอดีได้ร้อยละ 93 และ 92, ตามลำดับ, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 82 และ 92, ตามลำดับ.

การศึกษาของ Lennard and Leonard (2004) เปรียบเทียบการไหลของน้ำแบบไหลกลับไปกลับมาและแบบไหลต่อเนื่องในระบบไฮโดรโพนิกแบบผสมผสานกับแบบชั้นกรวด, โดยใช้สารละลายธาตุอาหารจากน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา, พบว่า น้ำหนักสดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กหลังปลูกได้ 21 วัน คือ 129.98±2.65 กรัม/ต้น. ค่าไนโตรเจนในรูปไนเทรตหลังการปลูกผักกาดหอมในระบบการไหลของน้ำแบบไหลกลับไปกลับมาอยู่ที่ 13.30 ± 2.05 มก./ล. และแบบแบบไหลต่อเนื่อง 11.80±1.78 มก./ล. ค่าฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตหลังการปลูกผักกาดหอมใน

ระบบการไหลของน้ำแบบไหลกลับไปกลับมาอยู่ที่ 4.04±0.39 มก./ล. และแบบแบบไหลต่อเนื่อง 3.87±0.71 มก./ล. ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายแบบไหลต่อเนื่อง และค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายแบบไหลกลับไปกลับมาใกล้เคียงกัน. ค่าดีโอในสารละลายแบบไหลต่อเนื่องอยู่ที่ 7.43 มก./ล. และค่าดีโอในสารละลายแบบไหลกลับไปกลับมาเฉลี่ย 7.24 มก./ล. ค่าพีเอชในสารละลายแบบไหลต่อเนื่องเฉลี่ย 6.9±0.06 และค่าพีเอชในสารละลายแบบไหลกลับไปกลับมาเฉลี่ย 6.8±0.05.

การศึกษาของ Lennard and Leonard (2006) ใช้น้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเป็นสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT ปลูกผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก หลังปลูกอายุ 21 วัน, พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าไนโตรเจนในรูปไนเทรตที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT คือ ร้อยละ 90.9, 93.2 และ 71.8, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT คือ ร้อยละ 52.5, 36.3 และ 50.3, ตามลำดับ. ค่าดีโอในสารละลายในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT ค่าการนำไฟฟ้า คือ 189.7 ± 3.2, 171.7 ± 1.2 และ 155 ± 1.0 μS/cm, ตามลำดับ. ค่าดีโอ คือ 7.84 ± 0.03, 7.96 ± 0.06 และ 7.93 ± 0.07 มก./ล., ตามลำดับ.

การศึกษาของ Michitsch *et al.* (2007) ประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกในการศึกษาการใช้น้ำเสียและปุ๋ยน้ำหมักเป็นสารละลายธาตุอาหารในการเจริญเติบโตและอนุบาลพืชพวก Turfgrass ใช้น้ำเสียที่ชุมชนที่ผ่านระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศและน้ำปุ๋ยหมักจากเห็ด. แบ่งชุดการทดลองดังนี้ การทดลองชุดที่ 1 คือ HH (Half – Strength Hoglan's Nutrient Solution), การทดลองชุดที่ 2 PP (สารละลายการค้า), การทดลองชุดที่ 3 SMC (Mushroom Compost), การทดลองชุดที่ 4 GMC (MSW Compost), การทดลองชุดที่ 5 ADW (น้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ), และในแต่ละชุดที่เติมธาตุอาหารเข้าไป (SMC-A, GMC-A และADW – A), พบว่า พืชสามารถเจริญเติบโตใน SMC-A และ GMC-A มากที่สุด. การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ธาตุอาหาร N, P และ K จากปุ๋ยน้ำหมักสามารถใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารในการปลูกพืชได้.

การศึกษาของ Juhasze *et al*. (2008) ประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกใช้สารละลายที่ระดับความเข้มข้นของอาร์เซนิก (As) ระดับต่างๆ ปลูกพืช ได้แก่ บีต, แรดิช, ผักกาดหอม และถั่วเขียว, แล้วนำพืชที่ได้ไปเลี้ยงสุกรศึกษาการสะสมของอาร์เซนิกในสุกร.

การศึกษาของ Shalaby *et al*. (2008) ศึกษาทดลองใช้ระบบไฮโดรโพนิกชั้นกรวดปลูกต้นกกเพื่อบำบัดน้ำเสียจากสิ่งปฏิกูล พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียได้ร้อยละ 99.4, ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งละลายน้ำได้ร้อยละ 56, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ได้ร้อยละ 77 – 82, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าบีโอดี ได้ร้อยละ 77 – 82, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งละลายน้ำได้ร้อยละ 56, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ได้ร้อยละ 78 – 96 และสามารถบำบัด Feacal Streptococi ได้ร้อยละ 99.4 และบำบัด Total Faecal Coliform Bacteria ในน้ำเสียจากสิ่งปฏิกูลได้.

การศึกษาของ Snow and Ghaly (2008) ศึกษาการใช้ข้าวบาร์เลย์ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบไฮโดรโพนิก พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด ได้ร้อยละ 52.7 – 60.5, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ได้ร้อยละ 72.9 – 83.1, ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในรูปของ NH_4^+ NO_2^- และ NO_3^- - N ได้ร้อยละ 76.0 – 76.6, 97.6 – 99.2 และ 76.9 – 81.5, ตามลำดับ, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าฟอสฟอรัสในรูปของ PO_4^{3-} - P ได้ร้อยละ 87.1 – 95.1, ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าค่าของแข็งทั้งหมด ได้ร้อยละ 52.7 – 60.5.

การศึกษาของ Snow and Ghaly (2008) ศึกษาการใช้พืชน้ำ ได้แก่ ผักตบชวา, จอกแหน และสาหร่ายหางกระรอก ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบไฮโดรโพนิก, พบว่า ที่ HRT 6 วัน ผักตบชวาสามารถบำบัดค่าซีโอดีได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 89.5 และที่ HRT 12 วัน ผักตบชวาสามารถบำบัดของแข็งทั้งหมด ได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 48.0, สามารถบำบัดไนโตรเจนในรูปของ NH_4^+ - N, NO_2^- - N และ NO_3^- - N ได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 76.0, 90.6 และ 54.4, ตามลำดับ และสามารถบำบัดฟอสฟอรัสในรูปของ PO_4^{3-} - P ได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 76.8 สามารถบำบัดของแข็งทั้งหมดได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 48.0.

การศึกษาของบินสมประสงค์และคณะ (2547) ได้ศึกษาการใช้ของเสีย (fruit water) จากกระบวนการดีแคนเตอร์ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกพืชโดยระบบไฮโดรโพนิก โดย fruit water มีปริมาณธาตุอาหาร คือ ไนโตรเจน 273 มก./ล., โพแทสเซียม 120 มก./ล., ฟอสเฟต 65 มก./ล., พบว่า ผักกาดหอมไม่สามารถเจริญเติบโตได้, ส่วนผักบุ้งสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำ fruit water เจือจางผสมกับปุ๋ยเคมี ปริมาตร 250 มล. ซึ่งการเจริญเติบโตของผักบุ้งดีเทียบเท่ากับการปลูกผักบุ้งในสารละลายปุ๋ย.

การศึกษาของจิระเกียรติกุลและวชิรปัทมา (2547) นำน้ำสกัดชีวภาพหรือน้ำหมักชีวภาพหรือปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (bioextract) มาใช้ร่วมกับสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ปลูกผักคะน้าในระบบไม่ใช้ดิน. งานวิจัยนี้ศึกษาความเข้มข้นของน้ำสกัดชีวภาพ (1:200, 1:400, 1:600, 1:800 และ 1:1000) ที่ผสมกับสารละลายธาตุอาหารในอัตราส่วน 1 : 1, เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของคะน้าที่ปลูก, พบว่า การเจริญเติบโตของคะน้าที่ปลูกโดยใช้สารละลายธาตุอาหารผสมกับน้ำสกัดชีวภาพที่มีความเข้มข้นต่างกันมีความแตกต่างกัน อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ. แต่ที่ความเข้มข้น 1 : 200 มีแนวโน้มของการเติบโตของผักคะน้าใกล้เคียงกับการใช้สารละลายธาตุอาหารอย่างเดียว, ในขณะที่มีต้นทุนต่อกระถางถูกกว่า.

การศึกษาของหิรัญ (2550) ศึกษาการนำน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสุกรไปใช้ในการปลูกผักกาดหอมโดยไม่ใช้ดินใน 2 ระบบ คือ ระบบ NFT และระบบ DFT (Deep Flow Technique), โดยทำการทดลอง 3 ชุดการทดลอง, ได้แก่ การทดลองที่ 1 เป็นสารละลายอาหารสูตรมาตรฐาน, การทดลองที่ 2 สารละลายธาตุอาหารสังเคราะห์ (น้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสุกรเติมธาตุอาหาร) และการทดลองที่ 3 น้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสุกร, พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายสูตรมาตรฐานทั้งระบบ NFT และ DFT มีการเจริญเติบโตของผักกาดหอมสูงที่สุดแตกต่างกับที่ปลูกด้วยน้ำทิ้งจากโรงฆ่าสุกร.

3. การวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยใช้ชุดไฮโดรโพนิก ขนาด 1x 0.8 เมตร, ที่ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากบริษัท เอ ซี เค ไฮโดรฟาร์ม จำกัด, เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (Red Oak).

3.2 ประชากรศึกษา

ประชากรที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ การเจริญเติบโตของผักกาดหอมหลังการทดลองปลูกในระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT (Nutrient Film Techniques), ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในสารละลายธาตุอาหารแตกต่างกัน.

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การสำรวจและเก็บข้อมูลน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

การเก็บตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อน้ำล้นที่ปล่อยออกจากบ่อบำบัดด้วยระบบไม่ใช้อากาศของฟาร์มเลี้ยงสุกร (บ่อหมักก๊าซชีวภาพ), โดยการเก็บแบบจ้วง (Grab Sampling) ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างโดยการจ้วงเอาน้ำที่ระดับความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร กระจายทั่วทุกจุดของบ่อน้ำล้น, บรรจุในขวดเก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 1.5 ลิตร. สำหรับตัวอย่างน้ำที่จะนำมาวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชจะคงสภาพน้ำที่เก็บได้ด้วยกรดไนทริกเข้มข้น (NHO_3 conc.) ให้มีพีเอชเท่ากับ 1-2 และแช่ตู้เย็นไวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ธาตุอาหาร. ส่วนการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อใช้ในการศึกษาจะเก็บใส่ถังน้ำขนาด 20 ลิตรและไม่มีการคงสภาพน้ำ.

3.3.2 การตรวจไข่พยาธิ Ascaris

วิธีการตรวจนับไข่พยาธิในครั้งนี้ใช้วิธีของ Ayres and Mara (1996). การเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อตรวจสอบไข่พยาธิ ทำโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกรใส่ขวดพลาสติกและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4–5 องศาเซลเซียส เพื่อรักษารูปร่างและลักษณะต่างๆ ของหนอนพยาธิให้มีสภาพสมบูรณ์ที่สุด, ซึ่งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสหรือสูงกว่า จะทำลายหนอนพยาธิตัวกลม.

วิธีการนับหนอนพยาธิ

1. ใช้ไมโครปิเปตต์ดูดตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ปริมาณ 100 ไมโครลิตร.
2. หยดตัวอย่างลงบนสไลด์ปิดด้วยแผ่นปิดสไลด์.
3. ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์และนับจำนวนไข่หนอนพยาธิที่พบทั้งหมด.

3.3.3 การวิเคราะห์น้ำ

3.3.3.1 ศึกษาปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียจากบ่อบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (บ่อหมักก๊าซชีวภาพ) ของฟาร์มสุกร.

1. ปริมาณทีเคเอ็น (Total Nitrogen) โดยใช้วิธี Kjeldahl Method.
2. ปริมาณฟอสฟอรัส (Total Phosphorus) โดยวิธีกรดแวนนาโดโมลิบโดฟอสฟอริก.
3. ปริมาณโพแทสเซียม โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) WEF 21st Ed. 2005, by ICP – OES.
4. ปริมาณแคลเซียม โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) WEF 21st Ed 2005, by ICP – OES.
5. ปริมาณแมกนีเซียม โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) WEF 21st Ed 2005, by ICP – OES.
6. ปริมาณกำมะถัน โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) Iodometric Titration.
7. ปริมาณเหล็ก โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) WEF 21st Ed 2005, by ICP - OES
8. ปริมาณแมงกานีส โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) WEF 21st Ed 2005, by ICP - OES
9. ปริมาณสังกะสี โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) WEF 21st Ed 2005, by ICP – OES.
10. ปริมาณทองแดง โดยวิธี In-house method, based on APHA, AWWA (2005) WEF 21st Ed 2005, by ICP – OES.

3.3.3.2 ค่าพีเอชของน้ำ

ใช้เครื่อง pH meter ของ Consort รุ่น 830 ในการวัดค่าพีเอชของน้ำตัวอย่าง. โดยใช้น้ำกลั่นฉีดล้างแท่งแก้วของ pH meter ให้สะอาด, แล้วซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู. จากนั้น จุ่มแท่งแก้วลงในน้ำตัวอย่าง. ค่าพีเอชของน้ำจะอ่านได้จากหน้าปัดของเครื่อง. เมื่ออ่านค่าแล้ว จึงใช้น้ำกลั่นฉีดแท่งแก้ว เพื่อทำความสะอาด, แล้วซับด้วยกระดาษทิชชูอีกครั้ง.

3.3.3.3 ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

ใช้เครื่อง EC meter ของ Consort รุ่น 830 ในการวัดค่าการนำไฟฟ้า. ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างแท่งแก้วของ EC meter ให้สะอาด แล้วซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู. จากนั้น จุ่มแท่งแก้วลงในน้ำตัวอย่าง. ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำจะอ่านได้จากหน้าปัดของเครื่อง. เมื่ออ่านค่าแล้วจึงใช้น้ำกลั่นฉีดแท่งแก้วเพื่อทำความสะอาด, แล้วซับด้วยกระดาษทิชชูอีกครั้ง.

3.3.3.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำเสีย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

1) อุปกรณ์ชุดวิเคราะห์ไนโตรเจน ยี่ห้อ Velp รุ่น KD6.
2) อุปกรณ์ชุดวิเคราะห์ฟอสฟอรัส เครื่องสเปกโทโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Aqualytic, รุ่น PC Spectro.
3) อุปกรณ์ชุดวิเคราะห์ซีโอดีแบบปิด (Close reflux) ยี่ห้อ Hanna, รุ่น C9800 Reactor.
4) อุปกรณ์ชุดวิเคราะห์บีโอดี.
5) โถทำแห้ง (Desicator).
6) เตาอบแห้ง (Hot Air Oven) รุ่น Memmert.
7) เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Ohaus, รุ่น Adventurer.
8) กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 มิลลิเมตร.
9) กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Olympus, รุ่น CX 21.

3.3.4 ศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกโดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

3.3.4.1 การคำนวณสูตรสารละลายเพื่อใช้ในการปลูกพืช

ในการทดลองนี้สูตรสารละลายธาตุอาหารที่ใช้คำนวณปริมาณทีเคเอ็นในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิกด้วยระบบ NFT, ดังแสดงในตารางที่ 16, เป็นข้อมูลที่ได้รับจากบริษัท Accent Hydroponics จำกัด, ประเทศออสเตรเลีย.

ตารางที่ 16. สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกผักหลายชนิดด้วยระบบรากแช่ (NFT) ของบริษัท Accent Hydroponics จำกัด ประเทศออสเตรเลีย (ทองอร่าม 2546)

ธาตุอาหารพืชหรือไอออน	ความเข้มข้น	หน่วย
ไนเทรตไอออน (NO_3^-)	208	mg-N/L
ไดโฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน ($H_2PO_4^{-}$)	62	mg-P/L
โพแทสเซียม (K)	332	mg/L
แคลเซียม (Ca)	68	mg/L
แมกนีเซียม (Mg)	49	mg/L
ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-})	65	mg-S/L
เหล็ก (Fe)	5.6	mg/L
แมงกานีส (Mn)	2.2	mg/L
ทองแดง (Cu)	0.06	mg/L
สังกะสี (Zn)	0.06	mg/L

ที่มา : บริษัท Accent Hydroponics จำกัด อ้างในทองอร่าม (2546).

วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD), โดยมี 6 ทรีตเมนต์, แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุดการทดลอง, ได้แก่:

ชุดการทดลองที่ 1

Treatment 1 : สารละลายการค้าของบริษัท เอซีเคไฮโดรฟาร์ม จำกัด (กลุ่มควบคุม).

Treatment 2 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : น้ำ อัตรา 486 : 1000.

Treatment 3 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : น้ำ อัตรา 507 : 1000.

Treatment 4 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : น้ำ อัตรา 528 : 1000.

ชุดการทดลองที่ 2

Treatment 1 : สารละลายการค้าของบริษัทเอซีเคไฮโดรฟาร์มจำกัด (กลุ่มควบคุม).

Treatment 2 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : สารละลายสูตรมาตรฐาน อัตรา 50 : 50.

Treatment 3 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : สารละลายสูตรมาตรฐาน อัตรา 75 : 25.

3.3.4.2 การปลูกผักกาดหอมในระบบ NFT

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) การเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการดำเนินงาน

เตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการดำเนินงาน ประกอบด้วยชุดสำหรับปลูกไฮโดรโพนิกชุดเล็กของบริษัท เอ ซี เคไฮโดรฟาร์ม จำกัด ขนาดกว้าง 0.8 x 1 เมตร มีทั้งหมด 18 หลุม. นำมาต่อชุดปลูกทดลอง แล้วจึงทำการทดสอบปั๊มน้ำและรอยรั่ว, ปรับพื้นที่สำหรับทำการปลูก, เดินสายไฟสำหรับปั๊มน้ำ, กางพลาสติกใสสำหรับป้องกันฝน แต่สามารถให้แสงผ่านได้.

2) ชนิดผักที่ปลูก คือ ผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก

การเพาะเมล็ดใช้เมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก ที่เป็นเมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการกระตุ้นความงอกและเคลือบด้วยแร่ดินเหนียว ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความงอกสูง (เมล็ดพันธุ์จากบริษัท เอ ซี เค จำกัด). โดยใช้วัสดุเพาะได้แก่ เพอร์ไลต์ (Perlite) ผสมกับเวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) ในอัตราส่วน 3 : 1 (วัสดุปลูกสำเร็จรูปจากบริษัท เอ ซี เคไฮโดรฟาร์ม จำกัด). ผสมให้เข้ากันแล้วนำใส่ถาดหลุมสำหรับเพาะ, หยอดเมล็ดพันธุ์ผักสลัด, รดน้ำให้ชุ่ม และเทน้ำเปล่าลงในถาดเพาะให้สูงประมาณ 1 เซนติเมตร. นำถาดเพาะไว้ในร่ม, รดน้ำให้ชุ่มทุกวัน. เมื่อครบ 3 วัน, ต้นกล้าจะเริ่มงอก. จากนั้น นำถาดเพาะไปวางในที่มีแสงรำไร, ให้ต้นกล้าได้รับแสง เพื่อป้องกันต้นกล้ายืดหาแสง. เมื่อครบ 1 สัปดาห์, ผสมธาตุอาหารการค้า (Stock A และ Stock B) ในอัตราส่วน 2 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร, เทลงในถาดเพาะ เพื่อเป็นอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นกล้า. เมื่อกล้าผักสลัดอายุ 15 วัน จะมีใบจริงประมาณ 3-5 ใบ, จึงทำการย้ายปลูกลงแปลงปลูก.

3) การย้ายต้นกล้า เมื่อต้นกล้าเจริญเติบโตจนแตกใบจริง 3-5 ใบแล้ว, จึงย้ายกล้าโดยตัดขอบของถาดหลุมให้ขาดออกจากกัน จะได้เป็นถ้วยเพาะที่มีต้นกล้า 1 ต้น. จากนั้น นำถ้วยเพาะนี้ไปใส่ในรางปลูกพืชระบบ NFT ที่ทำการปรับระดับน้ำทิ้งในสัดส่วนต่างๆ แล้ว. ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.0-7.0 โดยใช้กรดไนตริกเข้มข้น (เนื่องจากสารละลายธาตุอาหารพืชจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกร หลังทำการผสมตามสัดส่วนที่ต้องการแล้ว มีค่าพีเอชที่ค่อนข้างสูง ไม่เหมาะสำหรับการปลูกผักกาดหอมในระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT). จากนั้น ทำการบันทึกพีเอชและค่าสภาพการนำไฟฟ้าเป็นประจำ ทุกวัน จนสิ้นสุดการทดลอง.

การเตรียมสารละลายธาตุอาหารพืชของบริษัท เอ ซี เค ไฮโดรฟาร์มจำกัด จำนวน 2 สูตร, ผสมสารละลายธาตุอาหารตามคำแนะนำที่ได้รับจากบริษัทฯ คือ.

Stock A ใช้ธาตุอาหาร A ในอัตรา 3 มิลลิลิตรต่อน้ำเปล่า 1 ลิตร.

Stock B ใช้ธาตุอาหาร B ในอัตรา 3 มิลลิลิตรต่อน้ำเปล่า 1 ลิตร.

3.3.4.3 ศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอม ที่ปลูกในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิกโดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ. บันทึกการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเป็นประจำทุกๆ 7 วัน ตลอดอายุของผักกาดหอม (34 วัน), พารามิเตอร์ที่ศึกษา มีดังนี้:

1) ความกว้างใบ โดยใช้เวอร์เนียวัดค่าความกว้างใบเป็นเซนติเมตร. วัดที่ส่วนของใบล่างบริเวณที่กว้างที่สุดของใบนั้น, วัดจากขอบด้านซ้ายของใบไปจนถึงขอบด้านขวาของใบ และนับจำนวนใบ. เมื่อผักกาดหอมมีอายุ 7 วัน, จึงเริ่มทำการบันทึกการเจริญเติบโตทุกๆ 7 วัน.

2) ความกว้างทรงพุ่ม โดยใช้ไม้บรรทัดวัดค่าความกว้างของทรงพุ่มเป็นเซนติเมตร. วัดที่ส่วนของทรงพุ่มบริเวณที่กว้างที่สุดของทรงพุ่มนั้น, วัดจากขอบด้านซ้ายของทรงพุ่มไปจนถึงขอบด้านขวาของใบ. เมื่อผักกาดหอมมีอายุ 7 วัน, จึงเริ่มทำการบันทึกการเจริญเติบโตทุกๆ 7 วัน.

3) การวัดการเจริญเติบโตส่วนยอด โดยใช้ไม้บรรทัดวัดค่าการเจริญเติบโตส่วนยอดเป็นเซนติเมตร วัดที่ส่วนของโคนต้นจนถึงส่วนยอด เมื่อผักกาดหอมมีอายุ 7 วัน จึงเริ่มทำการบันทึกการเจริญเติบโต โดยจะบันทึกทุก ๆ 7 วัน

4) อัตราการเจริญเติบโต (Crop Growth Rate; CGR) (สุขศรี ม.ป.ป.) เป็นดัชนีบ่งบอกถึงอัตราการสะสมน้ำหนักของพืชต่อพื้นที่ดินต่อหนึ่งหน่วยเวลา. เมื่อผักกาดหอมมีอายุ 14 วัน, จึงเริ่มทำการบันทึกการเจริญเติบโต โดยจะบันทึกทุกๆ 7 วัน. คำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม โดยใช้สูตร.

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \times 1/P$$

เมื่อ CGR = อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/ตารางเมตร/วัน).

P = พื้นที่ดินที่พืชนั้นขึ้นอยู่ (Ground Area) (ตารางเมตร).

W_1 = น้ำหนักแห้งช่วงการเก็บเกี่ยวที่ 1 (Total Dry Weight at Harvest 1) (กรัม).

W_2 = น้ำหนักแห้งช่วงการเก็บเกี่ยวที่ 2 (Total Dry Weight at Harvest 2) (กรัม).

t_1 = เวลาการเก็บเกี่ยวที่ 1 (Time at Harvest 1) (วัน).

t_2 = เวลาการเก็บเกี่ยวที่ 2 (Time at Harvest 2) (วัน).

5) ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index ; LAI) เป็นค่าที่ใช้เป็นดัชนีบ่งบอกถึงปริมาณพื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ดินที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต (แซมเพชร ม.ป.ป.).

โดยใช้สูตร $$LAI = \frac{\text{พื้นที่ใบ (LA)}}{\text{พื้นที่ดินที่พืชนั้นขึ้นอยู่ (G)}}$$

การวัดพื้นที่ใบโดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ใบ Leaf Area Meter (เครื่อง Li – 3100 Leaf Area - ของบริษัท Lincoln, Nebraska, USA). โดยนำตัวอย่างใบพืชมาผ่านเครื่องวัดพื้นที่ใบ เมื่อผักกาดหอมมีอายุ 14 วัน, จึงเริ่มทำการบันทึกการเจริญเติบโต โดยจะบันทึกทุกๆ 7 วัน.

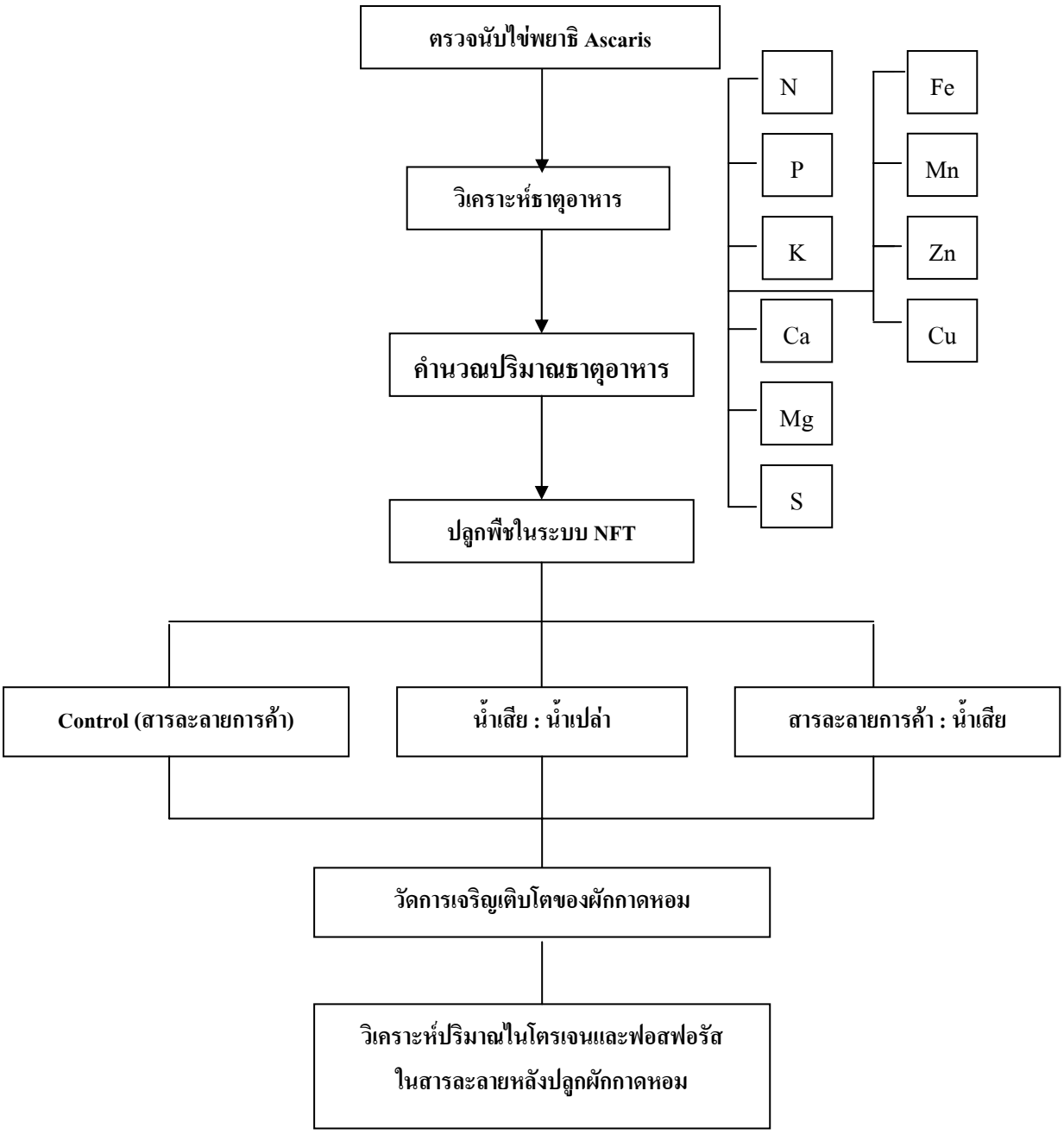
6) น้ำหนักสด บันทึกค่าน้ำหนักสดเมื่อผักกาดหอมอายุประมาณ 48 วัน. ทำการเก็บเกี่ยวโดยตัดเฉพาะส่วนของลำต้นและใบ, ชั่งน้ำหนักสดโดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง, มีหน่วยเป็นกรัม. เมื่อผักกาดหอมมีอายุ 14 วัน, จึงเริ่มทำการบันทึกการเจริญเติบโต โดยจะบันทึกทุกๆ 7 วัน.

7) น้ำหนักแห้ง บันทึกค่าน้ำหนักแห้งเมื่อผักกาดหอมอายุประมาณ 48 วัน. โดยนำผักกาดหอมที่ชั่งน้ำหนักสดแล้วมาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, จนกระทั่งแห้ง. นำใส่โถดูดความชื้น, นำตัวอย่างผักกาดหอมที่อบแห้งแล้วนำมาชั่ง โดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วนำตัวอย่างพืชไปอบ แล้วนำมาชั่งจนได้น้ำหนักแห้งที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง. น้ำหนักแห้งที่ได้มีหน่วยเป็นกรัม. เมื่อผักกาดหอมมีอายุ 14 วัน, จึงเริ่มทำการบันทึกการเจริญเติบโต โดยจะบันทึกทุกๆ 7 วัน.

3.4 การวิเคราะห์และการแปรผล

วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) จำนวน 2 ซ้ำ. นำข้อมูลการเจริญเติบโตของผักกาดหอมในสารละลายปริมาณทีเคเอ็นที่ความเข้มข้นต่างๆ มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Least Significant Difference (LSD) (จอกลอย 2535) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

3.5 แผนการวิจัย



4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก โดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกในรางปลูกแบบ Nutrient Film Technique (NFT) ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณทีเคเอ็นของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ต่างกัน, แบ่งการศึกษาเป็น 4 ส่วน, ได้แก่.

1. การตรวจนับไข่หนอนพยาธิ Ascaris ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ.
2. การศึกษาปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ.
3. การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอม ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณทีเคเอ็นที่แตกต่างกัน.
4. การบำบัดน้ำเสีย.

4.1 การตรวจนับไข่หนอนพยาธิ Ascaris

การตรวจนับไข่หนอนพยาธิไส้เดือนจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบัดแบบไม่ใช้อากาศ ก่อนการนำน้ำเสียมากรองด้วยถังกรองทราย, พบว่า ไข่หนอนพยาธิที่พบคือ ไข่หนอนพยาธิไส้เดือน *Ascaris suum* มีจำนวน 3 ฟอง/มล.ของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. ลักษณะของไข่พยาธิไส้เดือนที่พบจะมีเปลือกนอกจะเรียบ แสดงดังรูปที่ 3.

การนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศมาใช้ในการศึกษาเพื่อทดแทนสารละลายธาตุอาหารในการปลูกพืชไฮโดรโพนิกครั้งนี้, จะนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาผ่านการกรองด้วยถังกรองทรายก่อน เพื่อให้ได้สารละลายที่ใส, เมื่อทำการปลูกพืชแล้วไม่มีตะกอนไปจับกับรากพืช. ถังกรองทราย (Sand Filter) จะใช้ทรายหยาบไม่คัดขนาด, ได้มาจากการร่อนทรายด้วยมุ้งไนลอน ขนาด 0.1 x 0.1 เซนติเมตร เพื่อแยกกรวดขนาดเล็กออกก่อน. นำทรายหยาบที่ผ่านการร่อนแล้วนำมาใส่ถุงผ้าสปันบอนด์ ที่มีรูขนาดเล็กมาก, แต่น้ำสามารถไหลผ่านได้ดี, ผลิตด้วยใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์. ขนาดความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกรองคือ 30 เซนติเมตร และความลึก 30 เซนติเมตร, ต่อสายยางตรงก้นถังน้ำ เพื่อเป็นทางน้ำออกของน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว. จากนั้น ทำการกรองน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านถังกรองทรายแล้วนำไปตรวจนับไข่หนอนพยาธิไส้เดือน ซึ่งไม่พบไข่หนอนพยาธิ.

รูปที่ 3. ลักษณะของไข่พยาธิ *Ascaris suum* ที่พบในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศก่อนผ่านการกรองด้วยถังกรองทราย.

ในการนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศมากรองด้วยถังกรองทราย ก่อนนำไปปลูกพืช สามารถกรองไข่พยาธิไม่ให้ปนกับน้ำในสารละลายปลูกพืชได้. กรณีที่ ผู้บริโภคยังไม่มั่นใจเรื่องไข่พยาธิไส้เดือน อาจนำผักกาดหอมแช่ในน้ำประปาเป็นเวลา 15 นาที จะสามารถล้างไข่พยาธิได้ (ปั้นดีและคณะ 2548).

4.2 การศึกษาปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ จะทำการวิเคราะห์ในส่วนของธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง. ก่อนทำการวิเคราะห์ จะนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาทำการกรองด้วยถังกรองทรายก่อน. ผลการศึกษา มีดังนี้.

4.2.1 ธาตุอาหารหลัก

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและพืชมีความต้องการในปริมาณมาก มีทั้งหมด 6 ธาตุ, ได้แก่ ไนโตรเจน, โพแทสเซียม, ฟอสฟอรัส, แคลเซียม, แมกนีเซียม และกำมะถัน. วิเคราะห์ธาตุอาหารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ที่ผ่านการกรองด้วยถังกรองทราย ซึ่งใช้เป็นส่วนผสมของสารละลายธาตุอาหารในการทดลอง. ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 17, เปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จากผลการศึกษาของ Snow and Ghaly (2008) และเอื้องสวัสดิ์ (2542).

ตารางที่ 17. ปริมาณของธาตุอาหารหลักในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ และเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารหลักในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ลำดับที่	ธาตุอาหาร	ปริมาณ		
		น้ำเสียฟาร์มสุกร (มก./ล.)	น้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ* (มก./ล.)	น้ำเสียฟาร์มสุกร** (มก./ล.)
1	ไนโตรเจน (รูป TKN)	473.05	-	340.08
2	ไนโตรเจน (รูป NO_3^-)	67.58	21.64 ± 0.6	0.066
3	โพแทสเซียม (K)	753.04	74.67± 0.32	550.00
4	ฟอสฟอรัส (รูป TP)	9.62	6.30	34.21
5	แคลเซียม (Ca)	46.37	59.90 ± 0.95	35.40
6	แมกนีเซียม (Mg)	42.18	5.06 ± 0.07	17.50
7	กำมะถัน (S)	-	6.97 ± 0.12	-

ที่มา : * Snow and Ghaly (2008), ** เอื้องสวัสดิ์ (2542).

4.2.2 ธาตุอาหารรอง

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชแต่พืชต้องการในปริมาณน้อย, ได้แก่ เหล็ก, แมงกานีส, สังกะสี, ทองแดง. วิเคราะห์ธาตุอาหารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่ผ่านการกรองด้วยถังกรองทราย ซึ่งใช้เป็นส่วนผสมของสารละลายธาตุอาหารในการทดลอง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 18. เปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารรองในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จากผลการศึกษาของ Snow and Ghaly (2008) และการศึกษาของเอื้องสวัสดิ์ (2542).

ตารางที่ 18. ปริมาณของธาตุอาหารรองในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศและเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารหลักในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ลำดับที่	ธาตุอาหาร	ปริมาณ		
		น้ำเสียฟาร์มสุกร (มก./ล.)	น้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ* (มก./ล.)	น้ำเสียฟาร์มสุกร (มก./ล.) **
1	เหล็ก (Fe)	0.68	0.03 ± 0.01	-
2	แมงกานีส (Mn)	0.50	0.20	-
3	สังกะสี (Zn)	0.08	0.20	-
4	ทองแดง (Cu)	0.14	0.06	-

ที่มา : * Snow and Ghaly (2008), ** เอื้องสวัสดิ์ (2542).

ผลการคำนวณปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองในสารธาตุอาหาร.

การทดลองชุดที่ 1 เมื่อนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่ผ่านถังกรองทรายแล้ว, นำมาผสมสารละลายตามสัดส่วนที่ต้องการศึกษาแล้ว, สามารถคำนวณปริมาณของธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองในสารละลาย แสดงดังตารางที่ 19 และตารางที่ 20. สำหรับการชุดการทดลองที่ 2, สามารถคำนวณปริมาณของธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองในสารละลาย แสดงดังตารางที่ 21 และตารางที่ 22.

ตารางที่ 19. ปริมาณธาตุอาหารหลักในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1)

ลำดับที่	ธาตุอาหาร	ปริมาณ (มก./ล.)			
		กลุ่มทดลองที่ 1	กลุ่มทดลองที่ 2	กลุ่มทดลองที่ 3	กลุ่มทดลองที่ 4
1	ไนโตรเจน (รูป TKN)	7.06	230	240	250
2	โพแทสเซียม (K)	202.60	366	381	397.61
3	ฟอสฟอรัส (รูป TP)	21.93	4.68	4.88	5.08
4	แคลเซียม (Ca)	-	22.54	23.51	24.48
5	แมกนีเซียม (Mg)	25.01	20.00	21.39	22.27
6	กำมะถัน (S)	-	-	-	-

ตารางที่ 20. ปริมาณธาตุอาหารรองในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1)

ลำดับที่	ธาตุอาหาร	ปริมาณ (มก./ล.)			
		กลุ่มทดลองที่ 1	กลุ่มทดลองที่ 2	กลุ่มทดลองที่ 3	กลุ่มทดลองที่ 4
1	เหล็ก (Fe)	1.29	0.33	0.34	0.36
2	แมงกานีส (Mn)	0.55	0.24	0.25	0.26
3	สังกะสี (Zn)	0.27	0.04	0.04	0.04
4	ทองแดง (Cu)	<0.0034	0.07	0.07	0.07

ตารางที่ 21. ปริมาณธาตุอาหารหลักในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2) (comment 16)

ลำดับที่	ธาตุอาหาร	ปริมาณ (มก./ล.)		
		กลุ่มทดลองที่ 1	กลุ่มทดลองที่ 5	กลุ่มทดลองที่ 6
1	ไนโตรเจน (รูป TKN)	7.06	123.53	181.77
2	โพแทสเซียม (K)	202.60	291.80	336.40
3	ฟอสฟอรัส (รูป TP)	21.93	13.41	9.14
4	แคลเซียม (Ca)	-	11.76	17.63
5	แมกนีเซียม (Mg)	25.01	23.20	22.30
6	กำมะถัน (S)	-	-	-

ตารางที่ 22. ปริมาณธาตุอาหารรองในสารละลายธาตุอาหารสำหรับการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2) (comment 16)

ลำดับที่	ธาตุอาหาร	ปริมาณ (มก./ล.)		
		กลุ่มทดลองที่ 1	กลุ่มทดลองที่ 5	กลุ่มทดลองที่ 6
1	เหล็ก (Fe)	1.29	0.82	0.58
2	แมงกานีส (Mn)	0.55	0.40	0.33
3	สังกะสี (Zn)	0.27	0.16	0.10
4	ทองแดง (Cu)	<0.0034	0.02	0.05

4.3 การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

4.3.1 การทดลองชุดที่ 1

ศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณทีเคเอ็นในน้ำเสียแตกต่างกัน, เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้า.

ชุดการทดลองที่ 1

Treatment 1 : สารละลายการค้าของบริษัทเอซีเคไฮโดรฟาร์มจำกัด (กลุ่มควบคุม).

Treatment 2 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : น้ำ อัตรา 486 : 1000 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.).

Treatment 3 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : น้ำ อัตรา 507 : 1000 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.).

Treatment 4 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : น้ำ อัตรา 528 : 1000 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.).

โดยผลการศึกษามีดังนี้:

4.3.1.1 จำนวนใบ

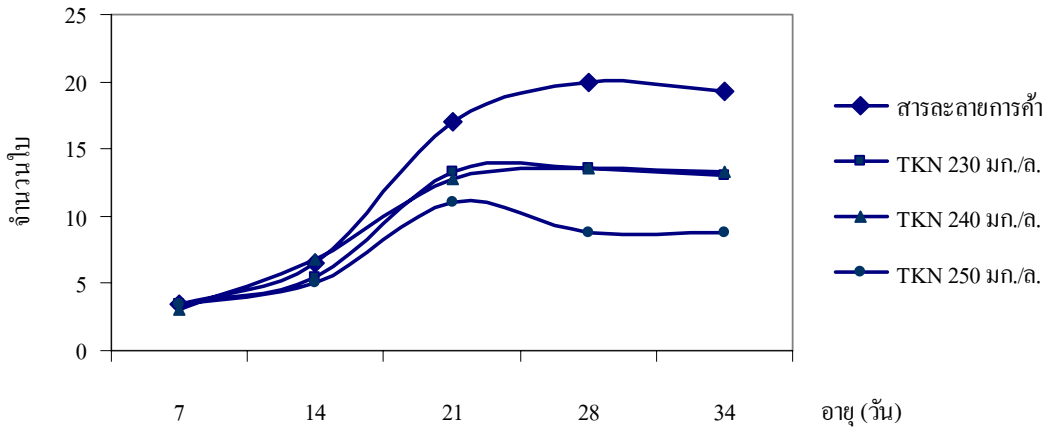
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อจำนวนใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก เปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้าหลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกได้ 7 วัน เมื่อนับจำนวนใบ, พบว่า จำนวนใบไม่มีความแตกต่างกัน. แต่เมื่ออายุ 14 วัน, เริ่มมีความแตกต่างกันและแตกต่างกันเพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้น. โดยเมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34 วัน, ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีจำนวนใบมากกว่าผักกาดหอมที่ปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นระดับต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, โดยมีจำนวนใบเฉลี่ยมากที่สุด 19.25 ใบ, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็น 240, 230 และ 250 มก./ล. มีจำนวนใบเฉลี่ย 13.25, 13 และ 8.25 ใบ, ตามลำดับ. จำนวนใบจะมากที่สุด เมื่อผักกาดหอมอายุ 4 สัปดาห์, (ตารางที่ 23 และรูปที่ 4).

ตารางที่ 23. จำนวนใบของผักกาดหอมเมื่ออายุต่าง ๆ (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	3.50[a]	6.50[a]	17.00[a]	20.00[a]	19.25[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	3.50[a]	5.50[ab]	13.25[b]	13.50[b]	13.00[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	3.00[a]	6.75[a]	12.75[bc]	13.50[b]	13.25[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	3.50[a]	5.00[b]	11.00[c]	8.75[c]	8.75[c]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	16.06	14.13	8.67	7.97	8.58

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ



รูปที่ 4. จำนวนใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.2 ความกว้างทรงพุ่ม

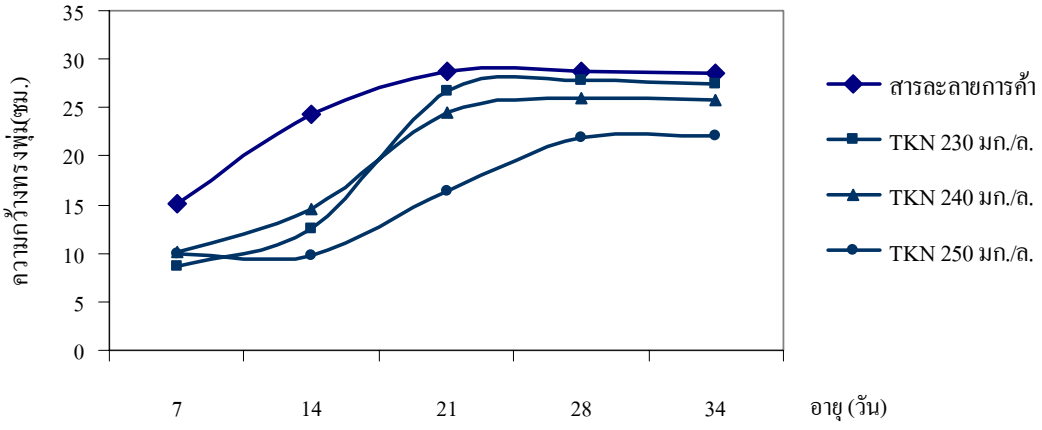
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก เปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, พบว่า เมื่อย้ายผักกาดหอมลงในรางปลูกได้อายุ 34 วัน, ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีความกว้างทรงพุ่มมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นระดับต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, โดยมีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ยมากที่สุด 28.50 เซนติเมตร, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรปริมาณทีเคเอ็น 230, 240 และ 250 มก./ล. มีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย 27.53, 25.80 และ 22.05 เซนติเมตร, ตามลำดับ. โดยความกว้างทรงพุ่มจะมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 4 สัปดาห์, (ดังตารางที่ 24 และรูปที่ 5).

ตารางที่ 24. ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	15.13[a]	24.25[a]	28.75[a]	28.70[a]	28.50[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	8.75[b]	12.58[c]	26.75[s]	27.75[a]	27.53[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	10.13[b]	14.50[b]	24.58[c]	26.03[b]	25.80[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	10.00[b]	9.68[d]	16.35[d]	21.88[c]	22.05[c]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	16.25	7.57	4.96	2.37	2.84

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของความกว้างทรงพุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 5. ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.3 การเจริญเติบโตส่วนยอด (Shoot Growth)

การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อการเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก เปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, พบว่า เมื่อทำการวัดการเจริญเติบโตส่วนยอดผักกาดหอมที่อายุ 7, 14 และ 24 วัน, การเจริญเติบโตส่วนยอดมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. แต่เมื่อผักกาดหอมอายุ 34 วัน, ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีการเจริญเติบโตส่วนยอดใกล้เคียงการปลูก

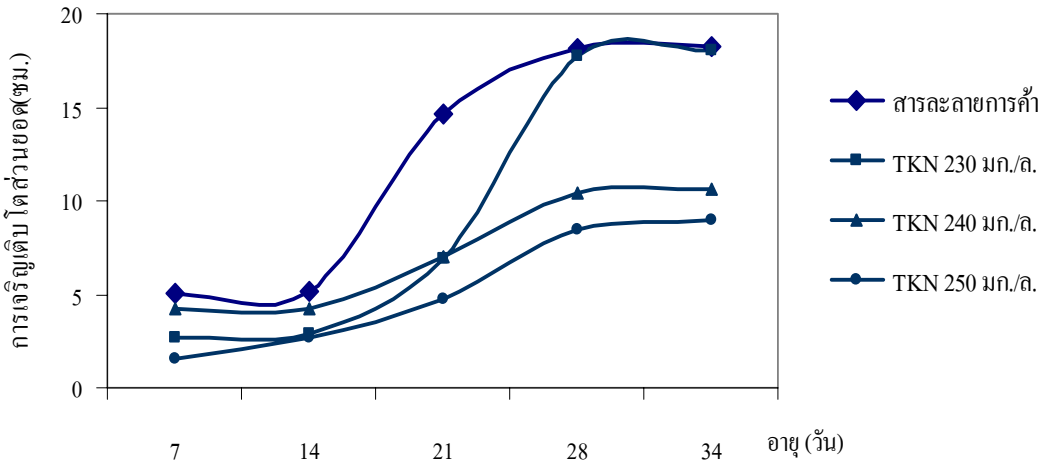
ผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็น 230 มก./ล. แต่แตกต่างกับการปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นทีเคเอ็นระดับต่างๆ. โดยมีการเจริญเติบโตส่วนยอดเฉลี่ยมากที่สุด 18.25 เซนติเมตร, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็น 230, 240 และ 250 มก./ล. มีการเจริญเติบโตส่วนยอดเฉลี่ย 18.00, 10.63 และ 9.00 เซนติเมตร, ตามลำดับ. โดยการเจริญเติบโตส่วนยอดจะมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์, (ดังตารางที่ 25 และรูปที่ 6)

ตารางที่ 25. การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	5.05[a]	5.15[a]	14.60[a]	18.10[a]	18.25[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	2.65[c]	2.85[c]	6.90[b]	17.75[a]	18.00[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	4.22[b]	4.23[b]	7.03[b]	10.38[b]	10.63[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	1.53[d]	2.68[c]	4.75[c]	8.50[b]	9.00[b]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	14.69	14.47	6.30	13.70	12.63

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 6. การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.4 ความกว้างใบ

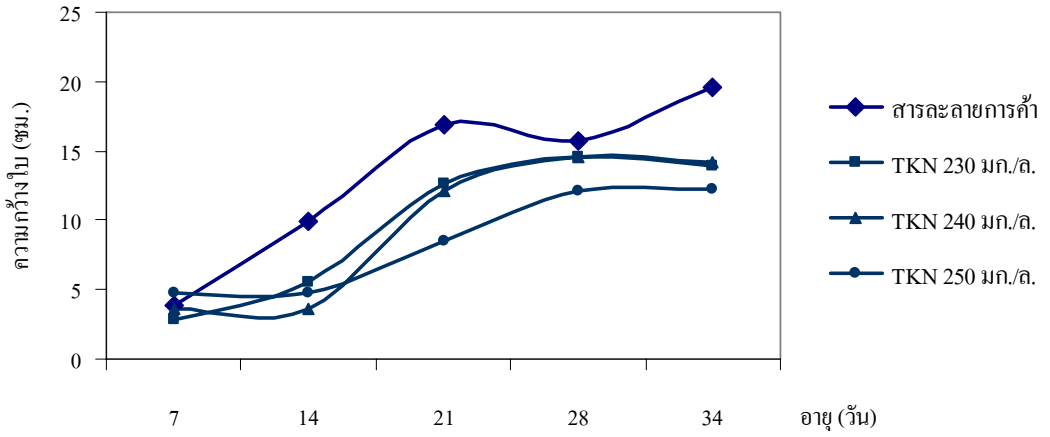
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อความกว้างใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก เปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, พบว่า ความกว้างใบของผักกาดหอมมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. โดยผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีความกว้างใบเฉลี่ยมากที่สุด 19.62 เซนติเมตร, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็น 240, 230 และ 250 มก./ล. มีความกว้างใบเฉลี่ย 14.23, 13.92 และ 12.23 เซนติเมตร, ตามลำดับ. ความกว้างใบจะมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 26 และรูปที่ 7).

ตารางที่ 26. ความกว้างใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	3.84[b]	9.89[a]	16.82[a]	15.71[a]	19.62[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	2.80[c]	5.60[c]	12.68[b]	14.54[a]	13.92[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	3.58[b]	3.58[b]	12.05[b]	14.58[a]	14.23[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	4.82[a]	4.82[d]	8.52[c]	12.13[b]	12.23[c]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	8.27	7.53	8.80	7.48	5.03

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 7. ความกว้างใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.5 น้ำหนักสด

การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อน้ำหนักสดของผักกาดหอม บันทึกน้ำหนักสดของผักกาดหอมทุกอายุ 2, 3, 4 และ 5 สัปดาห์, พบว่า น้ำหนักสดของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมอายุ 34 วัน, ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีน้ำหนักสดมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นระดับต่างๆ. โดยมีน้ำหนักสดเฉลี่ย 95.00 กรัม, รองลงมาคือ การปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นทีเคเอ็นที่ระดับต่าง ๆ ได้แก่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็น 240, 230 และ 250 มก./ล. มีน้ำหนักสดเฉลี่ย 38.64, 35.21 และ 20.7 กรัม, ตามลำดับ. น้ำหนักสดของผักกาดหอมจะมากที่สุด เมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 27 และรูปที่ 8). สอดคล้องกับการศึกษาของ Rababah and Ashbolt (2000) ซึ่งประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนขั้นต้น, พบว่า พืชที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร (กลุ่มควบคุม) มีการเจริญเติบโตดีที่สุด.

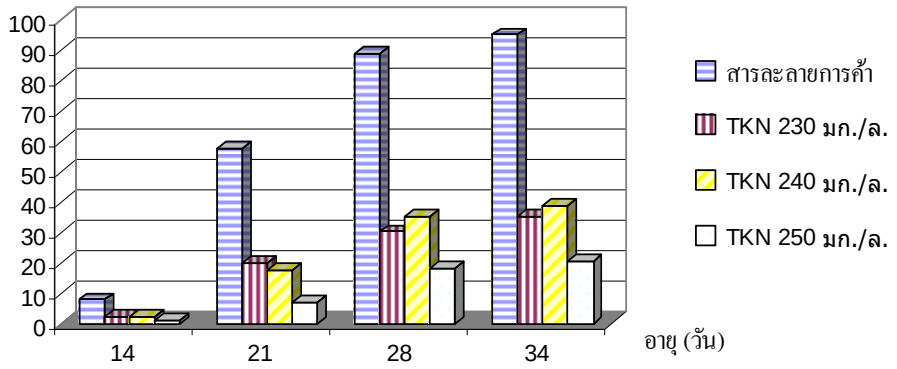
ในส่วนของผักสลัดที่ปลูกในน้ำเสียชุมชน พบว่า ที่น้ำเสียชุมชนต่อน้ำเปล่าที่อัตรา 1:1 มีการเจริญเติบโตสูงสุด, รองลงมา ได้แก่ ผักสลัดที่ปลูกในน้ำเสียชุมชนอย่างเดียว. การศึกษาของหิรัญ (2550) ศึกษาการใช้น้ำเสียจากโรงฆ่าสุกรมาใช้เป็นสารละลายธาตุอาหารพืชในการปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ก ในระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT และ DFT, พบว่า พืชที่ปลูกในสารละลายการค้ามีการเจริญเติบโตดีที่สุด. ผลการศึกษานี้แตกต่างกับผลการศึกษาของ Lennard and Leonard (2004), ซึ่งผักกาดหอมสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสารละลายธาตุอาหารจากน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา, ทำให้น้ำหนักสดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก คือ 129.98±2.65 กรัม/ต้น หลังปลูกได้ 21 วัน และแตกต่างกับการศึกษาของ Lennard and Leonard (2006) ใช้น้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเป็นสารละลายธาตุอาหารปลูกผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก ในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT, ที่หลังปลูกอายุ 21 วัน, ผักกาดหอมสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด คือ น้ำหนักสดเฉลี่ย 131.97±6.46, 116.91±3.24 และ 107.95±2.20 กรัม/ต้น, ตามลำดับ, ซึ่งการเจริญเติบโตมากกว่าสารละลายการค้าบริษัท เอ ซี เค ไฮโดรฟาร์ม จำกัด ที่ใช้เป็นกลุ่มควบคุมในการทดลองครั้งนี้.

ตารางที่ 27. น้ำหนักสดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (กรัม) (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	7.83[a]	57.6[a]	89.01[a]	95.00[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	2.32[b]	19.93[b]	30.21[bc]	35.21[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	2.28[b]	17.66[bc]	35.11[b]	38.64[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	0.98[c]	6.98[c]	18.34[c]	20.7[c]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	10.69	14.63	10.44	2.31

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 8. น้ำหนักสดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.5 น้ำหนักแห้ง

การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อน้ำหนักแห้งของผักกาดหอม บันทึกน้ำหนักแห้งของผักกาดหอมทุกอายุ 2, 3, 4 และ 5 สัปดาห์, พบว่า น้ำหนักแห้งของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. โดยเมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมอายุ 34 วัน, ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีน้ำหนักแห้งมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นระดับต่างๆ. โดยมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 15.27 กรัม, รองลงมา คือ การปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเค

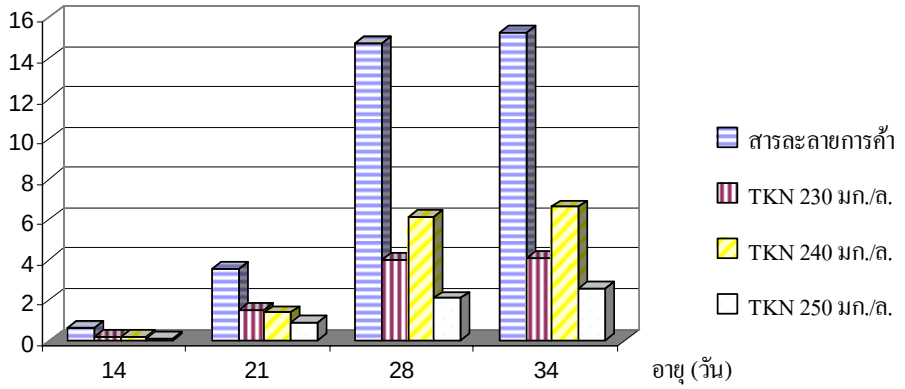
เอ็นที่ระดับต่างๆ, ได้แก่ 240, 230 และ 250 มก./ล. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 6.63, 4.13 และ 2.57 กรัม, ตามลำดับ. น้ำหนักสดของผักกาดหอมจะมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 28 และรูปที่ 9).

ตารางที่ 28. น้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์) [1/]			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	0.67[a]	3.54[a]	14.73[a]	15.27[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	0.21[b]	1.56[b]	3.99[b]	4.13[c]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	0.21[b]	1.39[bc]	6.15[b]	6.63[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	0.10[b]	0.94[c]	2.11[b]	2.57[d]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	25.17	14.20	30.45	2.73

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 9. น้ำหนักแห้งของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.6 พื้นที่ใบ

การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อพื้นที่ใบของผักกาดหอม บันทึกพื้นที่ใบของผักกาดหอมทุกอายุ 2, 3, 4 และ 5 สัปดาห์, พบว่าพื้นที่ใบของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. โดยเมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมเมื่ออายุ

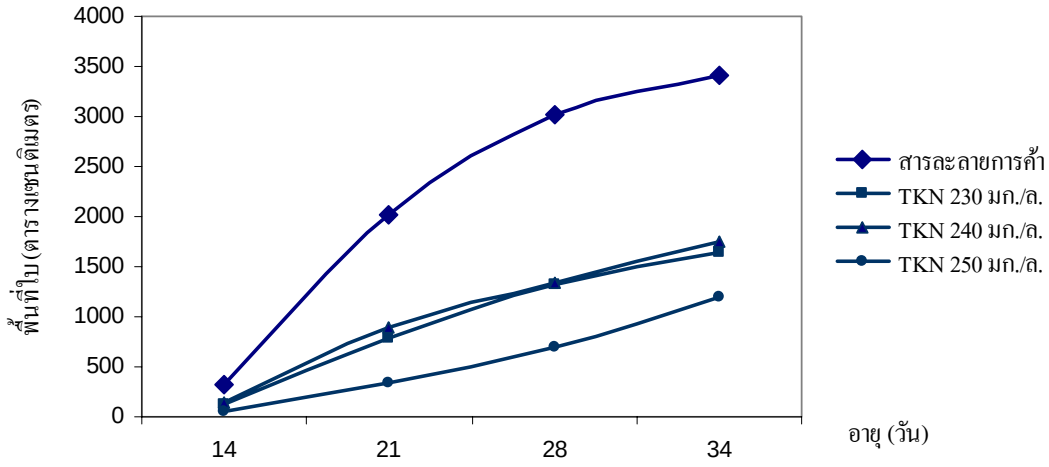
34 วัน, ทำให้ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีพื้นที่ใบมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นระดับต่างๆ. โดยมีพื้นที่ใบเฉลี่ย 3411.5 ตารางเซนติเมตร, รองลงมา คือ การปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นที่ระดับต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็น 240, 230 และ 250 มก./ล. มีพื้นที่ใบเฉลี่ย 1,754.5, 1,641.5 และ 1,196.5 ตารางเซนติเมตร, ตามลำดับ. โดยพื้นที่ใบของผักกาดหอมจะมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 29 และรูปที่ 10).

ตารางที่ 29. พื้นที่ใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (ตารางเซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	329.50[a]	2018.50[a]	3014.50[a]	3411.50[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	131.50[bc]	781.00[bc]	1321.50[b]	1641.50[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	142.50[b]	884.00[b]	1331.50[b]	1754.50[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	61.50[c]	334.00[c]	696.50[c]	1196.50[c]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	14.59	15.01	7.17	3.62

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 10. พื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.7 ดัชนีพื้นที่ใบ

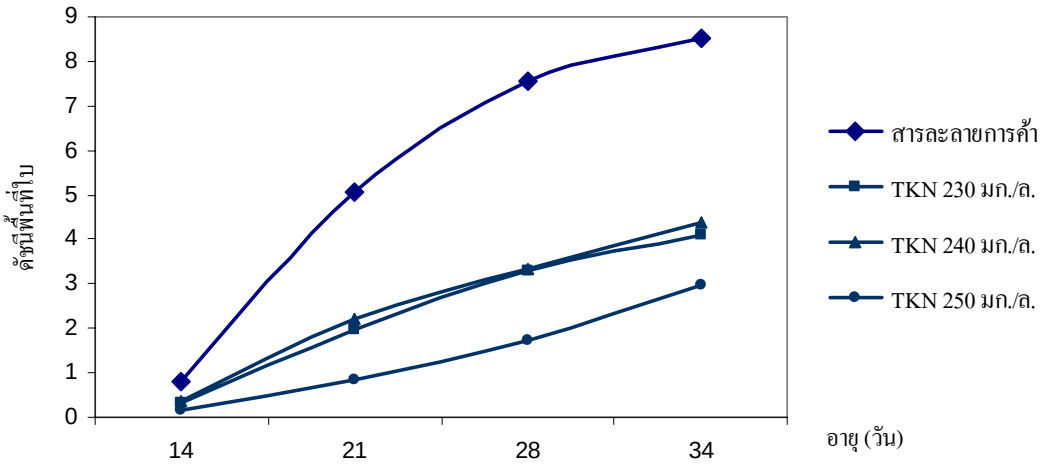
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอม บันทึกดัชนีพื้นที่ใบผักกาดหอมทุกอายุ 2, 3, 4 และ 5 สัปดาห์, พบว่า ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมอายุ 34 วัน, ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีดัชนีพื้นที่ใบมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นระดับต่างๆ. โดยมีดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ย 8.53, รองลงมา คือ การปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นที่ระดับต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็น 240, 230 และ 250 มก./ล. มีดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ย 4.39, 4.10 และ 2.99, ตามลำดับ. ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอมจะมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 30 และรูปที่ 11).

ตารางที่ 30. ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอมพันธุ์โอ๊ก (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์) [1/]			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	0.82[a]	5.05[a]	7.54[a]	8.53[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	0.33[bc]	1.95[bc]	3.3[b]	4.1[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	0.36[b]	2.21[b]	3.33[b]	4.39[b]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	0.15[c]	0.84[c]	1.74[c]	2.99[c]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	14.40	15.04	7.14	3.69

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 11. ดัชนีพื้นที่ใบ (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.1.7 อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก

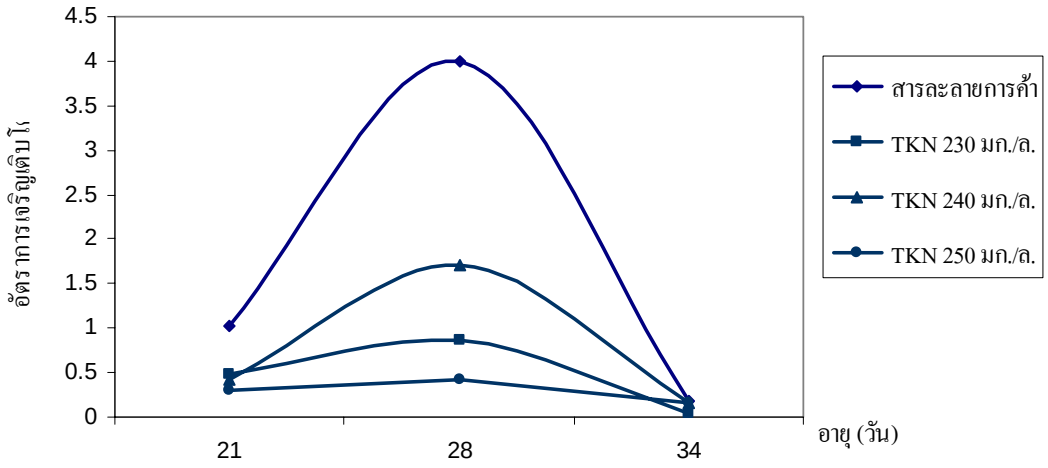
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม บันทึกอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมทุกอายุ 2, 3, 4 และ 5 สัปดาห์, พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. โดยเมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมอายุ 34 วัน, ทำให้ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีอัตราการเจริญเติบโตมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นระดับต่างๆ. โดยมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย 0.19, รองลงมา คือ การปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นที่ระดับต่างๆ ได้แก่ ปริมาณทีเคเอ็น 240, 250 และ 230 มก./ล. มีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย 0.17, 0.16 และ 0.05, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 31 และรูปที่ 12).

ตารางที่ 31. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์) [1/]		
	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	1.03[a]	4.00[a]	0.19[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	0.48[b]	0.87[b]	0.05[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	0.42[b]	1.70[b]	0.17[a]
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	0.30[b]	0.42[b]	0.16[a]
LSD	0.05	0.05	0.05
C.V.	22.44	26.43	24.38

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05 จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 12. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.2 การบำบัดน้ำเสีย

ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของผักกาดหอมที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโพนิกในรางปลูกแบบ NFT, โดยใช้สารละลายธาตุอาหารจากน้ำเสียฟาร์มสุกรเปรียบเทียบกับสารละลายการค้า, ทำการศึกษาทุก 7 วัน (ทำการเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหาร). โดยมีกลุ่มการทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 สารละลายการค้า, การทดลองที่ 2 ทีเคเอ็น 230 มก./ล., การทดลองที่ 3 ทีเคเอ็น 240 มก./ล., การทดลองที่ 4 ทีเคเอ็น 250 มก./ล., สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้.

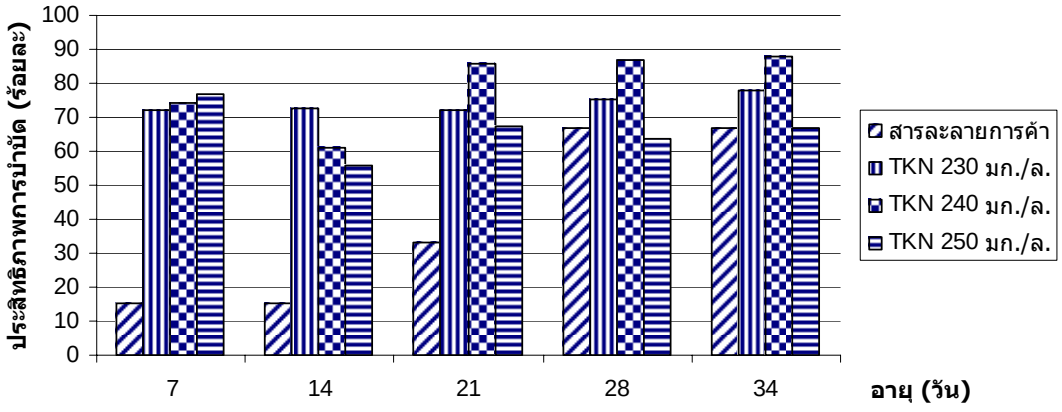
4.3.2.1 ค่าทีเคเอ็น (ทีเคเอ็น)

การศึกษาการบำบัดค่าทีเคเอ็น พบว่า ค่าทีเคเอ็นน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 มีค่าทีเคเอ็น 3.36 มก./ล., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 230–234.2 มก./ล., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 240–251.01 มก./ล., การทดลองที่ 4 อยู่ในช่วง 250–256.61 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็นสูงสุดคือ การทดลองที่ 3 ปริมาณทีเคเอ็น 240 มก./ล., รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 ปริมาณทีเคเอ็น 230 มก./ล., การทดลองที่ 1 ปลูกด้วยสารละลายการค้า, และการทดลองที่ 4 ปริมาณทีเคเอ็น 250 มก./ล. ที่ประสิทธิภาพร้อยละ 87.95, 77.79, 66.67 และ 66.60, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 32 และรูปที่ 13).

ตารางที่ 32. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	15.48	15.48	33.33	66.67	66.67
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	71.90	72.48	72.01	75.12	77.79
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	74.30	61.09	85.84	86.83	87.95
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	77.02	55.65	67.47	63.75	66.60



รูปที่ 13. ประสิทธิภาพในการกำจัดทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 1).

การบำบัดค่าทีเคเอ็นในการทดลองครั้งนี้ เกิดจากการ uptake ไปใช้ของพืชในรูปของ NH_4^+ และ NO_3^-. นอกจากกระบวนการดูดซึมไนโตรเจนโดยพืชแล้ว ไนโตรเจนในสารละลายไม่สามารถหายไปหรือลดลงด้วยกระบวนการอื่นได้ เนื่องจากในถังสารละลายจะมีค่าดีโอสูง. ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยกลุ่มแบคทีเรียไนตริฟายอิง (nitrifying bacteria) จะออกซิไดส์แอมโมเนียให้เป็นไนไทรต์และไนเทรต, ตามลำดับ และอยู่ในสภาวะที่มีการเติมออกซิเจน (aerobic). จากนั้นจะมีกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) โดยการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง, ไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกลดรูปให้เป็นก๊าซไนโตรเจน โดยอยู่สภาวะแอนอกซิก (anoxic) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2551). แม้กระบวนการไนตริฟิเคชันสามารถเกิดได้ แต่กระบวนการดีไนตริฟิเคชันไม่สามารถเกิดได้ เนื่องจากในระบบไฮโดรโพนิกไม่มีสภาวะแอ-นอกซิก.

กลไกการการ uptake ไนโตรเจนของพืช (ธีระกุลพิศุทธิ์ 2540), พืชจะ uptake ในรูปของอนุมูลของ NH_4^+ และ NO_3^-, ซึ่งเมื่อพืชดูด NH_4^+ เข้าไปในราก, NH_4^+ สามารถที่จะเปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์ของไนโตรเจน (Organic Nitrogen Compound) ได้ทันที โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรีดักชันเสียก่อน. ต่างกับเมื่อพืชดูด NO_3^- เข้าไปในต้นพืช, NO_3^- จะต้องผ่านกระบวนการรีดักชันก่อน จึงจะสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้.

การรีดักชันของไนเทรต (NO_3^- reduction), รากจะดูด NO_3^- เข้าไป, จากนั้น กระบวนการรีดักชันจะเกิดขึ้น 3 แห่งในต้นพืช ได้แก่ ราก, ใบ และเกิดขึ้นที่รากและใบ, ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพืช. เอนไซม์ที่ใช้ในการรีดิวซ์อนุมูลของ NO_3^- มี 2 ชนิด ที่ทำงานต่อเนื่องกัน คือ.

- Nitrate Reductase ตำแหน่งของเอนไซม์ในเซลล์ Nitrate Reductase อยู่ที่ cytoplasm ของเซลล์ ไม่ว่าอนุมูลของไนเทรตจะถูกรีดิวซ์ที่ส่วนใดของของพืชก็ตาม.
- Nitrite Reductase ตำแหน่งของเอนไซม์ในเซลล์ Nitrite Reductase จะอยู่ที่ Chloroplast ในกรณีที่มีการรีดิวซ์อนุมูลไนเทรตที่ใบ และตำแหน่งของเอนไซม์ในเซลล์ Nitrite Reductase จะอยู่ที่ Plastid ในกรณีที่มีการรีดิวซ์อนุมูลไนเทรต.

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็นในการทดลองนี้ สอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน ดังนี้. Rababah and Ashbolt (2000) ประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT ปลูกผักสลัดเพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชนขั้นต้น, พบว่า หลังทำการปลูกพืชในระบบไฮโดรโพนิกครบ 7 วัน (1

รอบการเปลี่ยนน้ำสารละลาย) มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าทีเคเอ็นได้ร้อยละ 80. การศึกษาของ Shalaby *et al.* (2008) ทดลองใช้ระบบไฮโดรโพนิกชั้นกรวดในการบำบัดน้ำเสียจากสิ่งปฏิกูล ซึ่งสามารถบำบัดไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียได้ร้อยละ 99.4. การศึกษาของ Snow and Ghaly (2008) ใช้ข้าวบาร์เลย์ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบไฮโดรโพนิก สามารถบำบัดไนโตรเจนในรูปของ NH_4^+ NO_2^- และ NO_3^- - N ได้ร้อยละ 76.0 – 76.6, 97.6 – 99.2 และ 76.9 – 81.5, ตามลำดับ. การศึกษาของ Snow and Ghaly (2008) ซึ่งใช้พืชน้ำ ได้แก่ ผักตบชวา, จอกแหน และสาหร่ายหางกระรอก, ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบไฮโดรโพนิก, พบว่า ที่ HRT 12 วัน ผักตบชวาสามารถบำบัดไนโตรเจนในรูปของ NH_4^+-N, NO_2^--N และ NO_3^--N ได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 76.0, 90.6 และ 54.4, ตามลำดับ. การศึกษาของ Lennard and Leonard (2004) เปรียบเทียบการไหลของน้ำแบบไหลกลับไปกลับมาและแบบไหลต่อเนื่องในระบบไฮโดรโพนิกแบบผสมผสานกับแบบชั้นกรวด โดยใช้สารละลายธาตุอาหารจากน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา, พบว่า ค่าไนโตรเจนในรูปไนเตรตหลังการปลูกผักกาดหอมในระบบการไหลของน้ำแบบไหลกลับไปกลับมาอยู่ที่ 13.30±2.05 มก./ล. และแบบแบบไหลต่อเนื่อง 11.80±1.78 มก./ล. และการศึกษาของ Lennard and Leonard (2006) ใช้น้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเป็นสารละลายธาตุอาหาร. ผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก หลังปลูกอายุ 21 วัน ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าไนโตรเจนในรูปไนเทรตที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT คือ ร้อยละ 90.9, 93.2 และ 71.8, ตามลำดับ.

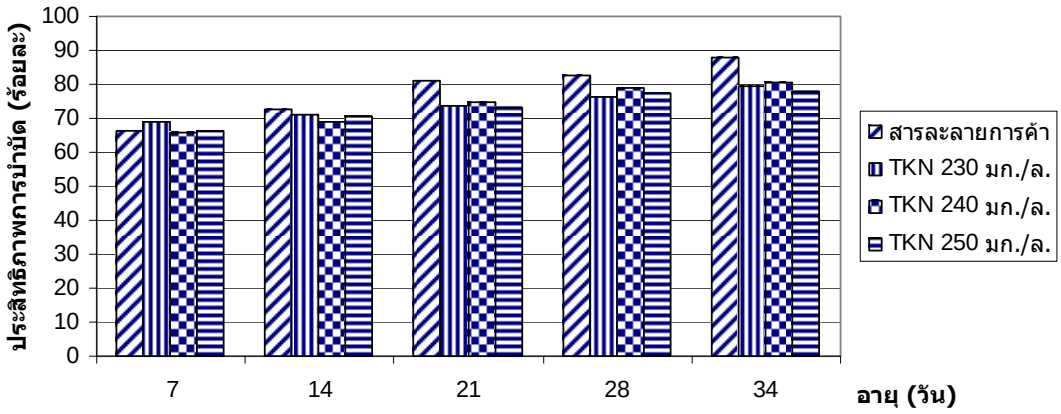
4.3.2.2 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

การศึกษาการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด พบว่า ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 17.04 – 18.07 มก./ล., การทดลองที่ 2 (ค่าทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 3.31 – 4.08 มก./ล., การทดลองที่ 3 (ค่าทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 3.41 – 4.12 มก./ล., การทดลองที่ 4 (ค่าทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 3.56 – 4.15 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงสุด คือ การทดลองที่ 1,รองลงมาคือการทดลองที่ 3, 2 และ 4, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ร้อยละ 88.13, 80.73, 79.52 และ 77.72 (ดังตารางที่ 33 และรูปที่ 14).

ตารางที่ 33. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	66.20	72.73	81.02	82.44	88.13
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	68.88	70.86	73.53	76.52	79.52
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	65.69	69.15	74.76	78.93	80.73
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	66.57	70.37	73.01	77.54	77.72



รูปที่ 14. ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1).

การบำบัดค่าฟอสฟอรัส ในการทดลองครั้งนี้ เกิดจากการ uptake ไปใช้ของพืช. นอกจากกระบวนการโดยกระบวนการดูดซึมโดยพืชแล้ว ค่าฟอสฟอรัสในสารละลายไม่สามารถหายไปหรือลดลงด้วยกระบวนการอื่นได้ เนื่องจากในถังสารละลายจะมีค่าดีโอสูง. กระบวนการจับใช้ฟอสฟอรัสแบบฟุ่มเฟือย (luxury phosphorus uptake) โดยแบคทีเรียชนิดพิเศษที่สามารถจับฟอสฟอรัสได้มากกว่าปริมาณที่เซลล์ต้องการ, โดยจับได้ร้อยละ 4–12. กระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่อาศัยปฏิกิริยาการใช้แบบฟุ่มเฟือย ได้แก่ กระบวนการโฟรีดอกซ์ จะต้องมีถังแอโรบิก, กระบวนการฟอสทริป (Phostrip) จะต้องมีกระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการเอสบีอาร์ (Sequencing Bath Reactor, SBR) จะต้องมีถังไร้ออกซิเจน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551). ทำให้ระบบไฮโดรโพนิกไม่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการแบบฟุ่มเฟือยได้ เนื่องจากในระบบไฮโดรโพนิกมีการไหลเวียนของสารละลายอยู่ตลอดเวลาและไม่มีสภาวะแอนอกซิก.

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสในการทดลองนี้ สอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านดังนี้ Snow and Ghaly (2008a, b) ; Lennard and Leonard (2004, 2006) ; Rababah and Ashbolt (2000) และ Adler *et al.* (2003).

4.3.2.3 ค่าซีโอดี (COD)

การศึกษาการบำบัดค่าซีโอดี ค่าซีโอดีของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 37.5 – 40 มก./ล., การทดลองที่ 2 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 150 – 160 มก./ล., การทดลองที่ 3 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 187.5 – 200 มก./ล., การทดลองที่ 4 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 240 – 262.5 มก./ล.

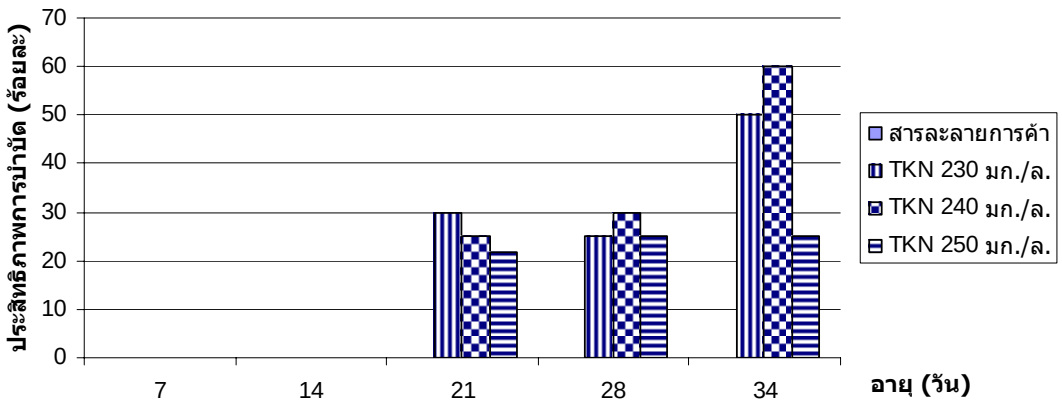
การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กลุ่มทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) มีประสิทธิภาพในการบำบัดเป็นศูนย์, ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำประปาที่ใช้ในการผสมสารละลายธาตุอาหาร พบว่า ค่าซีโอดี คือ 16 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าซีโอดีของน้ำที่ใช้ผสมสารละลายสำหรับปลูกพืช. กลุ่มทดลองที่ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดคือ การทดลองที่ 3, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 4, ตามลำดับ, (ดังตารางที่ 34 และรูปที่ 15). ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี คือ ร้อยละ 60, 50, และ 25, ตามลำดับ.

ตารางที่ 34. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	0.00	0.00	29.69	25.00	50.00
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	0.00	0.00	25.00	30.00	60.00
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	0.00	0.00	21.88	25.00	25.00

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีในการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน ดังนี้. Monnet *et al.* (2002) ศึกษาการปลูกกุหลาบช่อในระบบ NFT เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 89. การศึกษาของ Shalaby *et al.* (2008) ทดลองใช้ระบบไฮโดรโพนิกชั้นกรวดปลูกต้นกก เพื่อบำบัดน้ำเสียจากสิ่งปฏิกูล สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 77 – 82. การศึกษาของ Snow and Ghaly (2008a) ใช้ข้าวบาร์เลย์ในการบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบไฮโดรโพนิก สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 72.9 – 83.1.

การศึกษาของ Snow and Ghaly (2008b) ใช้พืชน้ำ ได้แก่ ผักตบชวา, จอกแหน และสาหร่ายหางกระรอก, พบว่า ที่ HRT 6 วัน ผักตบชวาสามารถบำบัดค่าซีโอดี ได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 89.5. การศึกษา Vaillant *et al.* (2004) ประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกปลูกพืชเศรษฐกิจได้แก่ Woodly Digitalis (*Digitalis lanata* Ehrh.) และ Foxglove (*Digitalis purpurea* L.) เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน, พบว่า พืช Woodly Digitalis และ พืช Foxglove สามารถบำบัดค่าซีโอดี ได้ร้อยละ 79 และ 84, ตามลำดับ. สุดท้ายคือการศึกษาของ Rababah and Ashbolt (2000) การประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรโพนิกในการบำบัดน้ำเสียชุมชนขั้นต้น โดยใช้ระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT โดยการปลูกผักสลัด, พบว่า หลังทำการปลูกพืชในระบบไฮโดรโพนิกครบ 7 วัน (1 รอบการเปลี่ยนน้ำสารละลาย) พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดค่า COD ได้ร้อยละ 87.



รูปที่ 15. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1).

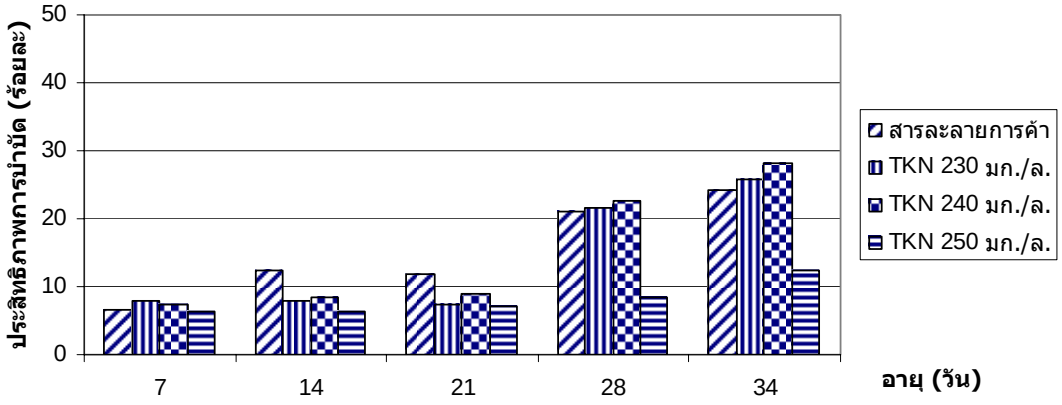
4.3.2.4 ค่าบีโอดี (BOD)

การศึกษาการบำบัดค่าบีโอดี ค่าบีโอดีของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 6.73 – 7.7 มก./ล., การทดลองที่ 2 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 17.85 – 18.85 มก./ล. , การทดลองที่ 3 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 19.15 – 20.35 มก./ล., การทดลองที่ 4 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 22.55 – 24.65 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดีสูงสุด คือ การทดลองที่ 3, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2, 1 และ 4, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 35 และรูปที่ 16). ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี คือ ร้อยละ 28.08, 25.73, 24.14 และ 12.35, ตามลำดับ.

ตารางที่ 35. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	6.67	12.33	11.82	21.01	24.14
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	7.84	7.78	7.28	21.45	25.73
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	7.46	8.40	8.88	22.60	28.08
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	6.29	6.43	7.22	8.53	12.35



รูปที่ 16. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 1).

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดีในการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน ดังนี้. Monnet *et al.* (2002); Shalaby *et al.* (2008); Vaillant *et al.* (2004); Rababah and Ashbolt (2000).

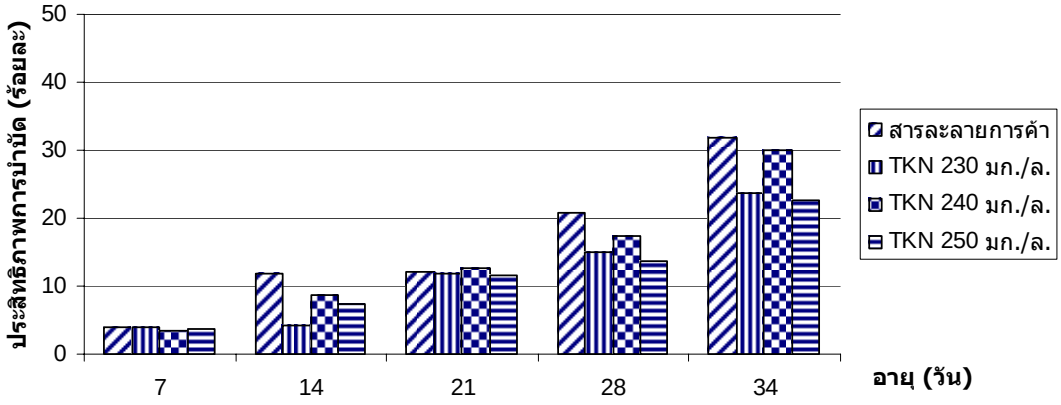
4.3.2.5 ค่าของแข็งทั้งหมด (TS)

การศึกษาการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 1762 – 1982.5 มก./ล., การทดลองที่ 2 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 1672 – 2005 มก./ล., การทดลองที่ 3 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 1680 – 2022.5 มก./ล., การทดลองที่ 4 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 1864 – 2175.5 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมดสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3, 2 และ 4, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด คือ ร้อยละ 31.92, 29.96, 23.65, และ 22.54, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 36 และรูปที่ 17).

ตารางที่ 36. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	3.97	11.77	12.14	20.68	31.92
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	3.95	4.30	11.85	14.87	23.65
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	3.45	8.59	12.61	17.31	29.96
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	3.65	7.33	11.65	13.81	22.54



รูปที่ 17. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 1).

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมดในการทดลองนี้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Shalaby *et al.* (2008) และ Snow and Ghaly (2008a, b).

4.3.2.6 ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)

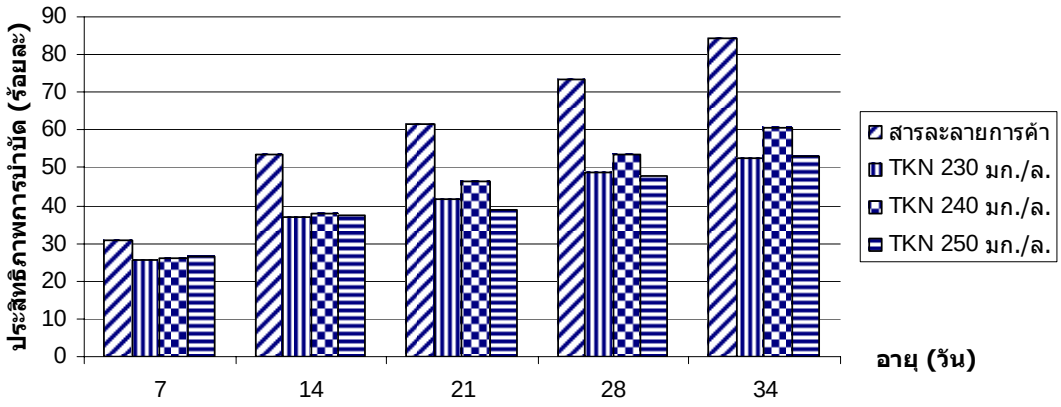
การศึกษาการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 26 – 30 มก./ล., การทดลองที่ 2 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 35 – 42 มก./ล., การทดลองที่ 3 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 42 – 48 มก./ล., การทดลองที่ 4 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 48 – 53 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยสูงสุด คือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือการทดลองที่ 3, 2 และ 4, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย คือ ร้อยละ 84.43, 60.42, 52.83, และ 52.38, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 37 และรูปที่ 18).

ตารางที่ 37. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 1)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	30.85	53.33	61.54	73.55	84.43
ปริมาณ ทีเคเอ็น 230 มก./ล.	25.71	36.84	41.67	48.65	52.38
ปริมาณ ทีเคเอ็น 240 มก./ล.	26.19	37.78	46.51	53.33	60.42
ปริมาณ ทีเคเอ็น 250 มก./ล.	26.53	37.50	38.78	47.92	52.83

ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยในการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน ได้แก่ Monnet *et al.* (2002); Shalaby *et al.* (2008); Vaillant *et al.* (2004) และ Rababah and Ashbolt (2000).



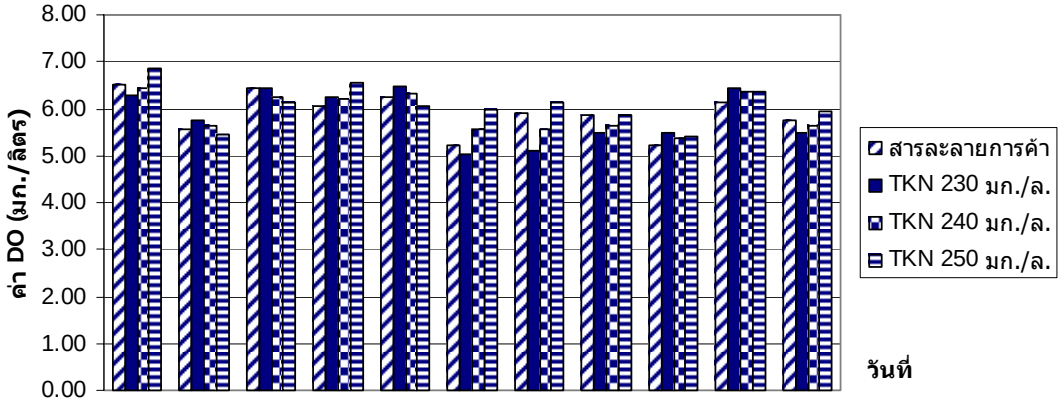
รูปที่ 18. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 1).

4.3.2.7 ค่าดีโอ (DO)

การศึกษาค่าดีโอ พบว่า ค่าดีโอในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้ การทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 5.22 – 6.55 มก./ล., การทดลองที่ 2 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 5.04 – 6.45 มก./ล., การทดลองที่ 3 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 5.62 – 6.43 มก./ล., การทดลองที่ 4 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 5.42 – 6.85 มก./ล. (ดังตารางที่ 38 และรูปที่ 19).

ตารางที่ 38. ค่าดีโอในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 1)

วันที่	การทดลอง			
	สารละลายการค้า	TKN 230 มก./ล.	TKN 240 มก./ล.	TKN 250 มก./ล.
3/6/51	6.52	6.27	6.43	6.85
6/6/51	5.56	5.75	5.65	5.43
9/6/51	6.45	6.43	6.23	6.14
13/6/51	6.05	6.23	6.21	6.55
16/6/51	6.24	6.48	6.33	6.05
20/6/51	5.22	5.04	5.56	6.00
24/6/51	5.91	5.11	5.56	6.12
27/6/51	5.85	5.49	5.65	5.87
1/7/51	5.23	5.47	5.36	5.42
5/7/51	6.12	6.45	6.35	6.36
8/7/51	5.76	5.48	5.62	5.94



รูปที่ 19. ค่าดีโอในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1).

การศึกษาค่าดีโอในการทดลองนี้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Lennard and Leonard (2004) ที่ค่าดีโอในสารละลายค่อนข้างสูง คือ ค่าดีโอในสารละลายแบบไหลต่อเนื่องอยู่ที่ 7.43 มก./ล. และค่าดีโอในสารละลายแบบไหลกลับไปกลับมาเฉลี่ย 7.24 มก./ล. การศึกษาของ Lennard and Leonard (2006) ค่าดีโอในสารละลายในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT คือ 7.84 ± 0.03, 7.96 ± 0.06 และ 7.93 ± 0.07 มก./ล., ตามลำดับ. การศึกษาของ Rababah and Ashbolt (2000) ปลูกผักสลัดใช้ระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT พบว่า ค่า DO สูงที่สุด คือ 4.0 มก./ล. ซึ่งปริมาณ DO จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นประมาณ 5 มก./ล. หลังจากปลูกพืชในระบบไฮโดรโพนิกผ่านไป 24 ชั่วโมง.

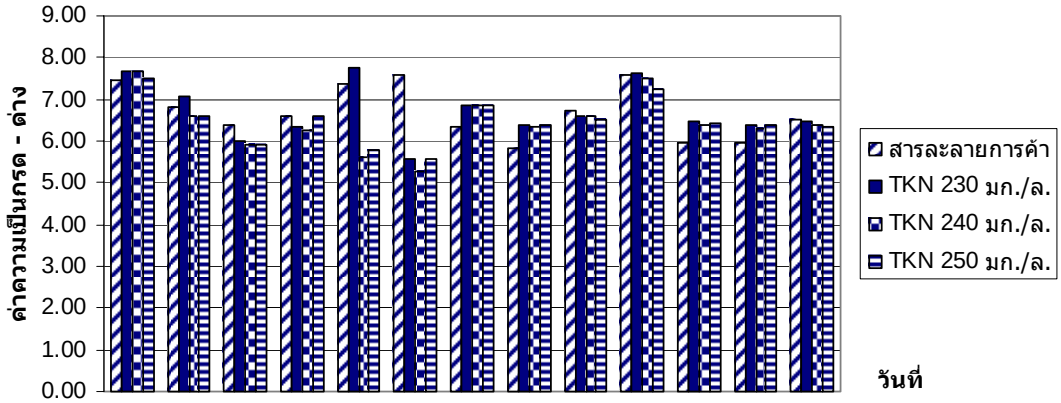
4.3.2.8 การศึกษาค่าความเป็นกรด – เบส (pH)

การศึกษาค่าความเป็นกรด – เบส พบว่า ค่าความเป็นกรด – เบสของน้ำเข้าสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็น ดังนี้ การทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 5.84 – 7.59 มก./ล., การทดลองที่ 2 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 5.58 – 7.75 มก./ล., การทดลองที่ 3 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 5.28 – 7.68 มก./ล., การทดลองที่ 4 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 5.58 – 7.51 มก./ล. (ดังตารางที่ 39 และรูปที่ 20).

ตารางที่ 39. ค่าความเป็นกรด – เบสในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 1)

วันที่	การทดลอง			
	สารละลายการค้า	TKN 230 มก./ล.	TKN 240 มก./ล.	TKN 250 มก./ล.
3/6/51	7.46	7.68	7.68	7.51
6/6/51	6.83	7.06	6.60	6.61
9/6/51	6.37	5.98	5.93	5.91
13/6/51	6.60	6.35	6.26	6.58
16/6/51	7.36	7.75	5.60	5.80
20/6/51	7.58	5.58	5.28	5.58
24/6/51	6.33	6.84	6.85	6.85
27/6/51	5.84	6.38	6.33	6.40
1/7/51	6.74	6.62	6.58	6.51
5/7/51	7.59	7.61	7.49	7.23
8/7/51	5.96	6.46	6.37	6.42

การศึกษาค่าความเป็นกรด – เบส ในการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Lennard and Leonard (2004) คือ ค่าพีเอชในสารละลายแบบไหลต่อเนื่องเฉลี่ย 6.9 ± 0.06 และค่าพีเอชในสารละลายแบบไหลกลับไปกลับมาเฉลี่ย 6.8 ± 0.05.



รูปที่ 20. ค่าความเป็นกรด – เบสในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1).

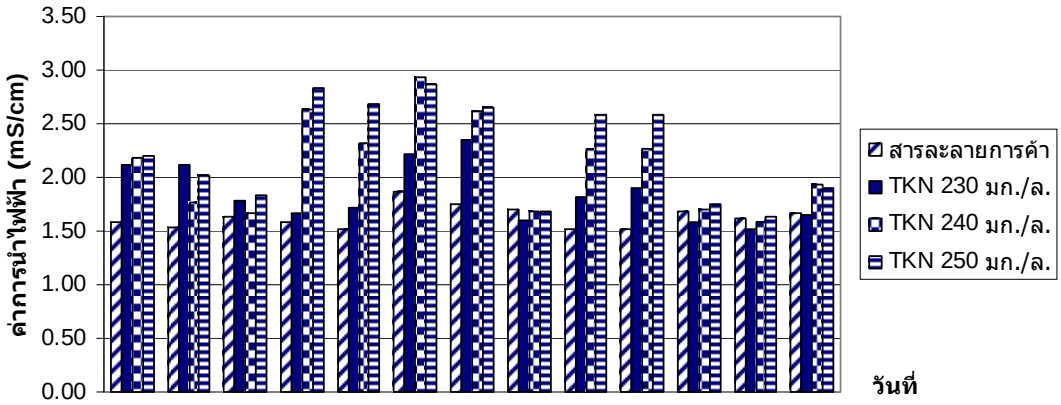
4.3.2.7 การศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (EC)

การศึกษาค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าน้ำเข้าสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็น ดังนี้ การทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) 1.51 – 1.86 mS/cm., การทดลองที่ 2 (ทีเคเอ็น 230 มก./ล.) อยู่ในช่วง 1.52 – 2.35 mS/cm., การทดลองที่ 3 (ทีเคเอ็น 240 มก./ล.) อยู่ในช่วง 1.59 – 2.93 mS/cm., การทดลองที่ 4 (ทีเคเอ็น 250 มก./ล.) อยู่ในช่วง 1.64 – 2.86 mS/cm. (ดังตารางที่ 40 และรูปที่ 21).

ตารางที่ 40. ค่าการนำไฟฟ้าในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 1)

วันที่	การทดลอง			
	สารละลายการค้า	TKN 230 มก./ล.	TKN 240 มก./ล.	TKN 250 มก./ล.
3/6/51	1.58	2.12	2.18	2.20
6/6/51	1.54	2.12	1.76	2.02
9/6/51	1.63	1.78	1.67	1.84
13/6/51	1.59	1.66	2.64	2.84
16/6/51	1.51	1.71	2.31	2.68
20/6/51	1.86	2.22	2.93	2.86
24/6/51	1.75	2.35	2.61	2.65
27/6/51	1.70	1.60	1.69	1.69
1/7/51	1.51	1.81	2.26	2.59
5/7/51	1.52	1.90	2.26	2.59
8/7/51	1.68	1.59	1.70	1.75

ค่าการนำไฟฟ้าในการทดลองนี้ขัดแย้งกับการศึกษาของ Lennard and Leonard (2006) ใช้น้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเป็นสารละลายธาตุอาหารในการปลูกผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายในระบบไฮโดรโพนิกแบบ Gravel, Floating และ NFT คือ 189.7 ± 3.2, 171.7 ± 1.2 และ 155 ± 1.0 μS/cm., ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกร, และการศึกษาของ Lennard and Leonard (2004) โดยใช้สารละลายธาตุอาหารจากน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา เปรียบเทียบการไหลของน้ำแบบไหลกลับไปกลับมาและแบบไหลต่อเนื่องในระบบไฮโดรโพนิกแบบผสมผสานกับแบบชั้นกรวด, พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายแบบไหลต่อเนื่องและค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายแบบไหลกลับไปกลับมาใกล้เคียงกัน, ซึ่งในค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละชุดการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกัน.



รูปที่ 21. ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 1)**.**

4.3.3 การทดลองชุดที่ 2

ศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า ที่อัตราต่างๆ เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้า. สารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่เลือกใช้ คือ ปริมาณทีเคเอ็น ที่ 240 มก./ล. โดยเลือกจากการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กที่ดีที่สุดจากชุดการทดลองที่ 1, โดยผสมสารละลายตามอัตราส่วนแล้วนำสารละลายที่ได้มาผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่:

ชุดการทดลองที่ 2

Treatment 1 : สารละลายการค้าของบริษัท เอ ซี เคไฮโดรฟาร์ม จำกัด (กลุ่มควบคุม).

Treatment 2 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : สารละลายสูตรมาตรฐาน อัตรา 50 : 50.

Treatment 3 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : สารละลายสูตรมาตรฐาน อัตรา 75 : 25.

โดยผลของการศึกษามีดังนี้:

4.3.4 การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอม

1) จำนวนใบ

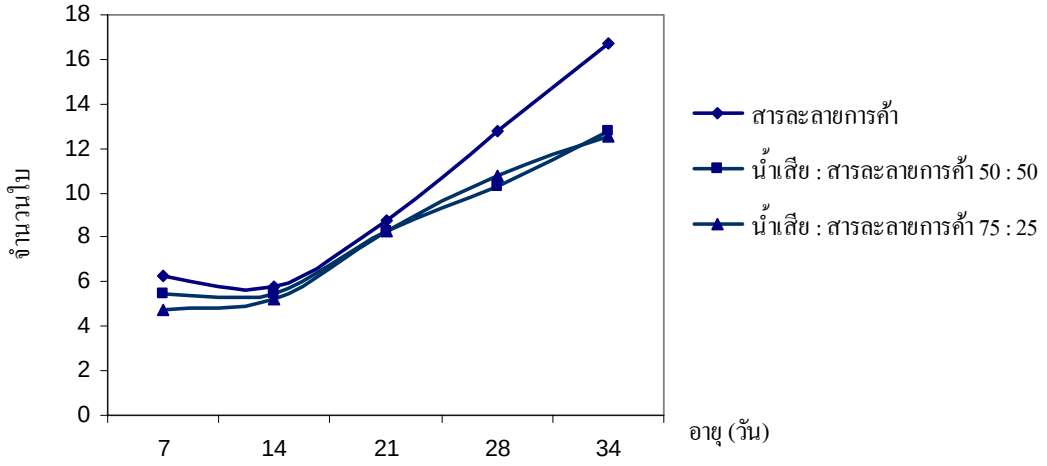
การศึกษาอิทธิพลของสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อจำนวนใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก เปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการนับจำนวนใบทุก 7, 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 7 วัน ในแต่ละกลุ่มการทดลองจำนวนใบมีความแตกต่างกัน. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34 วัน ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีจำนวนใบมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. โดยมีจำนวนใบเฉลี่ยมากที่สุด 16.75 ใบ, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และ อัตรา 75 : 25 มีจำนวนใบเฉลี่ย 12.75 และ 12.50 ใบ, ตามลำดับ. จำนวนใบมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 41 และรูปที่ 22).

ตารางที่ 41. จำนวนใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเมื่ออายุต่างๆ (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	6.25[a]	5.75[a]	8.75[a]	12.75[a]	16.75[a]
อัตรา 50 : 50	5.50[b]	5.50[a]	8.25[a]	10.25[b]	12.75[b]
อัตรา 75 : 25	4.75[c]	5.25[a]	8.25[a]	10.75[b]	12.50[b]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	6.78	10.93	9.70	6.63	3.61

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 22. จำนวนใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

2) ความกว้างทรงพุ่ม (Plant Canopy)

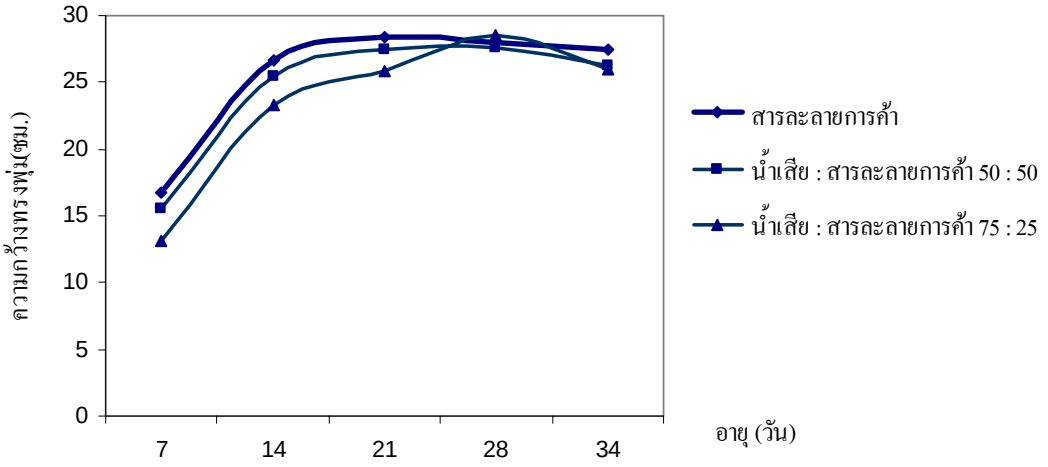
การศึกษาอิทธิพลของสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก เปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการวัดความกว้างทรงพุ่มทุก 7, 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 7 วันหลังย้ายปลูก ความกว้างทรงพุ่มมีความแตกต่างกัน, แต่เมื่ออายุ 28 วัน กลับไม่มีความแตกต่างกันจนถึงเก็บเกี่ยว. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34 วัน, ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีความกว้างทรงพุ่มมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ. โดยมีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ยมากที่สุด 27.75 เซนติเมตร, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และ อัตรา 75 : 25 มีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย 26.25 และ 26.00 ใบ, ตามลำดับ. ความกว้างทรงพุ่มมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 42 และรูปที่ 23).

ตารางที่ 42. ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (เซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	16.78[a]	26.68[a]	28.35[a]	27.95[a]	27.50[a]
อัตรา 50 : 50	15.50[a]	25.45[a]	27.45[ab]	27.53[a]	26.25[a]
อัตรา 75 : 25	13.08[b]	23.30[b]	25.90[b]	28.55[a]	26.00[a]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	8.05	4.34	4.61	3.34	5.21

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 23. ความกว้างทรงพุ่มของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

3) การเจริญเติบโตส่วนยอด (Shoot Growth)

การศึกษาอิทธิพลของสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการวัดการเจริญเติบโตส่วนยอดทุก 7, 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 7 วันหลังย้ายปลูก การเจริญเติบโตส่วนยอดไม่มีความแตกต่างกัน. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34 วัน ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีการเจริญเติบโตส่วน

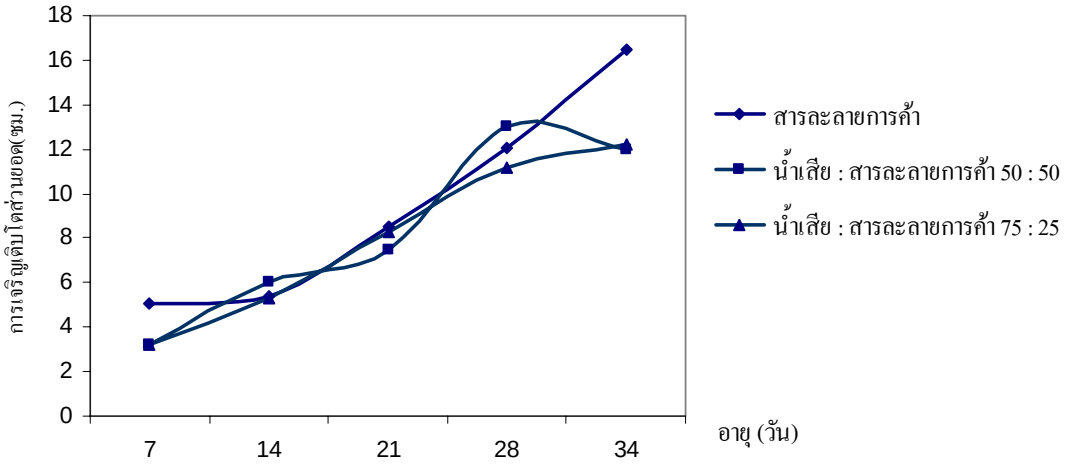
ยอดมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05). โดยมีการเจริญเติบโตส่วนยอดเฉลี่ยมากที่สุด 16.5 เซนติเมตร, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 75 : 25 และ อัตรา 50 : 50 มีการเจริญเติบโตส่วนยอดเฉลี่ย 12.00 เซนติเมตรและ 12.25 เซนติเมตร, ตามลำดับ. การเจริญเติบโตส่วนยอดมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 43 และรูปที่ 24).

ตารางที่ 43. การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (เซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	5.05[a]	5.38[a]	8.50[a]	12.08[a]	16.50[a]
อัตรา 50 : 50	3.20[b]	6.00[a]	7.50[b]	13.05[a]	12.00[b]
อัตรา 75 : 25	3.20[b]	5.30[a]	8.30[ab]	11.15[a]	12.25[b]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	10.07	17.87	6.98	9.59	8.59

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 24. การเจริญเติบโตส่วนยอดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

4) ความกว้างใบ (Leaf Width)

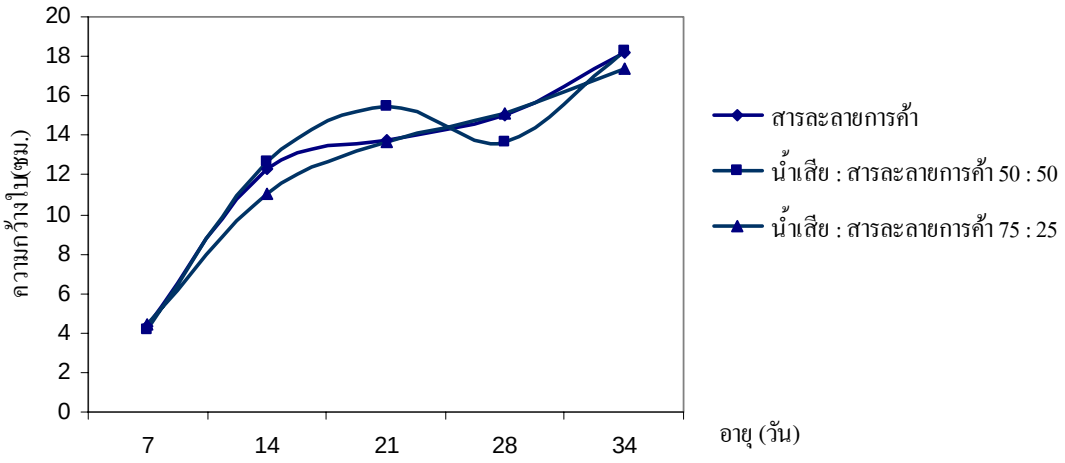
การศึกษาอิทธิพลของสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อความกว้างใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊กเปรียบเทียบกับผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการวัดความกว้างใบทุก 7, 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 7 วัน หลังย้ายปลูก ความกว้างใบไม่มีความแตกต่างกัน. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34 วัน ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีความกว้างใบมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ. โดยมีความกว้างใบเฉลี่ยมากที่สุด 18.17 เซนติเมตร, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และ อัตรา 75 : 25 มีความกว้างใบเฉลี่ย 18.27 และ 17.38 เซนติเมตร, ตามลำดับ. ความกว้างใบมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 44 และรูปที่ 25).

ตารางที่ 44. ความกว้างใบของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (เซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	4.31[a]	12.30[a]	13.72[a]	15.04[ab]	18.17[a]
อัตรา 50 : 50	4.19[a]	12.70[a]	15.46[a]	13.67[b]	18.27[a]
อัตรา 75 : 25	4.39[a]	11.07[b]	13.70[a]	15.14[a]	17.38[a]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	6.42	4.83	7.63	5.58	5.06

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 25. ความกว้างใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

5) น้ำหนักสด (Fresh Weight)

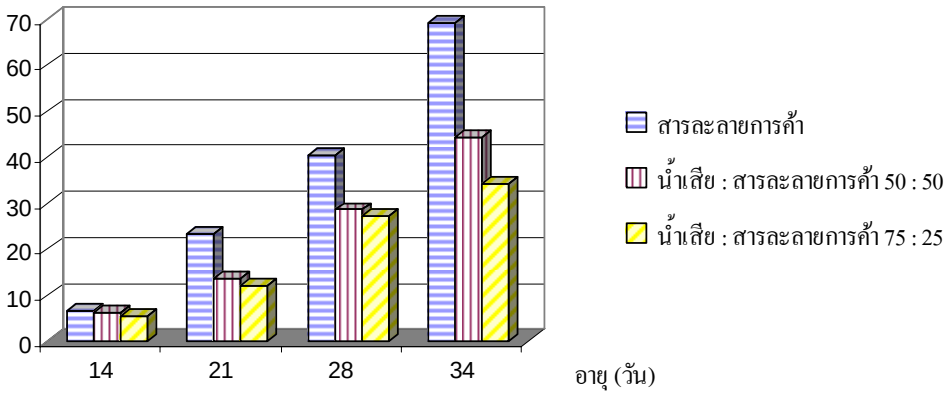
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักกาดหอม, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการบันทึกน้ำหนักสดทุก 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 14 วัน น้ำหนักสดของผักกาดหอมไม่แตกต่างกัน, แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักสดของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34 วัน ทำให้ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีน้ำหนักสดมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ. โดยมีน้ำหนักสดเฉลี่ย 69.19 กรัม, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และ อัตรา 75 : 25 มีน้ำหนักสดเฉลี่ย 44.16 และ 34.30 กรัม, ตามลำดับ. น้ำหนักสดมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 45 และรูปที่ 26).

ตารางที่ 45. น้ำหนักสดของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (กรัม) (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	6.53[a]	23.32[a]	40.33[a]	69.19[a]
อัตรา 50 : 50	6.29[a]	13.59[b]	28.60[b]	44.16[b]
อัตรา 75 : 25	5.34[a]	12.13[b]	27.15[b]	34.30[c]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	8.43	5.94	8.13	3.76

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 26. น้ำหนักสดของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

6) น้ำหนักแห้ง (Dry Weight)

การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อน้ำหนักแห้งของผักกาดหอม, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการบันทึกน้ำหนักแห้งทุก 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 14 วัน น้ำหนักแห้งของผักกาดหอมไม่แตกต่างกัน, แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักสดของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34

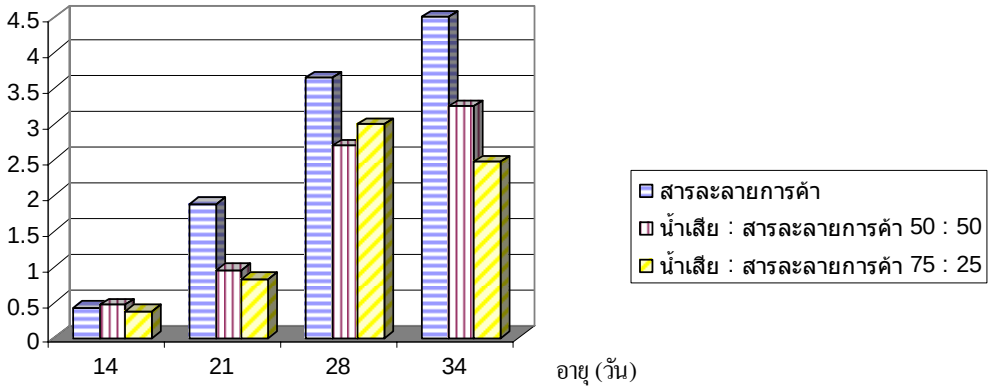
วัน ทำให้ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีน้ำหนักแห้งมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ. โดยมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 4.49 กรัม, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และอัตรา 75 : 25 มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 3.24 และ 2.46 กรัม, ตามลำดับ. น้ำหนักแห้งมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 46 และรูปที่ 27).

ตารางที่ 46. น้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก (กรัม) (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	0.43[a]	1.87[a]	3.64[a]	4.49[a]
อัตรา 50 : 50	0.46[a]	0.94[b]	2.69[a]	3.24[ab]
อัตรา 75 : 25	0.38[a]	0.82[b]	2.99[a]	2.46[b]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	5.35	9.08	21.53	9.44

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 27. น้ำหนักแห้งของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

7) พื้นที่ใบ (Leaf Area)

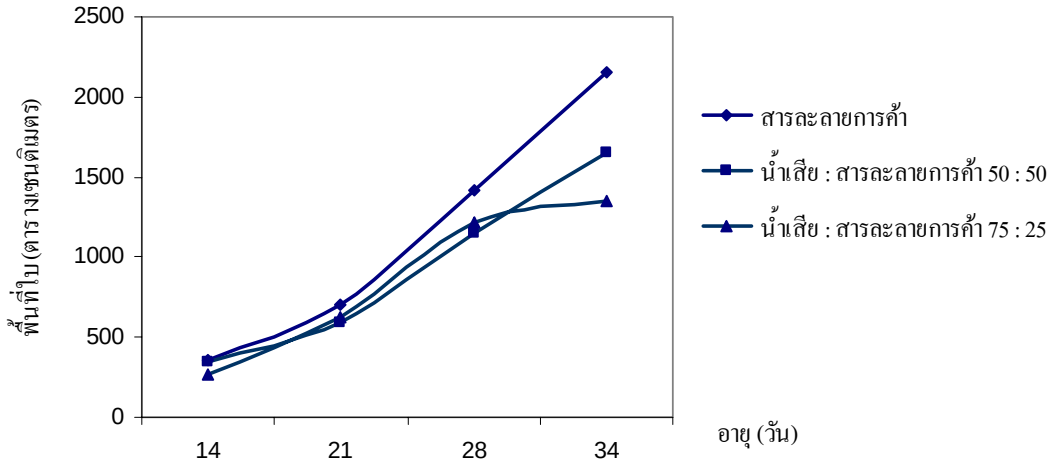
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อพื้นที่ใบของผักกาดหอม, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการวัดพื้นที่ใบทุก 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 21 และ 28 วัน พื้นที่ใบของผักกาดหอมไม่แตกต่างกัน. เมื่อเก็บเกี่ยวผักกาดหอมที่อายุ 34 วัน ทำให้พื้นที่ใบของผักกาดหอมแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. โดยผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีพื้นที่ใบมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ. โดยมีพื้นที่ใบเฉลี่ย 2151.50 ตารางเซนติเมตร, รองลงมาคือการปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และ อัตรา 75 : 25 มีพื้นที่ใบเฉลี่ย 1649.50 และ 1351.50 ตารางเซนติเมตร, ตามลำดับ. พื้นที่ใบมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 47 และรูปที่ 28).

ตารางที่ 47. พื้นที่ใบของผักกาดหอม (ตารางเซนติเมตร) (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	357.00[a]	703.00[a]	1422.50[a]	2151.50[a]
อัตรา 50 : 50	351.50[a]	587.00[a]	1147.00[a]	1649.50[b]
อัตรา 75 : 25	267.00[b]	627.50[a]	1217.50[a]	1351.50[b]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	4.73	15.39	5.19	5.89

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 28. พื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)**.**

8) ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index)

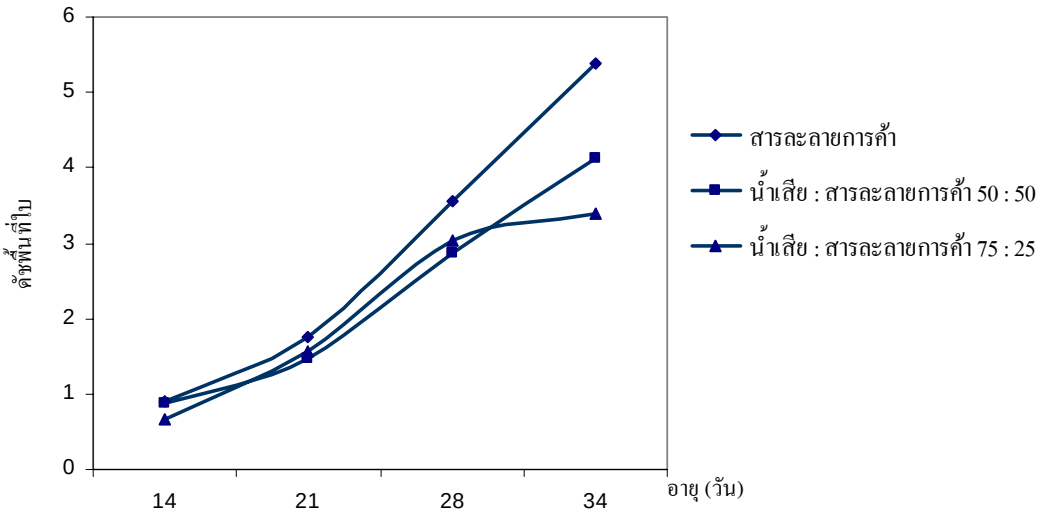
การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอม, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการวัดดัชนีพื้นที่ใบทุก 14, 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 14 วัน ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอมแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. แต่เมื่ออายุ 21 และ 28 วัน จนถึงเก็บเกี่ยว 34 วัน, ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอมไม่แตกต่างกัน. โดยผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีดัชนีพื้นที่ใบมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ. โดยมีดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ย 5.38, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และ อัตรา 75 : 25 มีดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ย 4.12 และ 3.38, ตามลำดับ. ดัชนีพื้นที่ใบมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 48 และรูปที่ 29).

ตารางที่ 48. ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)			
	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	0.89[a]	1.76[a]	3.56[a]	5.38[a]
อัตรา 50 : 50	0.88[a]	1.47[a]	2.87[a]	4.12[b]
อัตรา 75 : 25	0.67[b]	1.57[a]	3.04[a]	3.38[b]
LSD	0.05	0.05	0.05	0.05
C.V.	5.23	17.19	5.20	5.83

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 29. ดัชนีพื้นที่ใบของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

9) อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก

การศึกษาอิทธิพลของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ ต่ออัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม, หลังทำการย้ายปลูกผักกาดหอมลงในรางปลูกจะทำการวัดอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมทุก 21, 28 และ 34 วัน, พบว่า เมื่อผักกาดหอมอายุ 21 วัน อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมแตกต่างกัน

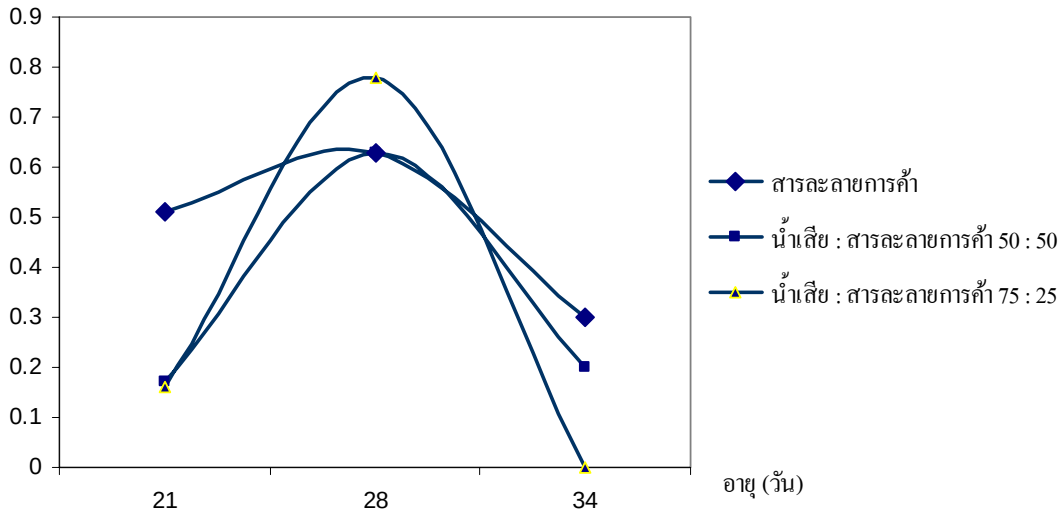
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ. แต่เมื่ออายุ 28 วันจนถึงเก็บเกี่ยว 34 วัน, อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมไม่แตกต่างกัน. โดยผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้ามีอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมมากกว่าการปลูกผักกาดหอมด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผสมกับสารละลายการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ. โดยมีอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเฉลี่ย 0.30, รองลงมาคือ การปลูกด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และ อัตรา 75 : 25 มีอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเฉลี่ย 0.20 และ 0.00, ตามลำดับ. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมมากที่สุดเมื่อผักกาดหอมอายุ 5 สัปดาห์ (ดังตารางที่ 49 และรูปที่ 30).

ตารางที่ 49. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)[1/]		
	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	0.51[a]	0.63[a]	0.30[a]
อัตรา 50 : 50	0.17[b]	0.63[a]	0.20[a]
อัตรา 75 : 25	0.16[b]	0.78[a]	0.00[a]
LSD	0.05	0.05	0.05
C.V.	11.57	29.86	29.65

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรต่างชนิดกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ P< 0.05, จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.

2. ตัวเลขที่แสดงไว้ในคอลัมน์เดียวกันและตามด้วยอักษรร่วมกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ.



รูปที่ 30. อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (ชุดการทดลองที่ 2).

4.3.5 การบำบัดน้ำเสีย

ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกโดยใช้สารละลายธาตุอาหารจากฟาร์มสุกร ทำการศึกษาทุก 7 วัน (ทำการเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหาร), อธิบายและสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้.

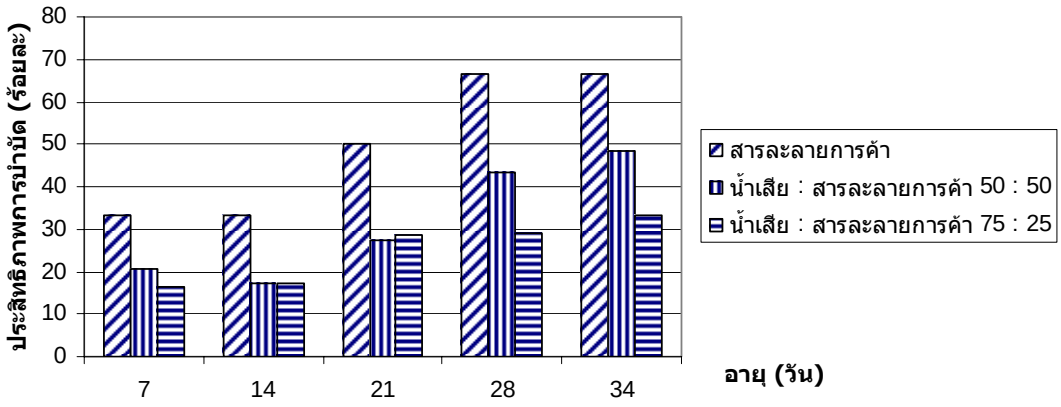
4.3.5.1 ค่าทีเคเอ็น (ทีเคเอ็น)

การศึกษาการบำบัดค่าทีเคเอ็น ค่าทีเคเอ็นของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) มีค่าทีเคเอ็น 3.36 มก./ล., การทดลองที่ 2 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 50 :50) อยู่ในช่วง 51.55 – 52.11 มก./ล., การทดลองที่ 3 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 75 :50) อยู่ในช่วง 84.6 – 85.72 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็นสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ร้อยละ 66.67, 48.23 และ 33.11, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 50 และรูปที่ 31).

ตารางที่ 50. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	33.33	33.33	50.00	66.67	66.67
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	20.44	17.40	27.18	43.49	48.23
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25	16.33	17.21	28.48	29.14	33.11



รูปที่ 31. ประสิทธิภาพในการกำจัดทีเคเอ็น (ชุดการทดลองที่ 2)**.**

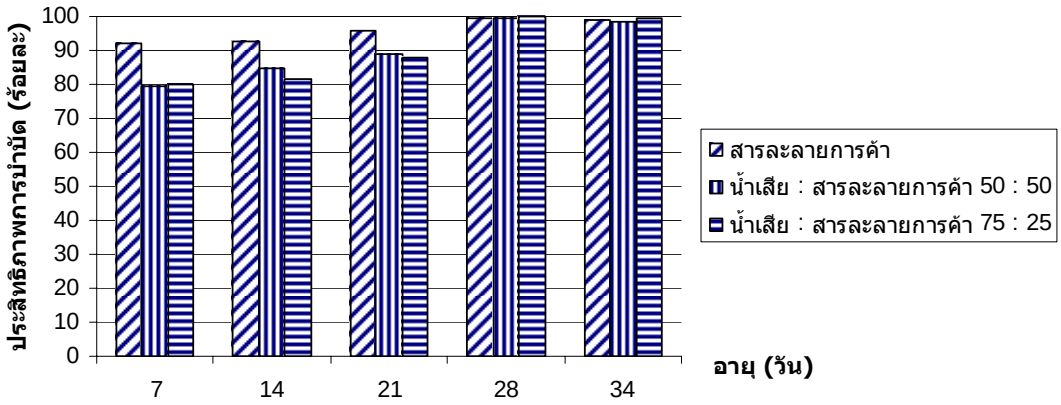
4.3.5.2 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

การศึกษาการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 15.33 – 17.6 มก./ล., การทดลองที่ 2 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 50 :50) อยู่ในช่วง 3.76 – 4.36 มก./ล., การทดลองที่ 3 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 75 :50) อยู่ในช่วง 4.1 – 4.42 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองประสิทธิภาพในการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดใกล้เคียงกัน. โดยกลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด สูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 99.27, 99.07 และ 98.67, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 51 และรูปที่ 32).

ตารางที่ 51. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	91.98	92.88	95.79	99.26	99.07
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	79.33	84.84	88.76	99.51	98.67
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25	79.81	81.40	87.78	99.76	99.27



รูปที่ 32. ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2).

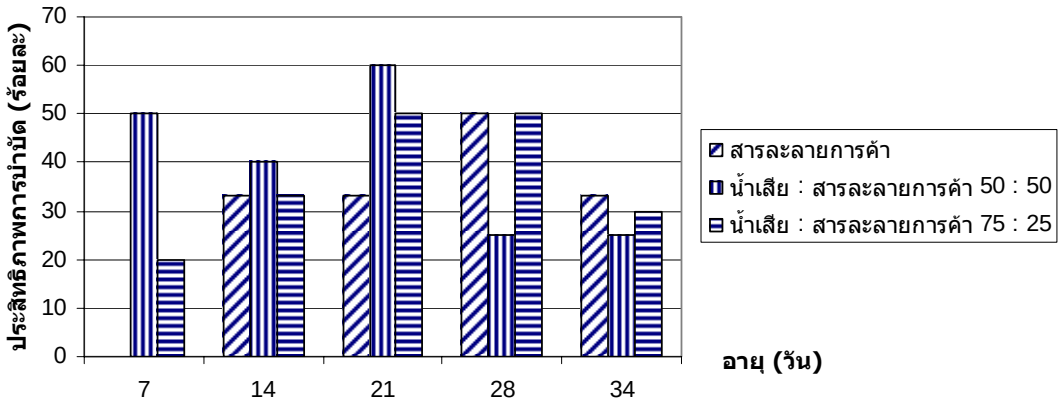
4.3.5.3 ค่าซีโอดี (COD)

การศึกษาการบำบัดค่าซีโอดี ค่าซีโอดีของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 32.00 – 48.00 มก./ล., การทดลองที่ 2 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 50 :50) มีค่าซีโอดี อยู่ในช่วง 64.00 – 80.00 มก./ล., การทดลองที่ 3 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 75 :50) มีค่าซีโอดี อยู่ในช่วง 80 – 96 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กลุ่มทดลองที่ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3 และ 2, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 33, 30 และ 25, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 52 และรูปที่ 33).

ตารางที่ 52. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	0.00	33.33	33.33	50.00	33.00
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	50.00	40.00	60.00	25.00	25.00
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25	20.00	33.33	50.00	50.00	30.00



รูปที่ 33. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2).

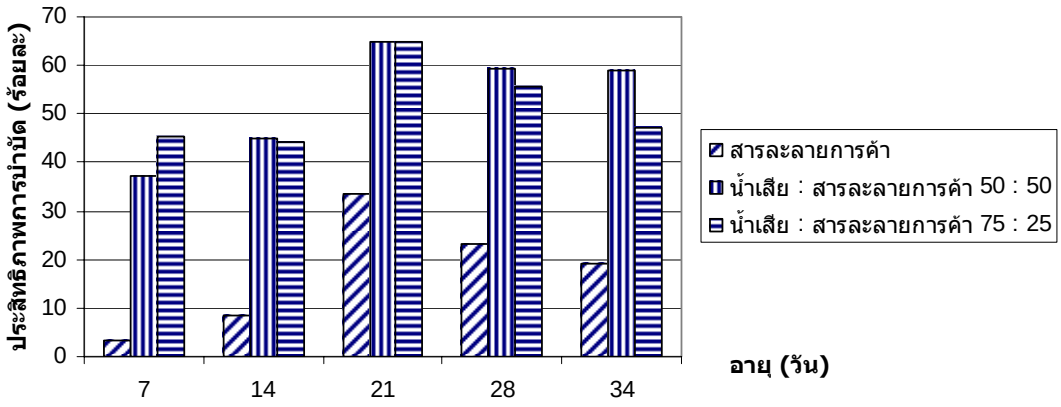
4.3.5.4 ค่าบีโอดี (BOD)

การศึกษาการบำบัดค่าบีโอดี ค่าบีโอดีของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 8.15 – 12.25 มก./ล., การทดลองที่ 2 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 50 :50) อยู่ในช่วง 21.3 – 33.5 มก./ล., การทดลองที่ 3 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 75 :50) อยู่ในช่วง 30.00 – 44.86 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดีสูงสุดคือ การทดลองที่ 2, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3 และ 1, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 58.81, 47.09 และ 19.02, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 53 และรูปที่ 34).

ตารางที่ 53. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	3.47	8.29	33.47	23.19	19.02
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	37.32	45.12	64.87	59.14	58.81
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25	45.50	44.15	64.87	55.58	47.09



รูปที่ 34. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (ชุดการทดลองที่ 2)**.**

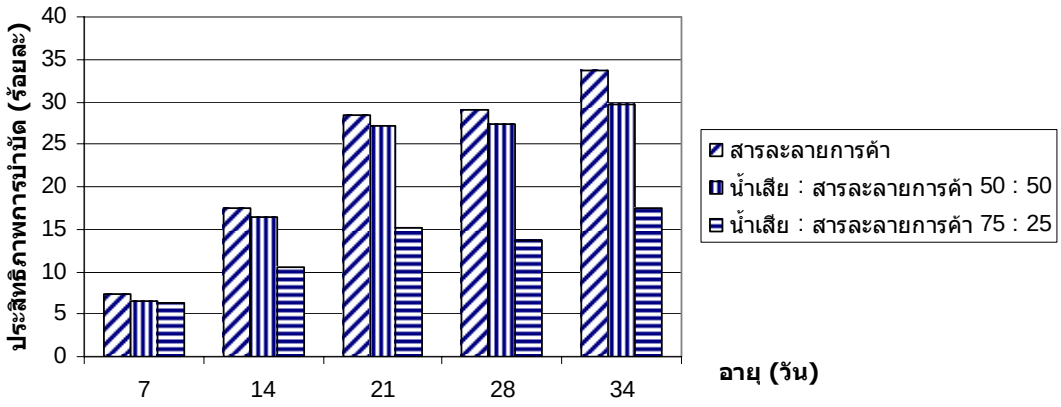
4.3.5.5 ค่าของแข็งทั้งหมด (TS)

การศึกษาการบำบัดค่าค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 1727.5 – 1922.5 มก./ล., การทดลองที่ 2 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 50 :50) อยู่ในช่วง 1742.00 – 2167.5 มก./ล., การทดลองที่ 3 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 75 :50) อยู่ในช่วง 1997.5 – 2377.5 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมดสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 33.62, 29.72 และ 17.56, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 54 และรูปที่ 35).

ตารางที่ 54. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	7.41	17.37	28.48	28.95	33.62
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	6.46	16.50	27.10	27.33	29.72
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25	6.27	10.51	15.25	13.76	17.56



รูปที่ 35. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด (ชุดการทดลองที่ 2)**.**

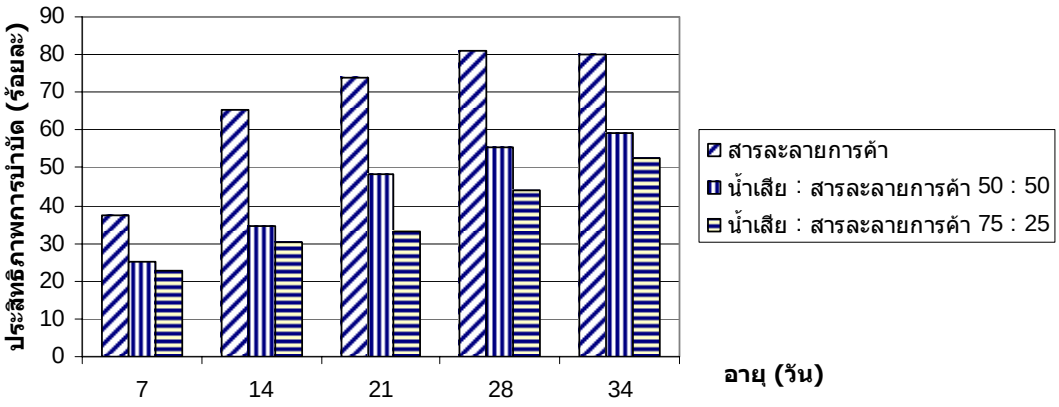
4.3.5.6 ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)

การศึกษาการบำบัดค่าค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งแขวนลอยน้ำเข้าของการทดลองที่ 1 (สารละลายการค้า) อยู่ในช่วง 21.00 – 25.55 มก./ล., การทดลองที่ 2 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 50 :50) อยู่ในช่วง 24.00 – 29.00 มก./ล., การทดลองที่ 3 (น้ำเสียจากฟาร์มสุกรผสมกับสารละลายการค้า อัตรา 75 :50) อยู่ในช่วง 33.00 – 36.00 มก./ล.

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กลุ่มที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ. ประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 80, 59.26 และ 52.78, ตามลำดับ (ดังตารางที่ 55 และรูปที่ 36).

ตารางที่ 55. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 2)

ทรีตเมนต์	อายุ (สัปดาห์)				
	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 5
สารละลายการค้า	37.51	65.22	73.91	80.95	80.00
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	25.00	34.62	48.28	55.56	59.26
น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25	22.86	30.30	33.33	44.12	52.78



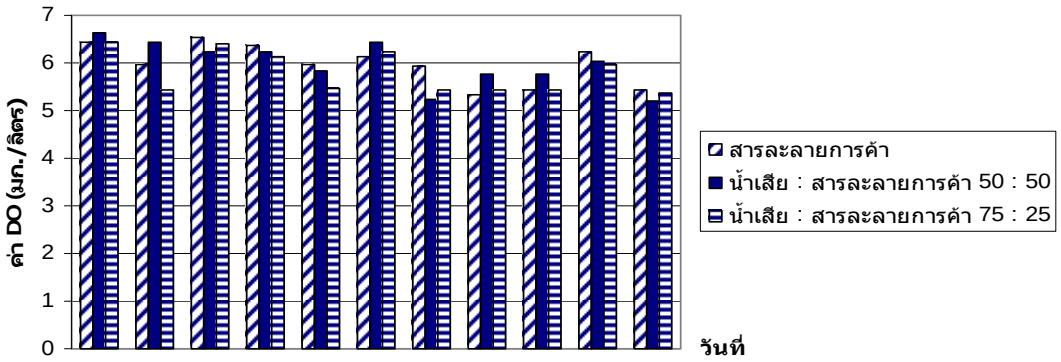
รูปที่ 36. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (ชุดการทดลองที่ 2).

4.3.5.7 ค่าดีโอ (DO)

การศึกษาค่าดีโอ พบว่า ค่าดีโอในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้ ค่าดีโอของการทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 5.33 – 6.45 มก./ล., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 5.21 – 6.63 มก./ล., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 5.42 – 6.45 มก./ล. (ดังตารางที่ 56 และรูปที่ 37).

ตารางที่ 56. ค่าดีโอในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 2)

วันที่	การทดลอง		
	สารละลายการค้า	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25
4/8/51	6.45	6.63	6.45
6/8/51	5.96	6.42	5.42
8/8/51	6.55	6.24	6.41
11/8/51	6.38	6.25	6.13
13/8/51	5.96	5.84	5.46
15/8/51	6.12	6.45	6.23
18/8/51	5.93	5.23	5.45
22/8/51	5.33	5.76	5.43
25/8/51	5.45	5.78	5.42
29/8/51	6.22	6.02	5.96
1/9/51	5.45	5.21	5.36



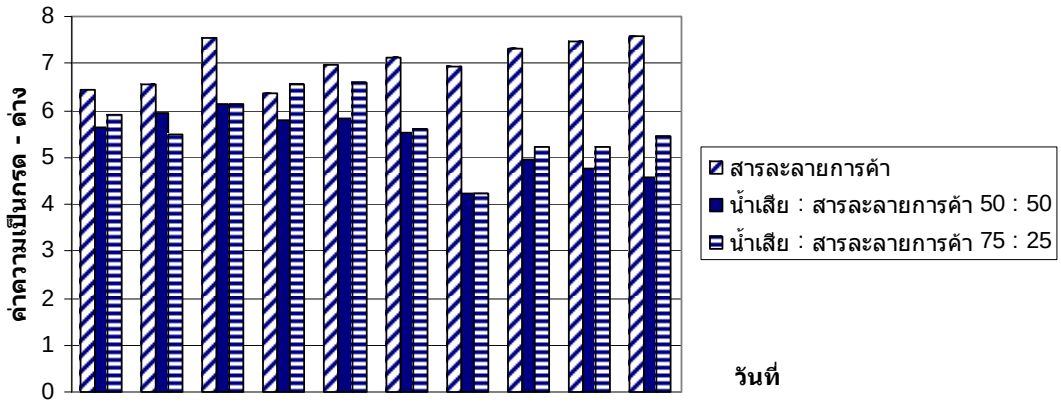
รูปที่ 37. ค่าดีโอในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2).

4.3.5.8 การศึกษาค่าความเป็นกรด – เบส (pH)

การศึกษาค่าพีเอช พบว่า ค่าพีเอชในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้ ค่าพีเอชของการทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 6.45 – 7.58, การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 4.23 – 6.14, การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 4.24 – 6.55 (ดังตารางที่ 57 และรูปที่ 38).

ตารางที่ 57. ค่าความเป็นกรดเบสในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 2)

วันที่	การทดลอง		
	สารละลายการค้า	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25
4/8/51	6.45	5.63	5.9
6/8/51	6.56	5.95	5.48
8/8/51	7.55	6.14	6.14
11/8/51	6.38	5.78	6.55
13/8/51	6.98	5.84	6.6
15/8/51	7.12	5.54	5.59
18/8/51	6.93	4.23	4.24
22/8/51	7.33	4.96	5.23
25/8/51	7.45	4.78	5.22
29/8/51	7.58	4.56	5.45
1/9/51	6.45	5.63	5.9



รูปที่ 38. ค่าความเป็นกรด – เบสในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2).

4.3.5.9 การศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (EC)

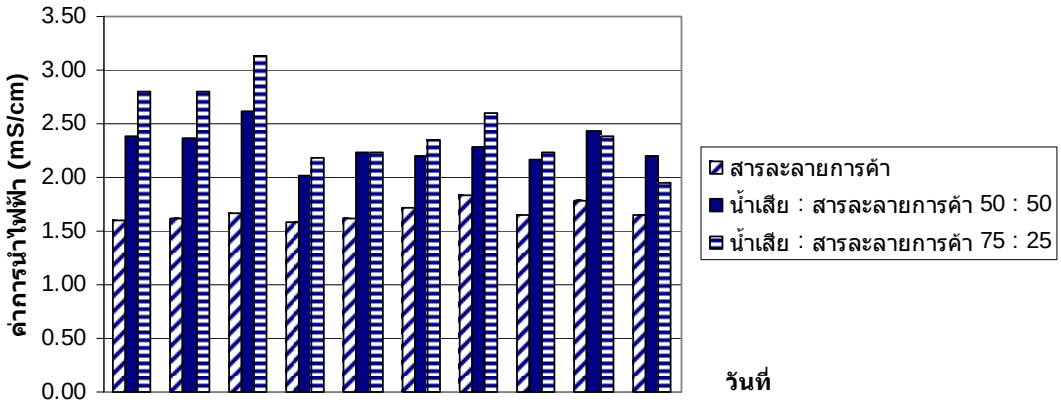
การศึกษาค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิก เป็นดังนี้ ค่าการนำไฟฟ้าของการทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 1.59 – 1.83 mS/cm., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 2.02 – 2.44 mS/cm., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 1.95 – 3.18 mS/cm. (ดังตารางที่ 58 และรูปที่ 37).

ตารางที่ 58. ค่าการนำไฟฟ้าในถังสารละลาย (ชุดการทดลองที่ 2)

วันที่	การทดลอง		
	สารละลายการค้า	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25
4/8/51	1.60	2.38	2.80
6/8/51	1.62	2.37	2.80
8/8/51	1.67	2.61	3.14
11/8/51	1.59	2.02	2.18
13/8/51	1.62	2.24	2.24
15/8/51	1.72	2.20	2.35
18/8/51	1.83	2.28	2.60

ตารางที่ 58. (ต่อ)

วันที่	การทดลอง		
	สารละลายการค้า	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 50 : 50	น้ำเสีย : สารละลายการค้า 75 : 25
22/8/51	1.65	2.16	2.23
25/8/51	1.78	2.44	2.38
29/8/51	1.65	2.20	1.95
1/9/51	1.60	2.38	2.80



รูปที่ 39. ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิก (ชุดการทดลองที่ 2).

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก โดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ, ปลูกในระบบไฮโดรโพนิกในรางปลูกแบบ Nutrient Film Technique (NFT) ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่แตกต่างกัน, สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้.

5.1 การตรวจนับไข่หนอนพยาธิ Ascaris

ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ไข่หนอนพยาธิที่พบคือ *Ascaris suum*. จากผลการศึกษา พบว่า ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่นำมาทำการศึกษา เมื่อนำน้ำเสียที่ยังไม่ทำการกรองมาตรวจนับไข่พยาธิ พบไข่พยาธิ *Ascaris suum* จำนวน 3 ฟอง/มล. ของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร, แต่เมื่อนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาผ่านถังกรองทราย นำน้ำเสียมาตรวจนับไข่พยาธิไม่พบไข่พยาธิในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.

5.2 การศึกษาปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ หลังผ่านการกรองด้วยถังกรองทราย, มีธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองครบทุกธาตุ ขาดเพียงธาตุเดียว คือ กำมะถัน, ซึ่งปริมาณธาตุอาหารที่มีอาจไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช, ส่งผลให้พืชการเจริญเติบโตของผักกาดหอมไม่เต็มที่. นั่นคือ การเจริญเติบโตและขนาดของใบพืชจะน้อยลง เนื่องจากไม่มีธาตุกำมะถัน ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีนและกรดแอมิโนบางชนิด. กรดแอมิโน 2 ชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบเช่น ซิสเทอีน (cysteine) และ เมไทโอนีน (methionine). กำมะถันยังเป็นองค์ประกอบของไวตามิน เช่น ไทอามีน (thiamine) ในโคเอนไซม์ (coenzyme).

ในการนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศเป็นสารละลายธาตุอาหารในการปลูกพืชระบบไฮโดรโพนิกนั้น, เมื่อผสมสารละลายแล้วนำไปวัดค่าความเป็นกรด–เบส, ค่าพีเอชของสารละลายที่ได้มีค่าสูง ทำให้ต้องปรับลดค่าพีเอชด้วยกรดไนตริกก่อน จึงจะทำให้ค่าพีเอชที่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการปลูกผักกาดหอมได้. การปรับค่าพีเอชจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้า (EC) เปลี่ยนแปลงไปคือ เมื่อทำการปรับค่าพีเอชจะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายเพิ่มขึ้นเกินค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสม. ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน

คือ ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมจะทำให้รากพืชสามารถนำธาตุอาหารพืชไปใช้ได้ดี, ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถปรับค่าพีเอชพร้อมกับการปรับค่าการนำไฟฟ้าให้เหมาะสมได้.

5.3 การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์เรดโอ๊ก ที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณทีเคเอ็นที่แตกต่างกัน

การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณทีเคเอ็นที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้ามีการเจริญเติบโตมากที่สุด, คือ มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมากที่สุด, รองลงมา คือผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรปริมาณทีเคเอ็น 240, 230 และ 250 มก./ล.

การศึกษาการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ผสมกับสารละลายการค้าในอัตราที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายการค้า, พบว่า ผักกาดหอมที่ปลูกด้วยสารละลายการค้าเจริญเติบโตมากที่สุด, รองลงมาคือปลูกในสารละลายน้ำเสียผสมกับสารละลายการค้าอัตรา 50 : 50 และอัตรา 75: 50.

5.4 การบำบัดน้ำเสีย

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของผักกาดหอมที่ปลูกในสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นต่างกัน, พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียบางพารามิเตอร์ค่อนข้างน้อย, อาจเกิดจากในการทดลองปลูกพืชนั้น ปริมาณความเข้มข้นของทีเคเอ็นสูงเกินไป, อาจส่งผลให้รากพืชเปื่อยในช่วงสัปดาห์แรกของการปลูกพืชในรางปลูก. แต่เมื่อเข้าสัปดาห์ที่ 2, ผักกาดหอมเริ่มมีรากงอกพ้นถ้วยปลูก, ความยาวรากที่น้อย อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย.

5.4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในชุดการทดลองที่ 1

โดยมีชุดการทดลองที่ 1 ดังนี้:

การทดลองที่ 1 : สารละลายการค้าของบริษัท เอ ซี เค ไฮโดรฟาร์ม จำกัด.
การทดลองที่ 2 : ปริมาณทีเคเอ็น 230 มก./ล.
การทดลองที่ 3 : ปริมาณทีเคเอ็น 240 มก./ล.
การทดลองที่ 4 : ปริมาณทีเคเอ็น 250 มก./ล.

1. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็นสูงสุด คือ การทดลองที่ 3, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2, 1 และ 4, และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 87.95, 77.79, 66.67 และ 66.60, ตามลำดับ.

2. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงสุด คือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3, 2 และ 4, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ร้อยละ 88.13, 80.73, 79.52 และ 77.72, ตามลำดับ.

3. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุด คือ การทดลองที่ 3, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 4, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 60, 50, และ 25, ตามลำดับ.

4. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดีสูงสุด คือ การทดลองที่ 3, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2, 1 และ 4, ตามลำดับ (ดังรูปที่ 27), และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 28.08, 25.73, 24.14 และ 12.35, ตามลำดับ.

5. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมดสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3, 2 และ 4, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 31.92, 29.96, 23.65, และ 22.54, ตามลำดับ.

6. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยสูงสุด คือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3, 2 และ 4, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 84.43, 60.42, 52.83, และ 52.38, ตามลำดับ.

7. การศึกษาค่าดีโอ, พบว่า ค่าดีโอในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้, การทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 5.22 – 6.55 มก./ล., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 5.04 – 6.45 มก./ล., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 5.62 – 6.43 มก./ล., การทดลองที่ 4 อยู่ในช่วง 5.42 – 6.85 มก./ล.

8. การศึกษาค่าความเป็นกรด–เบส, ค่าความเป็นกรด – เบสน้ำเข้าสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้, การทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 5.84 – 7.59 มก./ล., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 5.58 – 7.75 มก./ล., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 5.28 – 7.68 มก./ล., การทดลองที่ 4 อยู่ในช่วง 5.58 – 7.51 มก./ล.

9. การศึกษาค่าการนำไฟฟ้า, พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าน้ำเข้าสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้, การทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 1.51 – 1.86 mS/cm., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 1.52 – 2.35 mS/cm., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 1.59 – 2.93 mS/cm., การทดลองที่ 4 อยู่ในช่วง 1.64 – 2.86 mS/cm.

5.4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในชุดการทดลองที่ 2

โดยมีชุดการทดลองที่ 2 ดังนี้:

การทดลองที่ 1 : สารละลายการค้าของบริษัท เอ ซี เค ไฮโดรฟาร์ม จำกัด.

การทดลองที่ 2 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : สารละลายสูตรมาตรฐาน อัตรา 50 : 50.

การทดลองที่ 3 : น้ำเสียจากฟาร์มสุกร : สารละลายสูตรมาตรฐาน อัตรา 75 : 25.

1. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็น, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าทีเคเอ็นสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพในการบำบัด คือ ร้อยละ 66.67, 48.23 และ 33.11 ตามลำดับ.

2. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด สูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 99.27, 99.07 และ 98.67, ตามลำดับ.

3. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี, กลุ่มทดลองที่ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3 และ 2, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัดคือ ร้อยละ 33, 30 และ 25, ตามลำดับ.

4. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดีสูงสุดคือ การทดลองที่ 2, รองลงมาคือ การทดลองที่ 3 และ 1, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัดคือ ร้อยละ 58.81, 47.09 และ 19.02, ตามลำดับ.

5. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมด, กลุ่มทดลองที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งทั้งหมดสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 33.62, 29.72 และ 17.56, ตามลำดับ.

6. ประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย, กลุ่มที่มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยสูงสุดคือ การทดลองที่ 1, รองลงมาคือ การทดลองที่ 2 และ 3, ตามลำดับ, และมีประสิทธิภาพการบำบัด คือ ร้อยละ 80, 59.26 และ 52.78, ตามลำดับ.

7. การศึกษาค่าดีโอ, พบว่า ค่าดีโอในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้, การศึกษาค่าดีโอของการทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 5.33 – 6.45 มก./ล., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 5.21 – 6.63 มก./ล., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 5.42 – 6.45 มก./ล.

8. การศึกษาค่าความเป็นกรด – เบส ค่าความเป็นกรด – เบสน้ำเข้าสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้, ค่าพีเอชในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้, การศึกษาค่าพี

เอชของการทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 6.45 – 7.58, การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 4.23 – 6.14, การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 4.24 – 6.55 .

9. การศึกษาค่าการนำไฟฟ้า, พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในถังสารละลายการปลูกพืชไฮโดรโพนิกเป็นดังนี้, การศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของการทดลองที่ 1 อยู่ในช่วง 1.59 – 1.83 mS/cm., การทดลองที่ 2 อยู่ในช่วง 2.02 – 2.44 mS/cm., การทดลองที่ 3 อยู่ในช่วง 1.95 – 3.18 mS/cm.

5.5 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองปลูกพืชด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศทดแทนสารละลายธาตุอาหารพืชนั้น, การนำน้ำเสียมาปลูกพืชควรนำไปกรองด้วยถังกรองทรายก่อนเพื่อให้ได้สารละลายที่ใส, เมื่อปลูกพืชแล้วตะกอนไม่จับกับรากพืช. ในระหว่างการทดลองปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโพนิกแบบ NFT, ในถังสารละลายจะมีการระเหยของน้ำ ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนสารละลายทุกสัปดาห์, จะพบว่า น้ำที่เหลืออยู่ในถังสารละลายมีปริมาณลดลง. เมื่อปริมาณน้ำลดลงด้วยการระเหยนั้น จะมีผลต่อสารละลาย คือ มีความเข้มข้นของค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น, ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียน้อยลง.

การปลูกด้วยสารละลายน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว ค่าพีเอชในสารละลายมีค่าเป็นเบสต้องทำการปรับด้วยกรดไนตริก จึงจะได้ค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการปลูกผักกาดหอม. แต่ถ้ามีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำสารสกัดชีวภาพจากพืชและจากปลา ซึ่งมีค่าพีเอชที่เป็นกรด (พัฒนพิบูล 2546) มาใช้ร่วมกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกร น่าจะทำให้ค่าพีเอชที่ได้เหมาะสมกับการปลูกพืชโดยไม่ต้องใช้กรดไนตริกในการปรับค่าพีเอช. การวิจัยครั้งนี้ไม่ได้ทำการศึกษา เนื่องจาก มีการตรวจพบเอกสารอ้างอิงหลังจากที่ได้ทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว.

6. เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2547. ปัญหาน้ำเสียจากการเกษตรกรรม. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้ http://www.pcd. go.th/Info_serv/water_Agricultural.htm, [เข้าถึงเมื่อ : 20 ก.ค. 2550].

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. คู่มือแนวทางปฏิบัติด้านการผลิตที่สะอาดสำหรับฟาร์มสุกร. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ.

กวมทรัพย์, อำนวย. 2539. ระบบการนำมูลสัตว์กลับมาใช้ประโยชน์ในประเทศญี่ปุ่น. *วารสารสัตวบาล*, **6**(63) หน้า 35-46.

กองโรคติดต่อทั่วไป กรมควบคุมโรคติดต่อ กระทรวงสาธารณสุข. 2551. Atlas of Medical Helminthology. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมโรคติดต่อ.

กองโรคติดต่อทั่วไป กรมควบคุมโรคติดต่อ กระทรวงสาธารณสุข. ม.ป.ป. คู่มือประชาชนความรู้เรื่องโรคหนอนพยาธิ. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมโรคติดต่อ.

กิ่งแก้ว, อัศวิน. 2538. ผลการใช้สารสกัดข่าต่อการควบคุมตัวอ่อนของแมลงวันในมูลสุกร, ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 33 สาขาสัตว์ สัตวแพทยศาสตร์ 30 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2538.

แก้วโบราณ, ศิริอร. 2544. การตอบสนองทางสรีรวิทยาของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไร้ดินโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลทราย. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 203 หน้า.

คันโธ, อุทัย. 2532. การใช้มูลสุกรเป็นอาหารสัตว์, *สุกรสาส์น*, **16**(61), หน้า 21 – 25.

จอกลอย, สนั่น. 2535. สถิติเพื่อการวิจัยทางการเกษตร, กรุงเทพฯ: 187 หน้า.

จันทลักขณา, จรัญและสกุลมั่น, ผกาพรรณ. 2542. ฟาร์มโคนมกับสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ: อักษรสยามการพิมพ์, หน้า 4 - 5.

จิระเกียรติกุล, เยาวพา; พวงจิก, ธัญพิสิษฐ์; วชิรปัทมา, นฤมล; สุทธิธรรม, วิชัย; และโพธิ์ศรี, พิสมัย. 2548. ผลของน้ำสกัดชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้าในระบบการปลูกพืชไม่ใช้ดิน, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, **13**(2) หน้า 13-22.

แซมเพชร, เฉลิมพล. (ม.ป.ป.). สรีรวิทยาพืชไร่. เชียงใหม่: ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัย-เชียงใหม่, หน้า 96 – 101.

ตัณฑุลเวศน์, มั่นสิน. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. กรุงเทพฯ: บริษัท แซนอี 68 คอลซัลติ้ง เอ็นจิเนียร์ จำกัด.

ตัณฑุลเวศม์, มั่นสิน. 2543. คู่มือวิเคราะห์คุณภพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ตัณฑุลเวศม์, มั่นสินและ ตัณฑุลเวศน์, มั่นรักษ์. 2547. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ตันโชติกุล, สกนธ์. 2537. ระบบก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกรและผลพลอยได้, *ข่าวสารเกษตรศาสตร์*, **39**(4) หน้า 37 – 45.

ทองอร่าม, ดิเรก. 2547. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน : หลักการจัดการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย. ราชบุรี: ธรรมรักษ์การพิมพ์. 640 หน้า.

ทับเจริญ, สมโภชน์และคณะ. 2535. การใช้มูลสุกรแห้งและมูลสุกรหลังการหมักก๊าซชีวภาพในอาหารสุกรรุ่น. *สุกรสาส์น*, **19**(74) หน้า 19 – 22.

เนียมคำ, ภิญญดา. 2545. การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียมูลสุกรโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งและถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน. เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 113 หน้า.

บินสมประสงค์, ณัฏฐิดา; ชูเดชวัฒนา, ธนัญชัยและทุมแสน, วิทวัส. 2547. การใช้ Fruit Water จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกพืชโดยระบบ Hydroponics และการปลูกพืชลงดิน. ขอนแก่น. รายงานโครงการของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เปรมปรามอมร, สมพล. 2547. การกำจัดไนโตรเจนโดยใช้พืชต่างชนิดในระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ดินแนวดิ่ง. เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 117 หน้า.

พงษ์ปรีชา, ขนิษฐา. ม.ป.ป. การปลูกพืชผักระบบไฮโดรโปนิกส์, สำนักงานส่งเสริมการเกษตรภาคตะวันออก จังหวัดชลบุรี การปลูกพืชผักระบบไฮโดรโปนิกส์, [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.doae.go.th/library/html/detail/hydroponic/index.htm, [เข้าถึงเมื่อ : 15 ก.ค. 2550].

พัฒนพิบูล, สุรชัย. 2546. ประสิทธิภาพของน้ำสกัดชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของผักบางชนิดในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 113 หน้า

เฟื่องจันทร์, สัมฤทธิ์. 2544. สรีรวิทยาการพัฒนาการพืช. กรุงเทพฯ: คลังนานาวิทยา, หน้า 189 – 404.

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8 . กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ม.ป.ป. เอกสารประกอบการเรียนการสอนเรื่อง ปรสิตวิทยา. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มุ่งธัญญา, บุษยมาส. 2542. การกำจัดแอมโมเนียและฟอสเฟตในน้ำทิ้งชุมชนโดยการแลกเปลี่ยนไอออน. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

รัตนีทู, บัญชา. 2538. การใช้น้ำทิ้งจากการผลิตแก๊สชีวภาพเป็นปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับหญ้ากินนี และถั่วเขียวที่ปลูกบนชุดดินกำแพงแสน. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ มหาบัณฑิตเกษตรศาสตร์ ปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 159 หน้า.

เรืองประพันธ์, ชัชวาล. 2543. สถิติพื้นฐานพร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB SPSS และ SAS. ขอนแก่น: โครงการผลิตตำรา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, พิมพ์ครั้งที่ 5, 510 หน้า.

เลาศรีรัตนชัย, อโณชา. 2531. การจัดการมูลสุกรในฟาร์ม. *สุกรสาส์น*, **14**(55) หน้า 53 – 61.

วิสุทธิแพทย์, ราเชนทร์ และคณะ. 2548. เทคโนโลยีการปลูกพืชไร้ดิน (Soilless Culture). พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

สมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย. 2548. รวมกฎหมายสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ปฏิบัติ, พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย.

ส่วนน้ำเสียเกษตรกรรม สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. 2547. คู่มือเกณฑ์ปฏิบัติในการจัดการและควบคุมกลิ่นจากฟาร์มสุกร. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ.

สุขศรี, อำนวยศิลป์. ม.ป.ป.. การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช. ขอนแก่น: ปริญญาตรี วิชา Crop Physiology ภาควิชาพืชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. เอกสารประกอบการสอนระดับ

สุขุประการ, ประจิม. 2532. หนอนขี้หมูเลี้ยง ปลา เป็ด ไก่ ลดค่าอาหาร 50%. *วารสารสัตว์เศรษฐกิจ*, **7**(130) หน้า 9 – 16.

แสงปัญญา, สุมนชาติและเพ็งพา, วีระพัฒ. 2550. การศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในจังหวัดขอนแก่น *วารสารปศุสัตว์เขต 4*. **11**(24) หน้า 74 – 83.

หม่อมงาม, วราภรณ์ และคณะ. 2548. ผลของการใช้น้ำสกัดมูลสุกรเป็นปุ๋ยทางใบมันสำปะหลังต่อผลผลิตเปอร์เซ็นต์แป้งของหัวมันสำปะหลัง และต่อคุณค่าทางอาหารของมันเส้น. เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43: สาขาพืช วันที่ 1-4 ก.พ. 2548, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

หิรัญ, รตน. 2550. การนำน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสุกรไปใช้ในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 194 หน้า.

เอกสินธุ์, อุไรวรรณ. 2545. การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแบบไร้ออกซิ-เจนในระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานด้วยธูปฤาษีและกกสามเหลี่ยม. เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 133 หน้า.

เอื้องสวัสดิ์, กนิษฐา. 2542. การใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรเพื่อการเกษตร. เชียงใหม่: วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

โอสถสภา, ยงยุทธ. 2528. หลักการผลิตและการใช้ปุ๋ย. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิชจำกัด, หน้า 156 – 168.

โอสถสภา, ยงยุทธ. 2528. หลักการผลิตและการใช้ปุ๋ย. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช จำกัด, หน้า 156 – 168.

โอสถสภา,ยงยุทธ. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 547 หน้า.

Adler, P. R., *et al*. 2003. Mechanistic Approach to Phytoremediation of Water. *Ecological Engineering*, 20, pp. 251 – 264.

Agricultural and Food., 2007. Managing Manure as a Fertilizer, [online]. Available from : http://www.agr.gov.sk.ca/docs/production/manuremanagement.asp, [accessed:15 July 2007].

Agricultural and Food., 2007. Managing Manure as a Fertilizer, [online]. Available from :

Ascariasis.htm, [accessed : 17 July 2007].

Ayres, R. M. and Mara, D. D., 1996. Analysis of Wastewater for use in Agriculture – A Laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological Techniques, World Health Organization, Geneva.

Bazai, Z. A. and Achakzai, A. K. K., 2006. Effect of Wastewater from Quetta City on the Germination and Seedling Growth of Lettuce (*Lactuca sativa* L.), *Journal of Applied Sciences*, **6**(2) pp. 380 – 382.

Boyden and Rababah, A. A., 2007. Reclying Nutrient from Municiple wastewater, [onlinw]. Available from : www. Elsevier.com/local/waters, [accessed 15 July 2007].

Boyden, B. H. and Rababah, A. A., 1996. Reclying Nurient from Municiple Wastewater, *Elsevier Desalination*, **106**, pp. 241 – 246.

Centers for Disease Control and Prevention. 2007. DPDx Laboratory Identification of Parasite of Public Health Concern. [online]. Available from : http://www.dpd.cdc.gov/DPDX/HTML/

Chaves P.A., Laird L.M., Machado A.V., Sutherland R.M. and Beltrao J.G. . 1999. Improved Crop Quality by Nutrient Management. Book series; Developments in Plant and Soil Sciences. Publisher: Springer Netherlands. Lettuce (*Lactuca sativa* sp.) Responses to Shared Aquaculture Media. 197 – 200.

Garland, J. L., *et al.* 2002. Gray water processing in recirculating hydroponic system, *Water Research*, **34**(12) pp. 3075-3086.

http://www.agr.gov.sk.ca/docs/production/manure management.asp, [accessed : 15 July 200].

Juhasze, A. L., *et al*. 2008. Application of an *In Vivo* Swine Model for the Determination of Arsenic Bioavailability in Contaminated Vegetables. *Chemosphere*, **71**, pp. 1963 – 1969.

Lennard, W. A. and Leonard, B. V., 2004. A Comparison of Reciprocating Flow Versus Constant Flow in an Integrated, Gravel bed, Aquaponic Test System. *Aquaculter International*, **12,** pp. 539 – 553.

Lennard, W. A. and Leonard, B. V., 2006. A Comparison of Three Different Hydroponic sub – system (Gravel bed, Floating and Nutrient Film Technique) in an Aquaponic Test System, *Aquaculter International*, **14**, pp. 539 – 550.

Massoud, M. A., Scrimshow, M. D. and Lester, J. N., 2003. Qualitative assessment of the effectiveness of the Mediterranean region. *Ocean&Coastal Management*, **46**, pp. 875-899.

Mavrogianpoulos, G., Vogli, V. and Kyritsis, S., 2002. Use of Wastewater as a Nutrient Solution in a Closed Gravel Hydroponic Culture of Giant Reed (*Arundo donax*), *Bioresource Technology*, **82**(2) pp. 103-107.

Michitsch, R. C., *et al.* 2007. Use of Wastewater and Compost Extracts as Nutrient Sources for Growing Nursery and Turfgrass Species. *Journal Environmental Quality*, **36**, July – August, pp. 1031 – 1041.

Monnet, F., *et al*. 2002. Treatment of Domestic Wastewater using the Nutrient Film Technique (NFT) to Produce Horticultural Roses. *Water Research*, **36**, 14, pp. 3489 – 3496 .

Nelson, N. O. , Mikkelsen, R. L. and Hesterberg, D. L., 2003. Struvite Precipitation in Anaerobic Swine Lagoon Liquid: Effect of pH and Mg:P Ratio and Determination of Rate Constant, *Bioresource Technology*, **89**(3) pp. 229-236.

OMAFRA, 2000. Managing urban nutrients responsibility for crop production, Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Guelph, Ontario.

Perez Rodriguez, J. L., *et al*. 1992. Influence of clay minerals used as supports in anaerobic digester, in the precipitation of struvite. *Water. Research.*, **26**, pp. 497-506.

Rababah, A. A. and Ashbolt, N. J., 2000. Innovate Production Treatment Hydroponic Farm for Primary Municiple Sawage Utilisation. *Water Research*, **34**(3) pp. 825 – 834.

Rababah, A. A. and Ashholt, N. J., 2000. Innovative production treatment hydroponic form for primary municipal sewage utilization. *Water Research*, **34**(3) pp. 825-834.

Shalaby, I. M., Altalhy, A. D. and Mosallam, H. A., 2008. Preliminary Field Study of a Model Plant for Sewage Water Treatment Using Gravel Bed Hydroponics Method. *World Applied Sciences Journal*, **4**(2) pp. 238 – 243.

Snow, A. M. and Ghaly, A. E., 2008a. Use of Barley for the Purification of Aquaculture Wastewater in a Hydroponics System. *American Journal of Environmental Sciences,* **4**(2) pp. 89 – 102.

Snow, A. M. and Ghaly, A. E., 2008b. Assessment of Hydroponically Grown Macrophytes for Their Suitability as Fish Feed. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology,* **4**(1) pp. 43–56.

Speece, R. E., 1996. Anaerobic Biotechnology Archae Press, Nashville Tennessee, USAL in, K. C. and Yand, Z. 1991. Technical review on the UASB Process. *Intern. J. Environmental Studies*, **39**, pp. 203 – 222.

Traka – Mavrona, Ek., Maloupa, E., Papadopoulos, F. and Papadopoulos, A., (n.d.) Response of Greenhouse Tomatoes to Wastewater Fertigation in Soilless Cultivation. ISHS Acta Horticulturae 458: International Symposium on Water Quality & Quantity-Greenhouse.

Vaillant, N., *et al*. 2003. Treatment of Domestic Wastewater by Hydroponic NFT System. *Elsevier Chemosphere*, **50**(1) pp. 121-129.

Vaillant, N., *et al.* 2004. Use of Commercial Plant Species in a Hydroponics System to Treat Domestic Wastewater. *ProQuest Agriculture Journals,* **33**(2) pp. 695 – 702.

West, B. S. and Turnball, J. E., 2007. Swine Manure System, [online]. Available from : http://www.cps.gov.on.ca/english/plans/E 3000/3700/M-3700L.pdf, [accessed : 15 July 2007].

West, B. S. and Turnbull, J. E., 2007. Swine Manure System, [online]. Available from : http://www.cps.gov.on.ca/english/plans/E3000/3700/M-3700L.pdf., [accessed : 15 July 2007].