



ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน
ในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน



ชลิดา ช้างแก้ว

อภินันท์นาการ
จาก

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ. 2544

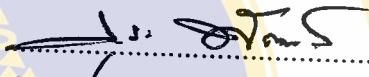
ISBN 974-665-768-2

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล

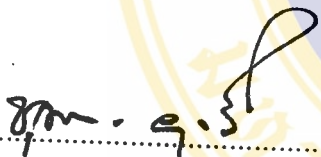
วิทยานิพนธ์
เรื่อง
ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน
ในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน



นางสาวชลิตา ช้างแก้ว
ผู้วิจัย



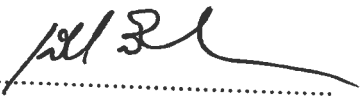
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุระ พัฒนเกียรติ
วท.บ. , วท.ม.
ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



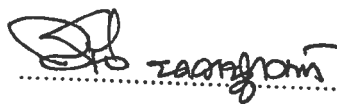
นายชุมพร ยุรี
วศ.บ. , วท.ม.
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

(ลาศึกษาต่อ)

นางสาวปิยะกาญจน์ เทียรทิพย์
วท.บ. , วท.ม.
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



ศาสตราจารย์เลียงชัย ลิ้มล้อมวงศ์ Ph.D.
คณบดี
บัณฑิตวิทยาลัย



นายชาติ นาวานุเคราะห์
วท.บ. , วท.ม. , Ph.D.
ประธานคณะกรรมการประจำหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนา
ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม)
คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

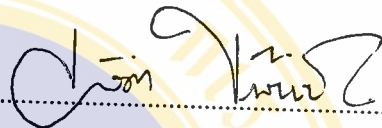
ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน

ในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร)

วันที่ 17 มกราคม พ.ศ. 2544



นางสาวชลิดา ช้างแก้ว

ผู้วิจัย



รองศาสตราจารย์นพดล เรียบเลิศหิรัญ

วท.บ. , วท.ม. , Ph.D.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุระ พัฒนเกียรติ

วท.บ. , วท.ม.

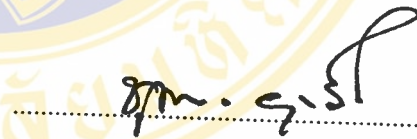
ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ลาศึกษาต่อ)

นางสาวปิยะกาญจน์ เทียชิตทรัพย์

วท.บ. , วท.ม.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



นายชุมพร ยูวรี

วศ.บ , วท.ม.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ศาสตราจารย์เลียงชัย ลิมล่อมวงศ์ Ph.D.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล



รองศาสตราจารย์อนุชาติ พวงสำลี Ph.D.

คณบดี

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เวลาอย่างยาวนานเหลือเกินกว่าจะสำเร็จเป็นเล่มอย่างที่เราเห็นอยู่ที่นี่ได้ และความสำเร็จนี้คงเกิดขึ้นไม่ได้ หากขาดซึ่งความกรุณา และ ความอดทนอย่างยิ่งของท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์สุระ พัฒนเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่เอาใจใส่ดูแล และแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ทั้งคอยกระตุ้น ดักเตือน ด้วยกลวิธีต่างๆ ทั้งไม้อ่อน ไม้แข็ง และที่แข็งแกร่งกว่าไม้ ให้ผู้วิจัยเกิดแรงมานะในการทำงานวิจัยขึ้นนี้ได้สำเร็จ ท่านคงเหนื่อยจริงๆ

ประกอบกับความเมตตาอย่างยิ่งของท่านรองศาสตราจารย์นพดล เรียบเลิศหิรัญ ผู้เป็นมากกว่าท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ทุกครั้งที่ได้พบท่านนอกเหนือจากคำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยแล้ว ยังจะได้แง่คิด และมุมมองในการใช้ชีวิต และการทำงานที่เป็นประโยชน์เป็นของแถมกลับมาเสมอ นอกจากนี้ยังได้รับความเมตตา คำแนะนำและกำลังใจจากอาจารย์ปิยะกาญจน์ เทียรทิพย์ และข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ยิ่งจากอาจารย์ชุมพร บุรี ผู้วิจัยขออน้อมกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านด้วยความเคารพ และสำนึกในพระคุณของท่านเสมอมา

ปัจจัยสำคัญยิ่ง ที่ส่งผลให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลงได้ก็คือ ความรัก ความเมตตา กำลังใจ และกำลังใจจากคุณพ่อธีรพล ผู้เป็นเสมือนธนาคารที่พร้อมให้เงินกู้ที่ไม่ต้องการทั้งเงินต้น และดอกเบี้ย ท่านจึงมี NPL เต็มไปหมด และคุณแม่วรลักษณ์ ผู้ที่คอยเตรียมกับข้าวจานโปรด สูดอโรยไว้รอลูกกลับบ้านทุกครั้ง กับข้าวของแม่สร้างทั้งร่างกาย และแรงใจให้กับลูกคนนี้อย่างตลอด รวมถึงอันเนื่องชายที่รักยิ่งที่คอยดูแลเป็นห่วงถามไถ่ และพร้อมให้การช่วยเหลือเสมอมา

นอกจากนี้ที่ขาดไม่ได้เลยก็คือ เพื่อนๆ AT11 พี่ยุ้ย,แอ๊ะ,ดาว,ยู,ไก่,จูน,เอม,ตา,ต๋อย,ตุ้ย,ป้าเทียน, ป้าเล็ก,พี่สาธิต,เก้,เจ๊เบบ,สิบเอกจ๊าบ,น้องเบน AT12 , พี่ป๊อด AT10 ฯลฯ รวมทั้งพี่ๆ เจ้าหน้าที่ของคณะ สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความเอ็นดูช่วยเหลือมาตลอด โดยเฉพาะพี่ต๋อมฝ่ายการศึกษา หากจะมีความเป็นประโยชน์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้อยู่บ้างก็เป็นด้วยร่างกาย และแรงใจจากทุกท่านที่กล่าวมาแล้ว สำหรับข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นเพราะความไม่ถึงพร้อมของผู้วิจัยเอง และผู้วิจัยขออน้อมรับเอาความผิดนั้นไว้แต่ผู้เดียว

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่อยู่เคียงข้าง และเป็นทุกสิ่งทุกอย่าง เป็นแรงกำลังใจ คอยร่วมทุกข์ร่วมสุขด้วยกันมาตลอด ไม่เคยทอดทิ้งกันสักวันเดียว คนคนนั้นก็คือ

ชลิดา ช้างแก้ว

3937272 ENAT/M : สาขาวิชา : เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร ;

วท.ม. (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร)

คำสำคัญ : การปลูกพืชในสารละลาย / การบำบัดน้ำเสีย / น้ำทิ้งชุมชน

ชลิดา ช้างแก้ว : ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน ในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน (EFFICIENCY OF HYDROPONIC PLANT IN NON-CIRCULATED SYSTEM FOR DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ : สุระ พัฒนเกียรติ, วท.ม., ชุมพร ยูวรี, วท.ม., ปิยะกาญจน์ เทียะธีรทรัพย์, วท.ม., ส.ค. 104 หน้า. ISBN 974-665-768-2

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน ในการบำบัดน้ำทิ้งจากชุมชนที่มีคุณสมบัติของน้ำ , ระดับความลึกน้ำ และช่วงอายุของพืช(ผักคะน้า) ต่างกัน พบว่า ระบบสามารถลดปริมาณ BOD , SS , TP , TKN และไนโตรเจน ได้ 90.92% , 87.52% , 79.15% , 88.93% และ 16.61 % ตามลำดับ

เมื่อทำการทดสอบหาผลของคุณสมบัติของน้ำก่อนเข้าระบบ , ความลึกของน้ำ และช่วงอายุของผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัด พบว่า ระดับความลึกของน้ำ และช่วงอายุของผักคะน้าไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบในทุพารามิเตอร์ แต่คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ประสิทธิภาพในการบำบัด SS และ TKN ของระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบจะสูงกว่าระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ระดับความลึกน้ำ 10 ซม. แต่ประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบ ที่ระดับความลึกเดียวกัน

สำหรับการเจริญเติบโต และผลผลิตของผักคะน้าในทุกชุดการทดลองให้ผลผลิตและมีการเจริญเติบโตต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุมซึ่งได้รับสารละลายธาตุอาหารพืช แต่ผักคะน้าที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ความลึก 10 ซม. มีค่าเฉลี่ยของการเจริญเติบโตและผลผลิตสูงกว่าชุดการทดลองอื่น เมื่อศึกษาการสะสมปริมาณธาตุอาหาร และโลหะหนักในเนื้อเยื่อพืช พบว่าผักคะน้าในทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืชอยู่ในเกณฑ์ปกติ และมีการสะสมโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์การยอมรับให้บริโภคได้ของคณะกรรมการวิชาการร่วม FAO/WHO

3937272 ENAT / M : MAJOR : APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR
RESOURCE DEVELOPMENT ;

M.Sc.(APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR
RESOURCE DEVELOPMENT)

KEY WORDS : HYDROPONICS / WASTEWATER TREATMENT /
DOMESTIC WASTEWATER

CHALIDA CHANGKAEW : EFFICIENCY OF A HYDROPONIC
PLANT IN A NON-CIRCULATED SYSTEM FOR DOMESTIC
WASTEWATER TREATMENT. THESIS ADVISORS : SURA
PATTANAKIAT, M.Sc., PIYAKARN TIATISARP, M.Sc., CHUMPORN
YUWAREE, M.Sc. 104 P. ISBN 974-665-768-2

The study was proposed to measure the efficiency of a hydroponic plant with a non-circulated system for domestic wastewater treatment . The parameters used were different levels of water quality , water depth and different periods of growth of Chinese kale .

It was found that the quantity of BOD , SS , TP , TKN and nitrate-nitrogen to 90.92% , 87.52% , 79.15% , 88.93% and 16.61% could be reduced.

For a pre-treatment wastewater system, water depth and Chinese kale age were not found to be significant in treating efficiently all parameters. But in comparing water depth of 10 cm., between raw wastewater treatment system and pre-treatment wastewater treatment system , removal efficiency of SS and TKN of raw wastewater was higher. The removal efficiency of TP pre-treatment wastewater was higher than in the raw wastewater system.

It was revealed that the growth rate and production of Chinese kale in pre-treatment wastewater , at 10 cm. of water depth, was higher than the other system. The nutrients and heavy metal content were acceptable under the standard of the FAO and the WHO.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ	1
1.2 กรอบแนวคิดในการศึกษา	4
1.3 วัตถุประสงค์	5
1.4 สมมติฐานการศึกษา	5
1.5 ขอบเขตการศึกษา	5
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.7 นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในการศึกษา	6
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	
2.1 น้ำทิ้ง	7
2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้พืช	14
2.3 การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน	20
2.4 ธาตุอาหารพืช	27
2.5 บทบาทของโลหะหนัก	29
2.6 ชนิดของพืชในการทดลอง	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุอุปกรณ์	35
3.2 การวางแผนการทดลอง	37

สารบัญ (ต่อ)

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	38
3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการศึกษาทดลอง	45
4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบการปลูกพืชในสารละลาย	47
4.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับน้ำเสีย ที่มีคุณสมบัติต่างกัน	56
4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับน้ำเสีย ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันที่ระดับความลึกของน้ำต่างกัน	59
4.5 ผลการศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณการสะสมธาตุ อาหารพืช และโลหะหนักในผักคะน้า	63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 แนวทางที่เหมาะสมในการนำระบบการปลูกพืชในสารละลายมา ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน	75
5.3 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการวิจัย	75
5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก ก	81
ภาคผนวก ข	93
ประวัติผู้วิจัย	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 ปริมาณของธาตุอาหารพืชบางชนิดที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน	2
2-1 แหล่งที่มาของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส	9
2-2 ลักษณะบางประการของน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน	12
2-3 คุณภาพน้ำทิ้งของมหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลายาก่อนบำบัด	14
2-4 ปริมาณธาตุอาหารในแหล่งน้ำบางประเภท	29
2-5 ปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยที่พบในธรรมชาติ	32
2-6 แสดงคุณค่าทางอาหารของผักคะน้าในส่วนที่กินได้ปริมาณ 100 กรัม	33
3-1 คำนี้อุณหภูมิ น้ำ ธาตุอาหารพืช โลหะหนัก และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	43
4-1 คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ศึกษาทดลอง	46
4-2 ปริมาณธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในน้ำที่ศึกษาทดลอง	47
4-3 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลาย ที่ได้รับน้ำเสียดิบที่ความลึก 10 ซม.	48
4-4 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลาย ที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ความลึก 10 ซม.	50
4-5 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลาย ที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ความลึก 30 ซม.	53
4-6 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลาย ที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ความลึก 50 ซม.	55
4-7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของ ระบบการปลูกพืชที่ได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกันที่ความลึก 10 ซม.	57
4-8 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของระบบที่มีความลึกต่างกัน	60
4-9 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบที่มีความลึกต่างกัน	61
4-10 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบที่มีความลึกต่างกัน	62
4-11 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบที่มีความลึกต่างกัน	62
4-12 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรท ของระบบที่มีความลึกต่างกัน	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-13 แสดงค่าเฉลี่ยของการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณ การสะสมธาตุอาหารพืช และโลหะหนักของผักคะน้า	66
4-14 แสดงผลผลิต น้ำหนักสดต่อหน่วยทดลอง และผลผลิตต่อตารางเมตรของผักคะน้า	68
4-15 ปริมาณโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่มีปนเปื้อนในอาหาร และยอมรับให้บริโภคได้สูงสุด	71



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 รูปแบบของระบบการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืชบางระบบ	16
2-2 กระบวนการชีวเคมีของไนโตรเจน	17
2-3 การเปรียบเทียบปริมาณของ BOD และ TSS ก่อนและหลังผ่านระบบการปลูกพืชในสารละลาย	19
2-4 ระบบการปลูกพืชโดยให้รากอยู่ในอากาศ	20
2-5 ระบบการปลูกพืชโดยใช้วัสดุปลูก	21
2-6 ระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียนชนิดไม่เติมอากาศ	22
2-7 ระบบการปลูกพืชในสารละลายระบบไม่หมุนเวียนชนิดเติมอากาศ	23
2-8 การปลูกพืชในสารละลายแบบหมุนเวียนแบบ Nutrient Film Teechnique	24
2-9 การปลูกพืชในสารละลายแบบหมุนเวียนแบบ Nutrient Flow Technique	24
3-1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลองบริเวณระบบบำบัดน้ำทั้งมหาวิทยาลัยมหิดล	36
3-2 แผนผังการจัดแปลงทดลองและตำแหน่งของชุดการทดลอง แท่งทรายและเครื่องปั๊มอากาศ	39
3-3 ตำแหน่งของการเจาะช่องเพื่อการปลูกพืช และตำแหน่งของช่องต่อสารเติมอากาศ	40
3-4 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งของการจัดวางพืชในชุดการทดลอง	41
3-5 ลักษณะโครงสร้างโรงเรือนที่ใช้ทดลอง	41
4-1 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียดิบที่ความลึก 10 ซม.	49
4-2 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ความลึก 10 ซม.	52
4-3 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ความลึก 30 ซม.	54
4-4 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ความลึก 50 ซม.	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทรัพยากรน้ำ มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ รวมทั้งมนุษย์ ซึ่งได้ใช้ประโยชน์จากน้ำทั้งเพื่อการอุปโภค บริโภค การประกอบกิจกรรมทางการเกษตร และอุตสาหกรรมต่างๆ แต่จากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ทำให้ความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่แหล่งน้ำมีจำกัด ประกอบกับพื้นที่ป่าไม้ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของแหล่งน้ำมีลดน้อยลง จนเกิดมีพื้นที่แห้งแล้งทั่วโลกเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 ของพื้นที่ทั้งหมดในปัจจุบัน จากร้อยละ 10 ในการสำรวจเมื่อ 30 ปีที่ผ่านมา (1) ทำให้มีแนวโน้มการเกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำในอนาคต นอกจากนี้การใช้ประโยชน์จากน้ำในกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ทำให้คุณลักษณะของน้ำเปลี่ยนแปลงไป และไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังเดิม จึงทำการระบายทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ แม้ว่าโดยปกติแหล่งน้ำจะมีความสามารถในการฟื้นฟูสภาพ (Self purification) แต่ปริมาณการใช้น้ำที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของน้ำทิ้งมีมาก เกินความสามารถของแหล่งน้ำที่จะรองรับน้ำทิ้งได้ (Carrying capacity) ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้นๆ (2)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัญหาเรื่องน้ำ โดยพื้นฐานมี 2 ประการสำคัญ คือ ปัญหาด้านปริมาณน้ำ และปัญหาด้านคุณภาพน้ำ สาเหตุหนึ่งของการขาดแคลนปริมาณน้ำ เกิดขึ้นเพราะน้ำในแหล่งน้ำต่างๆ มีคุณภาพต่ำลง ทำให้ปริมาณของน้ำคุณภาพดีในธรรมชาติ ที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์มีลดลง (3) ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ โดยอาศัยการจัดการน้ำในด้านการจัดหา น้ำควบคู่กับการจัดการด้านคุณภาพน้ำ

จากการสำรวจพบว่า น้ำเสียที่ก่อให้เกิดปัญหาแก่สิ่งแวดล้อม เกิดจากน้ำทิ้งชุมชนถึงร้อยละ 75 ในขณะที่เกิดจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมร้อยละ 25 (4) โดยปริมาณน้ำทิ้งของชุมชนที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 70-90 ของปริมาณการใช้น้ำประปาของชุมชน (5) ซึ่งส่วนประกอบที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งชุมชนโดยทั่วไปมีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิต และกิจกรรมต่างๆ ในการดำรงชีวิตของคนในชุมชน สารปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากชุมชน ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ สารอนินทรีย์สังเคราะห์ เช่น ผงซัก

ฟอก และยาฆ่าแมลง สารประกอบอนินทรีย์เคมี ตะกอน จุลินทรีย์บางชนิด และธาตุอาหารพืช เช่น สารประกอบไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (6)

ธาตุอาหารพืชที่พบในน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนมีลักษณะบางประการแสดงดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ปริมาณ ของธาตุอาหารพืชบางชนิด ที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน

องค์ประกอบ	ปริมาณ (มิลลิกรัม/ลิตร)
ไนโตรเจน	20-85
ฟอสฟอรัส	4-15
คลอไรด์	20-50
ซัลเฟต	15-30
โซเดียม	40-70
โปแตสเซียม	7-15
แคลเซียม	15-40
แมกเนเซียม	15-40
โบรอน	0.1-0.4

ที่มา: เกรียงศักดิ์, 2539 (45)

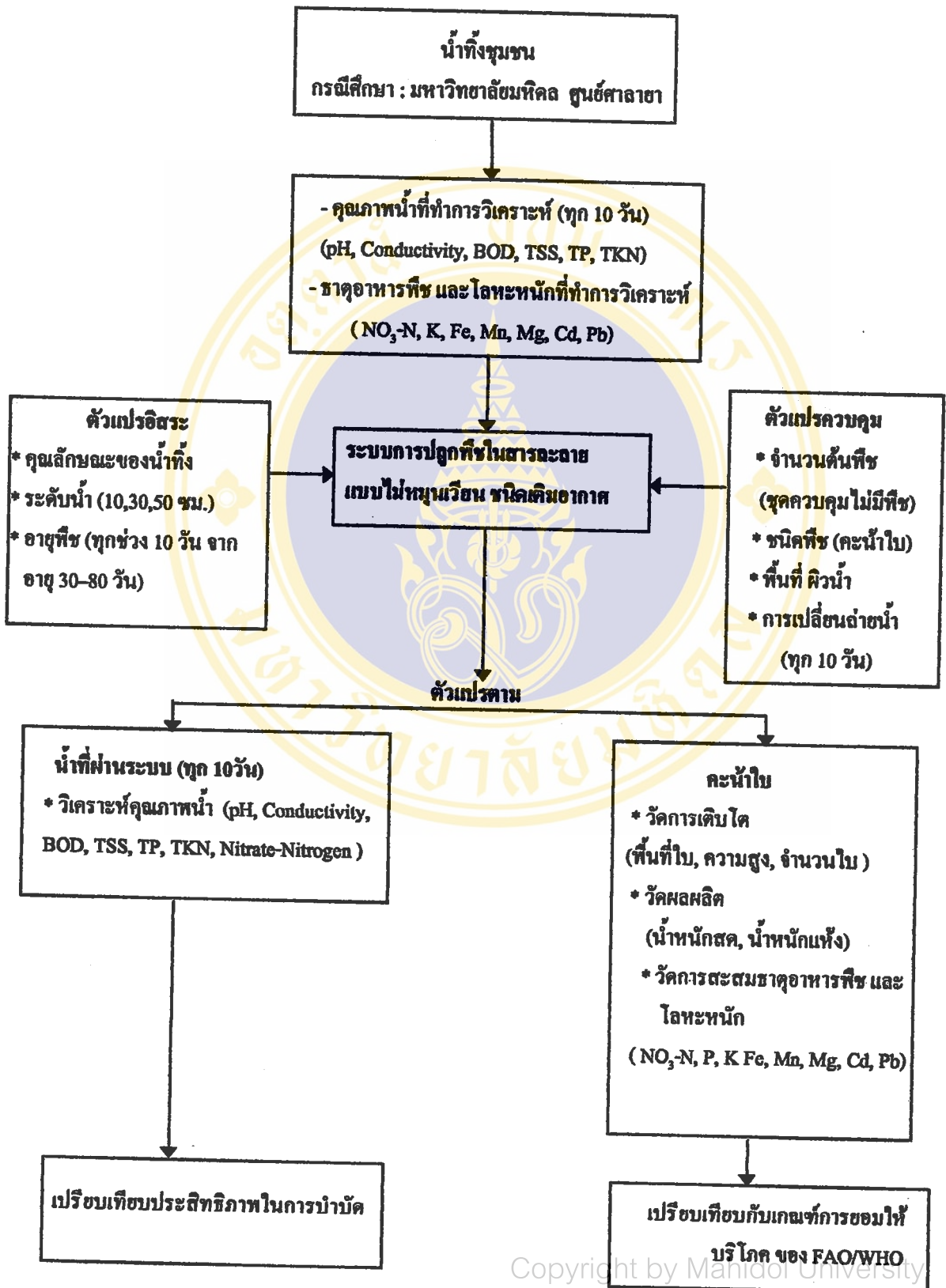
เมื่อมีปริมาณธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำมากจะก่อให้เกิดปัญหา Eutrophication เนื่องจากทำให้มีแพลงก์ตอน และพืชน้ำเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อคุณภาพน้ำ และระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำนั้นๆ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นแนวทางไปสู่การนำพืชน้ำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงได้มีการศึกษาหาแนวทาง ในการนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์แก่พืช หรือการนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร โดยเฉพาะการปลูกพืช ซึ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มผลผลิตการเกษตร และลดค่าใช้จ่ายด้านปุ๋ยเคมี ทั้งยังเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดผลดีทั้งทางเศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม (7)

ระบบการปลูกพืชในสารละลาย (Hydroponics) หรือการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน เป็นรูปแบบหนึ่งในการเพิ่มผลผลิตการเกษตร ให้พอเพียงต่อความต้องการอาหารที่เพิ่มสูงขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของประชากร เป็นกิจกรรมที่ต้องการธาตุอาหารพืชในรูปของสารละลาย มาใช้เพื่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของน้ำทิ้งชุมชน ที่มีธาตุอาหารพืชปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ทำให้มีการศึกษาการนำน้ำทิ้งชุมชนมาใช้ในการปลูกพืชในระบบ Hydroponics แทนสารละลายธาตุอาหารพืช เช่น การปลูกผักคะน้าด้วยน้ำเสียจากบึงมักกะสัน (8) การปลูกแตงกวา มะเขือเทศ และพืชประเภท ผักกาด โดยการใช้น้ำทิ้งจากชุมชน (9, 10, 11) ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่า ผักที่ได้จากการผลิตโดย

การใช้น้ำทิ้งจากชุมชน มีปริมาณการสะสมธาตุอาหาร และโลหะหนัก อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับให้บริโภคได้ และไม่แตกต่างกับปริมาณของธาตุชนิดเดียวกันกับพืชที่ปลูกในดิน รวมทั้งสามารถลดปริมาณธาตุอาหารและ โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งได้ จากการศึกษาของ Jewel, 1994 (12) และ Nkuchia, 1994 (13) พบว่า การนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์การเกษตร เป็นวิธีการบำบัดน้ำที่มีค่าใช้จ่ายสุทธิต่ำกว่าการใช้วิธีอื่นๆ จากผลการศึกษาดังกล่าวเห็นได้ว่า แนวทางในการนำระบบการปลูกพืชในสารละลายมาใช้น้ำทิ้ง ในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน เป็นวิธีที่เป็นไปได้ และเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการทรัพยากรน้ำให้เกิดประโยชน์เต็มประสิทธิภาพ แต่มีปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณา คือ ประสิทธิภาพในการบำบัด ลักษณะของน้ำทิ้งที่เหมาะสมจะใช้ในระบบ และ ปริมาณการสะสมธาตุอาหาร และ โลหะหนักในพืช ที่จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภค

จากแนวคิดข้างต้น จึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน และปริมาณการสะสมธาตุอาหาร และ โลหะหนักในพืช ของระบบการปลูกพืชในสารละลาย โดยศึกษาเปรียบเทียบคุณลักษณะของน้ำทิ้ง 2 ลักษณะ คือ น้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านการบำบัด (Raw Wastewater) กับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว (Primary Treated Wastewater) ซึ่งทำการศึกษาที่ระดับความลึกน้ำ 3 ระดับ คือ 10 , 30 และ 50 เซนติเมตร เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการพิจารณาถึงความเหมาะสม และความเป็นไปได้ ในการดำเนินระบบดังกล่าวต่อไป

1.2 กรอบแนวคิดในการศึกษา



1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชนของระบบการปลูกพืชในสารละลาย ที่ได้รับน้ำทิ้ง ซึ่งมีคุณลักษณะของน้ำ และระดับความลึกต่างกัน ในทุกช่วง 10 วัน ของอายุผักคะน้า

1.3.2 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืช และ โลหะหนัก ในผักคะน้า ที่ปลูกด้วยระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำทิ้ง ซึ่งมีคุณลักษณะของน้ำ และระดับความลึกต่างกัน

1.3.3 เพื่อศึกษาหาแนวทางที่เหมาะสม ในการนำระบบการปลูกพืชในสารละลายมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน

1.4 สมมติฐานการศึกษา

1.4.1 ระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำทิ้งซึ่งมีคุณลักษณะ และระดับความลึกต่างกัน จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกัน

1.4.2 พืชที่ปลูกด้วยระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำทิ้งซึ่งมีคุณลักษณะของน้ำ และระดับความลึกต่างกัน จะมีการเติบโตและมีปริมาณการสะสมธาตุอาหารและ โลหะหนักแตกต่างกัน

1.5 ขอบเขตการศึกษา

1.5.1 เป็นการศึกษาในระบบต้นแบบทดลองขนาดเล็ก สภาพเรือนทดลอง

1.5.2 ศึกษาเฉพาะ ระบบการปลูกพืชในสารละลาย แบบไม่หมุนเวียน ชนิดเดิมอากาศ

1.5.3 พืชที่ใช้ในการศึกษา คือ คะน้าใบ (*Brassica oleracea* L. var *alboglabra* Barley) อายุ 30 วัน

1.5.4 ตัวอย่างน้ำทิ้งชุมชนที่ใช้ในการศึกษา คือ น้ำทิ้งมหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลา โดยใช้น้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านระบบบำบัดหรือน้ำทิ้งดิบ (Raw Wastewater) และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น (Primary Treated Wastewater)

1.5.5 คุณภาพน้ำที่ทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ทุก 10 วัน ได้แก่ pH, Conductivity, BOD, TSS, TP และ TKN

1.5.6 ธาตุอาหารพืช และ โลหะหนักที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ $\text{NO}_3\text{-N}$, P, K, Fe, Mn, Mg,

- 1.5.6 ธาตุอาหารพืช และโลหะหนักที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ $\text{NO}_3\text{-N}$, P, K, Fe, Mn, Mg, Cd, และ Pb

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทราบประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน ชนิดเดิม
อากาศ ที่ได้รับน้ำทิ้งซึ่งมีคุณลักษณะต่างกัน และมีระดับความลึกที่ต่างกัน
- 1.6.2 ทราบปริมาณการสะสมธาตุอาหาร และ โลหะหนักในพืชที่ปลูกด้วยระบบการปลูกพืชใน
สารละลาย ที่ได้รับน้ำทิ้งต่างระดับ
- 1.6.3 ทราบแนวทางและความเหมาะสม ในการนำระบบการปลูกพืชในสารละลาย มาใช้เพื่อ
การบำบัดน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน

1.7 นิยามคำศัพท์ที่ใช้ในการศึกษา

ระบบการปลูกพืชในสารละลาย หมายถึง ระบบการปลูกพืชในสารละลาย แบบไม่หมุนเวียน
ชนิดเดิมอากาศ

น้ำทิ้งดิบ หมายถึง น้ำทิ้งจากมหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด
ของมหาวิทยาลัย

น้ำทิ้งผ่านการบำบัดขั้นต้น หมายถึง น้ำทิ้งจากมหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา ที่ได้รับ
การเติมอากาศ และตกตะกอนด้วยสารส้ม

BOD หมายถึง ค่าความสกปรกในรูปของ บีโอดี

TSS หมายถึง ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ (Total Suspended Solids)

TP หมายถึง ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)

TKN หมายถึง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ในรูปของทีเคเอ็น

ประสิทธิภาพในการบำบัด หมายถึง ความสามารถในการลดปริมาณสิ่งปนเปื้อน ในรูปของ
BOD, TSS, TP, TKN และ Nitrate-Nitrogen ซึ่งแสดงเป็นค่าร้อยละที่ได้จากการคำนวณจากสูตร (37)

ค่าร้อยละของประสิทธิภาพ = $\frac{\text{มิลลิกรัม/ลิตร (ก่อนบำบัด)} - \text{มิลลิกรัม/ลิตร (หลังบำบัด)}}{\text{มิลลิกรัม/ลิตร (ก่อนบำบัด)}} \times 100$
ในการบำบัด

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 น้ำทิ้ง (Wastewater)

2.1.1 ความหมาย

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำจากแหล่งน้ำ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง บึงน้ำต่างๆ รวมถึงน้ำทะเล ที่ผ่านการนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ เช่น การอุปโภค บริโภค การเกษตรกรรม และ อุตสาหกรรม เป็นต้น ทำให้มีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ในน้ำที่ใช้แล้ว หรือทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ไม่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ของมนุษย์ โดยปริมาณสิ่งสกปรกของน้ำทิ้งจะขึ้นกับกิจกรรมการใช้น้ำ และหากปริมาณของสิ่งเจือปนในน้ำมีมากจะทำให้เกิดภาวะเน่าเสียของน้ำ (5, 6)

2.1.2 ประเภทของสิ่งปนเปื้อนในน้ำทิ้ง

สิ่งปนเปื้อนในน้ำทิ้งมีมากมายหลายชนิด เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี ในน้ำทิ้งแต่ละประเภทอาจมีสิ่งปนเปื้อนเหมือนหรือต่างกัน ขึ้นกับลักษณะกิจกรรมในการใช้น้ำ (23) ประเภท และปริมาณของสิ่งปนเปื้อนในน้ำทิ้ง เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดน้ำเสีย และมีความสำคัญในการพิจารณาเลือกวิธีที่เหมาะสม เพื่อกำบัด ประเภทของสิ่งปนเปื้อนในน้ำทิ้งสามารถแบ่งออกได้ 8 ประเภทใหญ่ๆ (6, 22) ได้แก่

1. สารที่ต้องการออกซิเจนช่วยในการย่อยสลาย (Oxygen demanding wastes)

สารที่ต้องการออกซิเจนมีทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ แต่โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งสารประเภทนี้ได้ 3 ประเภท

1.1 สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีไนโตรเจน ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ที่มี

คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นองค์ประกอบ เช่น แป้ง น้ำตาล และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ สารอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ โดยใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาชีวเคมี เกิดพลังงานในการดำรงชีวิต

1.2 สารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ที่มีไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน สารประกอบอนินทรีย์ พวกไนไตรท์ และแอมโมเนีย ซึ่งสารประกอบเหล่านี้

นี้ใช้เป็นอาหารของแบคทีเรียบางชนิด โดยใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยา ได้สารประกอบไนเตรดและพลังงาน

1.3 สารประกอบอนินทรีย์บางชนิด เช่น เฟอร์รัส (Fe^{++}) , ซัลไฟด์ (S^{--}) , ซัลไฟต์ (SO_3) ซึ่งสารประกอบประเภทนี้ สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำได้โดยตรง สารปนเปื้อนประเภทนี้ เป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของน้ำเสื่อมโทรมลง และปรากฏผลเสียได้เร็วกว่าสาเหตุอื่น Fonselius, 1978 (อ้างใน 22) กล่าวว่า “แม้สารอินทรีย์จะเป็นอาหารของพืชโดยตรง แต่เมื่อเปรียบเทียบความเสียหาย และประโยชน์แล้ว จะเห็นว่า ก่อให้เกิดความเสียหายมากกว่า”

2. สารอินทรีย์เคมีสังเคราะห์ (Synthetic organic chemical)

สารอินทรีย์เคมีสังเคราะห์ หมายถึง สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเริ่มรู้จักแพร่หลายในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นต้นมา โดยสารแต่ละชนิดจะมีสมบัติต่างกัน ตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ และประโยชน์การใช้สอย ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างกัน ส่วนสารประเภทนี้ที่ได้รับความสนใจมาก คือ ยาปราบศัตรูพืช (Pesticide) และ ผงซักฟอก (Detergen)

3. สารอนินทรีย์เคมีและแร่ธาตุต่างๆ (Inorganic chemical and substances)

สารอนินทรีย์เคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ มีหลายรูป ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ กรดแร่ ค่าง และโลหะ เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำ บางชนิดไม่ละลายน้ำ สารอนินทรีย์เคมีจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำทั้งทางกายภาพ และเคมี เช่น ทำให้น้ำมีความเป็นกรด ค่าง มีความเค็ม ความขุ่น ความกระด้าง หรือทำให้สีและรสชาติของน้ำเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นกับชนิด และสมบัติของสารอนินทรีย์แต่ละประเภท ซึ่งความเป็นพิษจะขึ้นกับชนิด และปริมาณ หรือความเข้มข้นของสาร แต่ที่ก่อให้เกิดปัญหามาก ได้แก่ โลหะหนัก และเกลือของโลหะหนัก

4. ของแข็ง และตะกอน (Solids and sediments)

ของแข็งในน้ำทั้งของแข็งอินทรีย์ และของแข็งอนินทรีย์ที่เหลืออยู่เมื่อระเหยน้ำออกจนหมด รวมกันเรียกว่า ของแข็งทั้งหมด (Total solid) ซึ่งจะมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ

4.1 ของแข็งที่ละลายน้ำ (Dissolved solid) คือ ของแข็งส่วนที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ เช่น ผงซักฟอก , เกลือแกง และสารอินทรีย์บางชนิด เช่น น้ำตาล เป็นต้น

4.2 ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble solid) คือ ของแข็งที่ไม่ถูกทำละลายด้วยน้ำ ซึ่งรวมถึงตะกอน (sediment) ฝุ่นละออง ดิน ทราย และเศษแร่ ต่างๆ ที่ไม่ละลายน้ำ สามารถแบ่งย่อยออกได้ 2 ประเภท คือตะกอนแขวนลอย (Suspended solid) และตะกอนหนัก (Settleable solid)

5. สารที่เป็นธาตุอาหารพืช (Plant nutrient)

ธาตุอาหารพืช หมายถึง ธาตุที่พืชต้องการ และจำเป็นต้องใช้ในการดำรงชีวิต ได้แก่ ออกซิเจน ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม กำมะถัน แมกนีเซียม เหล็ก แคลเซียม เป็นต้น โดยปกติธาตุอาหารเหล่านี้ถูกพาลงแหล่งน้ำโดยขบวนการธรรมชาติ เช่น การชะล้างพังทลายของดิน การถูกน้ำพัดพา หรือจากการสลายตัวของพืช และสัตว์น้ำที่ตาย เป็นต้น ธาตุอาหารเป็นปัจจัยจำกัดในการเจริญเติบโตอย่างหนึ่งของพืช ถ้าแหล่งน้ำได้รับสารอาหารเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความต้องการของพืชบางชนิด จะทำให้พืชชนิดนั้นมีการเจริญเติบโต และเพิ่มจำนวนมากกว่าปกติเกิดผลเสียต่อแหล่งน้ำ หรือที่เรียกว่า Eutrophication ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำ และทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงเนื่องจากการเพิ่มสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ โดยธาตุอาหารพืชสองชนิด ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิด Eutrophication คือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งคาดประมาณว่า ร้อยละ 80 ของไนโตรเจน และร้อยละ 75 ของฟอสฟอรัสมาจากกิจกรรมการใช้น้ำของมนุษย์ โดยร้อยละ 70 ของฟอสฟอรัส มาจากการใช้ผงซักฟอกของบ้านเรือน แหล่งที่มาของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในแหล่งน้ำ แสดงไว้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แหล่งที่มาของไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

แหล่งที่มา	ฟอสฟอรัส (ล้านตัน/ปี)	ไนโตรเจน (ล้านตัน/ปี)
ขบวนการธรรมชาติ	245-711	1,035-4,210
กิจกรรมของมนุษย์		
น้ำทิ้งจากชุมชนและอุตสาหกรรม	387-446	1,330
น้ำที่ไหลผ่านเมือง	19	200
พื้นที่เกษตรกรรม	111-380	2,040
พื้นที่ปศุสัตว์	170	420
รวม	931-1,726	5,025-8,200

ที่มา: Stocker and Seager, 1976 (อ้างใน 22)

6. สิ่งที่ทำให้เกิดโรคภัย (Disease causing agents)

สิ่งปนเปื้อนในน้ำที่ก่อให้เกิดโรคภัย ได้แก่ เชื้อจุลินทรีย์ และเชื้อโรคต่างๆ ที่ดำรงชีวิตอยู่ในน้ำ ซึ่งปนเปื้อนกับสิ่งขับถ่ายของมนุษย์ และก่อให้เกิดการระบาดของโรค เช่น บิด อหิวาตกโรค ไข้รากสาด รวมถึงโรคในระบบทางเดินอาหารและพยาธิชนิดต่างๆ

7. สารกัมมันตภาพรังสี (Radioactive substances)

สารกัมมันตภาพรังสี คือ สารที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอม เพื่อเกิดนิวเคลียสใหม่ที่มีความเสถียรมากกว่า โดยในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจะเปล่งรังสีออกมา รังสีที่เปล่งออกมาเมื่อมากระทบกับสิ่งมีชีวิต จะทำให้เนื้อเยื่อเซลล์สิ่งมีชีวิตถูกทำลาย และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์สืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดการกลายพันธุ์ (Mutation) รังสีนี้มีคุณสมบัติในการสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งต้องใช้เวลาดังกัน ขึ้นกับชนิดของสารต้นกำเนิด แต่รังสีดังกล่าวไม่สามารถทำลายได้โดยวิธีทางฟิสิกส์ เคมี หรือชีววิทยา จากการสำรวจพบว่า เปลือกโลกมีสารที่ให้กัมมันตภาพรังสีมากกว่า 60 ชนิด ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แต่ที่มนุษย์ผลิตขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ มีมากกว่าในธรรมชาติ (1)

8. ความร้อน (Heat)

ความร้อนที่ถูกถ่ายเทลงสู่แหล่งน้ำ มักเกิดจากการระบายน้ำ ที่ใช้ระบายความร้อนของเครื่องจักรกล หรือที่เรียกว่า น้ำหล่อเย็น ในโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้น้ำทิ้งมีอุณหภูมิสูง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในแหล่งรองรับน้ำทิ้ง ซึ่งอุณหภูมิสูงจะมีผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดต่ำลง และทำให้แหล่งน้ำนั้นไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ถ้ามีอุณหภูมิสูงมากสัตว์น้ำและพืชน้ำ ก็จะตาย

2.1.3 แหล่ง และประเภทของน้ำทิ้ง

ประเภทของน้ำทิ้ง สามารถจำแนกออกตามแหล่งกำเนิดได้ 3 ประเภท คือ

1. น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน(Domestic wastewater) หมายถึง น้ำที่ผ่านกิจกรรมการใช้ประโยชน์ จากแหล่งชุมชนต่างๆ ได้แก่ น้ำทิ้งจากบ้านพักอาศัย ร้านค้า ตลาด โรงแรม สถานที่ราชการ ฯลฯ ซึ่งเกิดจากการใช้น้ำในกิจวัตรประจำวันของมนุษย์ เช่น การอาบน้ำ ชักผ้าล้างภาชนะ และการขับเคลื่อนสิ่งปฏิกูล สิ่งสกปรกในน้ำทิ้งประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์

2. น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม(Industrial wastewater) หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้งานในขั้นตอน หรือขบวนการอุตสาหกรรม ของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น การ

ล้างวัตถุดิบ ล้างเครื่องจักรกล ระบายความร้อนเครื่องจักรกล สิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำมีทั้งสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ ขึ้นกับลักษณะการใช้น้ำ และชนิดของโรงงาน

3. น้ำทิ้งจากพื้นที่เกษตรกรรม (Agriculture Wastewater) หมายถึง น้ำทิ้งจากการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมการเกษตร เช่น น้ำทิ้งจากคอกปศุสัตว์ รวมถึงน้ำที่ชะผ่านพื้นที่เพาะปลูก และพืคพาสาเรเคมีที่ใช้ในการเกษตรลงสู่แหล่งน้ำ สิ่งสกปรกส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ปุ๋ยเคมี สารเคมีกำจัดศัตรูพืช และสิ่งปฏิกูลจากการเลี้ยงสัตว์

2.1.4 น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน (Domestic wastewater)

น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ น้ำส้วม (Toilet waste) เป็นน้ำที่มีสิ่งปฏิกูลปนเปื้อนอยู่ และน้ำทิ้งจากกิจกรรมอื่นๆ (Sullage) ซึ่งเป็นน้ำที่ผ่านการใช้ในการซักล้าง การชำระล้างร่างกาย และประกอบอาหาร เป็นต้น (5, 25)

ปริมาณของน้ำทิ้งจากชุมชน จะมีความแตกต่างกันตามลักษณะของกิจกรรมการใช้น้ำของชุมชน ประเภทของอาคาร ลักษณะของระบบประปา รวมทั้งมาตรฐานการครองชีพของชุมชน พบว่า ในกลุ่มชุมชนที่มีมาตรฐานการครองชีพสูง จะมีการใช้น้ำมากกว่ากลุ่มที่มีมาตรฐานการครองชีพต่ำกว่า โดยเฉลี่ยแล้วปริมาณน้ำทิ้งจากชุมชนจะมีค่าประมาณ ร้อยละ 70-90 ของปริมาณการใช้น้ำประปาของชุมชน

ลักษณะของน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน โดยส่วนใหญ่จะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 7 สิ่งปนเปื้อนที่สำคัญ คือ สารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ นอกจากนี้ยังมีสาร อนินทรีย์ ทั้งที่เป็นของแข็งและสารละลาย รวมทั้งเชื้อโรคและพยาธิปนอยู่ด้วย ปริมาณและชนิดของสิ่งปนเปื้อนบางประการในน้ำทิ้งจากชุมชน แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ลักษณะบางประการของน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน

องค์ประกอบ	ปริมาณการปนเปื้อน	
	มิลลิกรัม/ลิตร	กรัม/คน/ลิตร
BOD ₅	110-400	80-120
COD	1.75 x BOD ₅	1.75x BOD ₅
TOC	0.8 x BOD ₅	0.8 x BOD ₅
Total Solid	250-1,200	170-220
Total Suspended Solid	100-350	70-145
Settleable Solids	5-20	-
Grit	-	5-15
Grease	50-150	10-30
Total Nitrogen, as N	20-85	6-12
- Orgainc Nitrogen	0.4 x Total-N	0.4 x Total-N
- Ammonia Nitrogen	0.6 x Total-N	0.6 x Total-N
- Nitrate Nitrogen	(0-0.5) x Total-N	(0-0.5) x Total-N
Total Phosphorus, as P	4-15	0.6-4.5
- Organic Phosphorus	0.3 x Total-P	0.3 x Total-P
- Inorganic Phosphorus	0.7 x Total-P	0.7 x Total-P
Total Alkalinity, as CaCO ₃	50-200	20-30
Chlorides as Cl	20-50	4-8
Sulfate as SO ₄	15-30	-
Nitrate as NO ₃	20-40	-
Phosphate as PO ₄	20-40	-
Sodium as Na	40-70	-
Potassium as K	7-15	-
Calcium as CaCO ₃	15-40	-
Magnesium as CaCO ₃	15-40	-
Boron as B	0.1-0.4	-
Total Dissolved Solids	100-300	-

ผลกระทบของน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน ต่อสิ่งแวดล้อม ในการถ่ายเทน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกก่อน ได้แก่

- ผลกระทบในด้านสาธารณสุข เนื่องจากน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนที่มีการปนเปื้อนของเชื้อโรค อาจจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคบิด ไทฟอยด์ และอหิวาตกโรค
- ผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากชุมชนจะเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในน้ำบางชนิด ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์มีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความต้องการออกซิเจนในน้ำของจุลินทรีย์ เพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์มีสูงขึ้น และออกซิเจนบางส่วนจะถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับสารประกอบซัลไฟด์ และเฟอร์รัส ทำให้ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดต่ำลง เกิดเป็นน้ำเน่าเสีย ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และก่อให้เกิดความรำคาญของผู้ที่อยู่ใกล้แหล่งน้ำที่เน่าเสีย
- การเกิด Eutrophication หรือการที่มีธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำมากเกินไป จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ของจุลินทรีย์ จะเกิดสารอนินทรีย์ เช่น ไนโตรเจน ไนเตรต แอมโมเนีย และฟอสเฟต ซึ่งเป็นธาตุอาหารพืช เมื่อมีมากจะทำให้เกิดการแพร่พันธุ์เพิ่มจำนวนของพืชน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำ สัตว์น้ำ และระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้นๆ

2.1.5 น้ำทิ้งชุมชนจากมหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลายา

น้ำทิ้งของมหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลายา เป็นน้ำทิ้งจากอาคารเรียน สำนักงาน โรงอาหาร หอพักนักศึกษา บ้านพักข้าราชการ และอาคารกิจกรรมต่างๆ ซึ่งจะรวบรวมเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำทิ้ง ด้วยระบบท่อน้ำทิ้งรวมเข้าสู่บ่อพัก เพื่อสูบน้ำเข้าสู่บ่อบำบัด ซึ่งประกอบด้วยบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) จำนวน 2 บ่อ และจะไหลลงไปสู่บ่อฝักร (Oxidation pond) ในบ่อที่ 3 และ 4 ตามลำดับ จากนั้นจะปล่อยลงสู่คูคลองรอบบริเวณมหาวิทยาลัย และนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ในการรดน้ำต้นไม้ในบริเวณมหาวิทยาลัย

จากการศึกษาของ จิตติมา, 2539 (26) พบว่าคุณภาพน้ำทิ้งมหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลายา ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีค่า ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 คุณภาพน้ำทิ้งของมหาวิทยาลัยมหิดลศูนย์ศาลายา ก่อนบำบัด

คุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่าที่ตรวจวัดได้
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	7.66 - 8.83
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	มิลลิกรัม/ลิตร	4.50 – 5.10
บีโอดี (BOD)	มิลลิกรัม/ลิตร	49.70 – 53.20
ซีโอดี (COD)	มิลลิกรัม/ลิตร	83.00 – 88.20
ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	มิลลิกรัม/ลิตร	10.40 – 13.20

ที่มา : จิตติมา, 2539 (26)

2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้พืช

การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย พบว่า เกิดขึ้นมานานกว่า 100 ปี โดยในช่วงปี ค.ศ. 1804 มี การนำน้ำเสียมาบำบัด และใช้ในการเกษตร คือ เป็นการให้น้ำพืช และใช้เป็นปุ๋ย อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากค่อนข้างเป็นที่รังเกียจในด้านความสกปรก และต้องใช้พื้นที่มาก ประกอบกับการพัฒนาของระบบบำบัด ชนิด Aerobic Treatment ทำให้ในช่วง ค.ศ. 1910 ไม่ปรากฏว่ามีพื้นที่ฟาร์ม บำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่เหลืออยู่ ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1970 มีการจัดการน้ำเสียโดยการใช้พืชกลับมาใช้อีก จนกระทั่งในปัจจุบัน ในระบบบำบัดช่วงแรกๆ ใช้พืชน้ำที่ลอยอยู่ผิวน้ำ เช่น ผักตบ และระบบพื้นที่ลุ่มน้ำขัง (Wetland) มาใช้ในระบบบำบัด แต่ในพื้นที่เขตหนาววิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัด ในด้านการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาล และต้องใช้พื้นที่มาก เช่นกัน นักวิจัยบางคนเห็นว่า พืชไม่สามารถจะลดสารมลพิษในน้ำได้โดยตรง แต่เป็นจุลินทรีย์ในน้ำ ที่ทำหน้าที่ในการบำบัดโดยตรง และในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิธีการนำเทคนิคการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินมาใช้ในการจัดการด้านการบำบัดน้ำเสีย (12)

2.2.1 กลไกในการบำบัดน้ำเสียของระบบที่มีการใช้พืช

จากผลการวิจัยต่างๆ พบว่าในระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีการใช้พืชร่วมด้วย เช่น ระบบการใช้พืชน้ำในการบำบัด (Aquatic plant treatment) ระบบพื้นที่ลุ่มน้ำขัง (Wetland) หรือระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน (Soiless culture) (ภาพที่ 2-1) สามารถลดปริมาณสิ่งสกปรกในน้ำในรูปของ BOD, ปริมาณของแข็งแขวนลอย (TSS) , สารประกอบไนโตรเจน และฟอสฟอรัส , สารอินทรีย์ และโลหะหนักในน้ำได้ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดจะแตกต่างกันตามรูปแบบของระบบ สภาพ

พื้นที่ ภูมิอากาศ และคุณลักษณะของน้ำเสีย แต่จะอาศัยกลไกในการบำบัดที่คล้ายกัน ซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลไกสำคัญ คือ

กลไกทางฟิสิกส์ ได้แก่

- การตกตะกอน (Sedimentation) เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้สารแขวนลอยในมวลน้ำเกิดการตกตะกอนเองโดยธรรมชาติ โดยที่ปริมาณการตกตะกอนจะขึ้นกับชนิด ขนาด และปริมาณของสารแขวนลอย รวมทั้งรูปแบบของระบบบำบัด

- การกรอง (Filtration) ในการเคลื่อนที่ของมวลน้ำผ่านส่วนของลำต้น หรือรากพืชที่อยู่ใต้น้ำ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่จะถูกดัก และกรอง ติดกับส่วนของพืช ส่วนสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กจะถูกดักยึดติดกับรากของพืช จากการเกิดแรงตึงผิวระหว่างพื้นผิวของอนุภาค ระหว่างพื้นผิวของสารแขวนลอย กับพื้นผิวของรากพืช

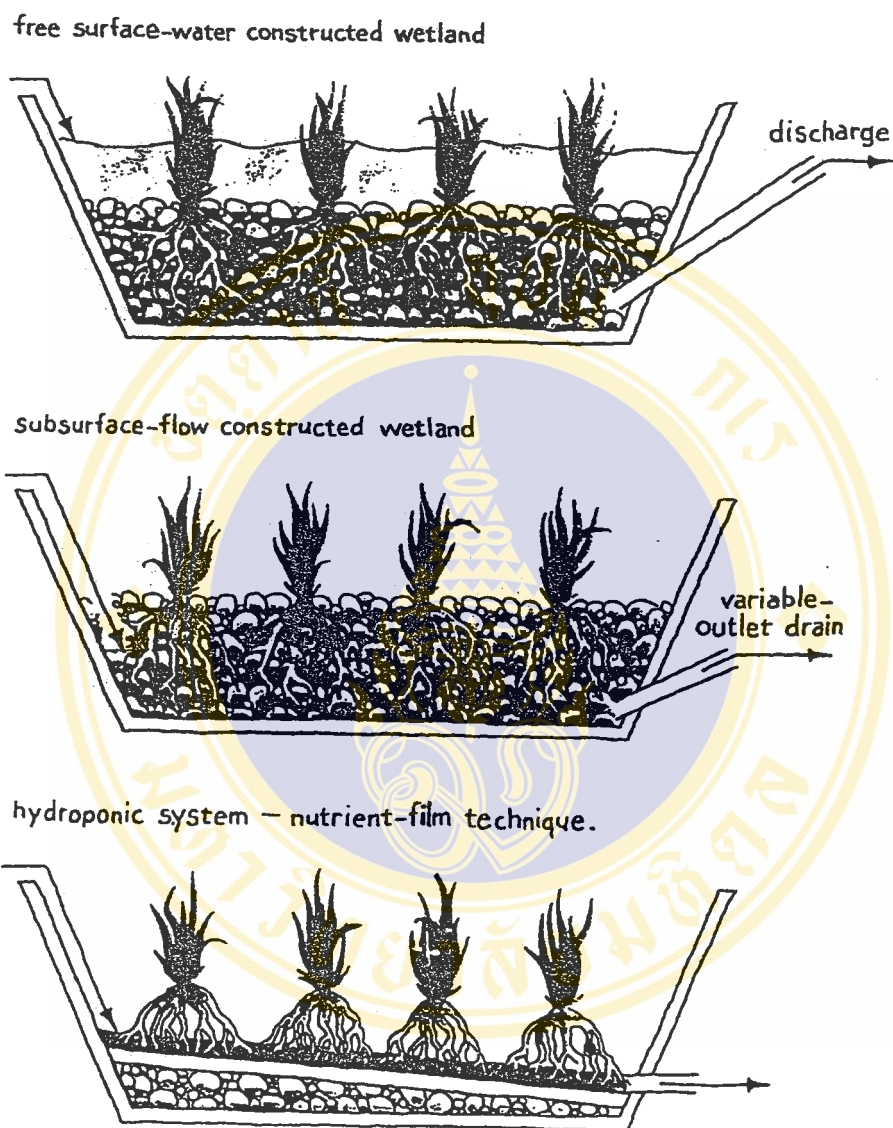
- การระเหย (Volatilization) สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ที่เป็นสารประกอบในรูปก๊าซ หรือสามารถระเหยได้ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) หรือ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) จะระเหยออกจากน้ำเสียได้เอง และจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อมวลน้ำได้สัมผัสกับอากาศมากขึ้น

กลไกทางชีววิทยา ได้แก่

- การย่อยสลายอินทรีย์สาร (Decomposition of organic matter) เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์และพืช โดยที่จุลินทรีย์จะทำปฏิกิริยาทางชีวเคมี และใช้ ก๊าซออกซิเจน ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้พลังงานในการดำรงชีพ และถ้าในระบบมีปริมาณของก๊าซออกซิเจนในน้ำเพียงพอ จะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์เกิดได้อย่างสมบูรณ์ ปริมาณของสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายได้มาก ซึ่งจะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำลดลง

- การดูดซึมแร่ธาตุโดยพืช (Plant absorption) พืชจะดูดซึมสารประกอบอินทรีย์ ที่เป็นอาหารของพืช ซึ่งเจือปนอยู่ในน้ำเสีย ผ่านทางรากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งส่งผลให้ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียลดต่ำลง

- การตายโดยธรรมชาติ (Natural die-off) เนื่องจากสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด จะมีความสามารถในการดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยมีความเหมาะสมของสภาวะแวดล้อมเป็นข้อจำกัด เมื่อต้องพบกับสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถทนอยู่ได้ก็จะตาย เช่นเดียวกับในระบบบำบัดแต่ละรูปแบบ ซึ่งมีสภาพที่แตกต่างกัน สิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมของระบบได้ ก็จะตาย หรือลดจำนวนลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2-1 รูปแบบของระบบการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืชบางระบบ

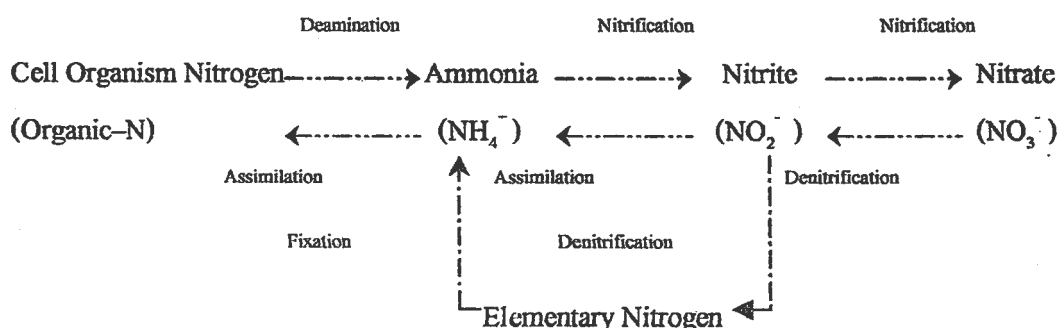
ที่มา : Jewel, 1994 (12)

กลไกทางเคมี ได้แก่

- การดูดซึมโดยพืช (Plant absorption) ในน้ำเสียมีสารอาหารหลายชนิดที่จำเป็นสำหรับพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ที่สำคัญ ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย เช่น ฟอสฟอรัสในรูปของ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ซึ่งเป็นสารอาหารที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้ทันที (38) ส่วนไนโตรเจนพืชส่วนใหญ่จะดูดสารไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรต (NO_3^-) ได้ดีที่สุด

- การเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidation and reduction) สารประกอบบางชนิด เช่น เหล็ก , ซัลไฟด์ หรือ ซัลไฟด์ สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตราย แต่เมื่อมีปริมาณของออกซิเจนในน้ำต่ำ สารประกอบดังกล่าวจะถูกดึงออกซิเจนออกจากโมเลกุล และอยู่ในรูปที่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น การแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างน้ำกับอากาศเกิดขึ้นได้จากพืชที่อยู่ในระบบที่สังเคราะห์แสงได้ออกซิเจน ผ่านออกมาจากลำต้น ใบ และกระจายออกมาทางลำต้น ต้นน้ำเสีย รวมทั้งการเติมอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง

- การเกิดปฏิกิริยาเคมีของธาตุอาหารในน้ำ เช่น ฟอสฟอรัสซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย จะเกิดปฏิกิริยาดูดซับติดกับผิวของอนุภาคดิน ออกไซด์ของเหล็ก อลูมินัม และแคลเซียมแล้วตกตะกอน ส่วนสารประกอบไนโตรเจนจะสามารถเปลี่ยนรูปกลับไปได้ ด้วยกระบวนการ Nitrification และ Denitrification (ภาพที่ 2-2) โดยที่ ไนไตรต์ (NO_2^-) และแอมโมเนีย (NH_4^+) สามารถระเหยกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ทำให้ปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในน้ำลดลง



ภาพที่ 2-2 กระบวนการชีวเคมีของไนโตรเจน

ที่มา : ดัดแปลงจาก กรรณิการ์, 2522 (44)

2.2.2 การศึกษาการใช้เทคนิคการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน โดยใช้น้ำเสีย

Bouwer et al, 1974 (39) ศึกษา การนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดขั้นที่ 2 ผ่านเข้าระบบการปลูกพืชโดยใช้ทราย ในอเมริกา พบว่า ตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 2 ฟุต ตรวจไม่พบค่า BOD , ค่าของของแข็งแขวนลอยในมวลน้ำ (TSS) และ ฟิคัล-โคลิฟอร์ม

Jurdi , Soufi และ Acra, 1984 (9) นำน้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านระบบบำบัดมาใช้ในการปลูกแตงกวา และมะเขือเทศ โดยระบบการปลูกในสารละลายแบบหมุนเวียน ซึ่งกำหนดอัตราการไหลของสารละลาย 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 มิลลิเมตร/นาที จากผลการศึกษา พบว่า ที่อัตราการไหล 30 มิลลิเมตร/นาที จะสามารถลดปริมาณธาตุอาหารพืชในน้ำทิ้งได้ดีที่สุด

Butler et al, 1990 (40) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนในขั้นที่ 2 และ 3 โดยใช้เทคนิคการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน ชนิด Gravel Bed Hydroponics (GBH) พบว่า สามารถลดปริมาณ BOD ในน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 90 และมีปริมาณของออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) เพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้ได้ผลดีในแถบประเทศเขตร้อน และเหมาะสมกับประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำ การจัดการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

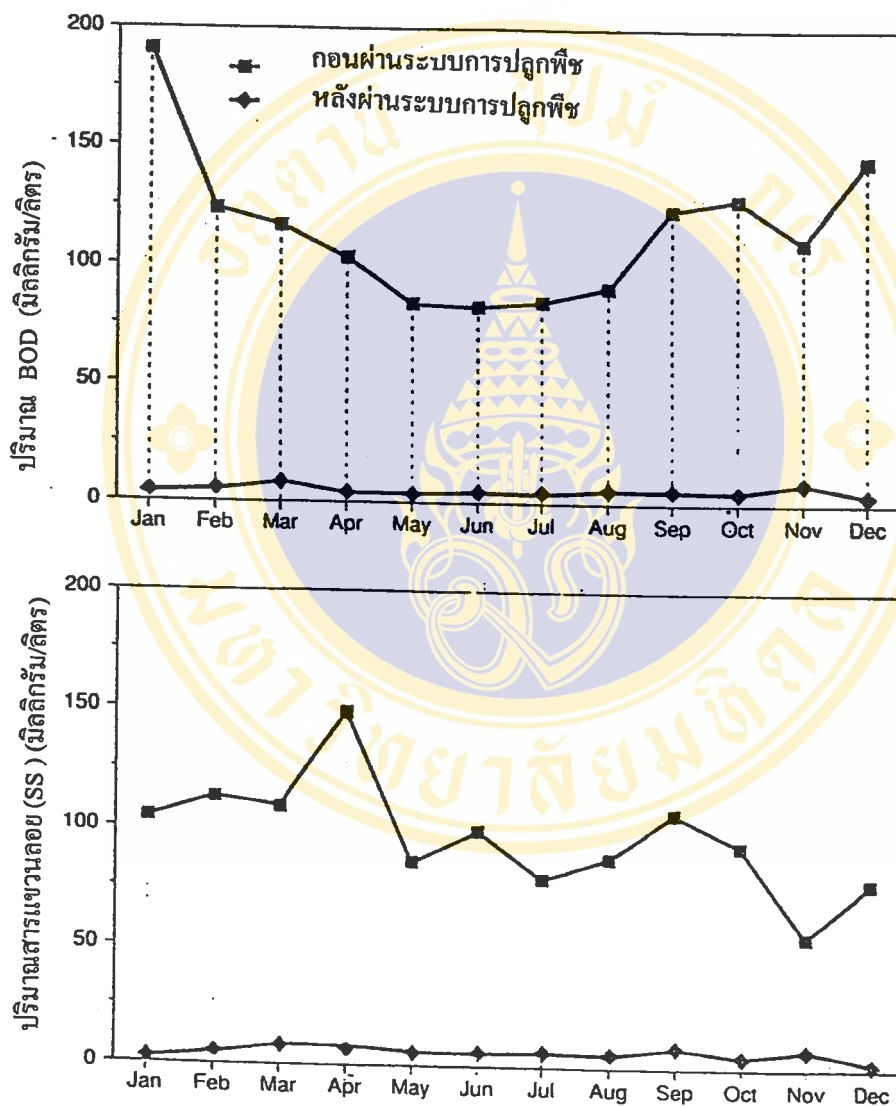
Jewel, 1994 (12) ศึกษาการใช้ระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน ชนิด Nutrient Film Technique (NFT) โดยใช้พืชหลายชนิดร่วมกัน ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนขนาดเล็ก ซึ่งมีจำนวนประชากร 100 คน พบว่า ปริมาณของ BOD และ TSS ในน้ำลดลง (ภาพที่ 2-3) ในขณะที่พืชทดลองสามารถเจริญเติบโตได้ดี

William et al, 1995 (42) ศึกษาความสามารถในการกำจัดธาตุอาหารพืช และปัจจัยก่อโรคในน้ำเสีย โดยการใช้ระบบปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน ชนิด Gravel Bed Hydroponics (GBH) พบว่า สามารถลดค่า BOD , TSS และปริมาณไนโตรเจนในน้ำได้ดี ประสิทธิภาพของระบบนี้ จะขึ้นกับอัตราการไหลของน้ำ และสภาพภูมิอากาศเป็นสำคัญ โดยที่อัตราการไหลของน้ำช้า และในสภาพภูมิอากาศในแถบเขตร้อน จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

Ayaz และ Saygin, 1996 (41) ศึกษาการนำระบบการปลูกพืชในสารละลายมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนขั้นที่ 3 โดยการใช้พืชตระกูลถั่ว พบว่าในพื้นที่ 1 ตารางเมตร สามารถลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียได้ 1.2 – 2.6 กรัม/วัน ลดปริมาณฟอสฟอรัสได้ 0.24 – 0.33 กรัม/วัน และลดปริมาณซัลเฟตได้ 0.3 – 0.9 กรัม/วัน

Boyden และ Rababah, 1996 (11) พบว่า เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาใช้ในการปลูกพืชจำพวกผักกาด โดยใช้ระบบการปลูกพืชในสารละลาย สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำได้ร้อยละ 77 และลดไนโตรเจนได้ร้อยละ 80 โดยที่ผักสามารถเจริญเติบโตได้ดี ไม่มีอาการของโรคเกิดขึ้น และผลผลิตผักที่ได้ไม่แตกต่างจากการปลูกโดยใช้สามารถละลายธาตุอาหาร

Singh, 1996 (10) ศึกษาการนำน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลาแบบหนาแน่น มาใช้ในการปลูกผักกาด และมะเขือเทศ โดยระบบการปลูกพืชในสารละลาย พบว่า ผลผลิตของพืชทั้ง 2 ชนิด มีคุณภาพดี และปริมาณสูงเป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำน้ำที่ผ่านระบบการปลูกพืชกลับเข้าสู่ระบบการเพาะเลี้ยงได้อีก



ภาพที่ 2-3 การเปรียบเทียบปริมาณของ BOD และ TSS ก่อนและหลังผ่านระบบการปลูกพืชในสารละลาย

ที่มา : Jewel, 1994 (12)

2.3 การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soiless culture)

2.3.1 ความหมาย

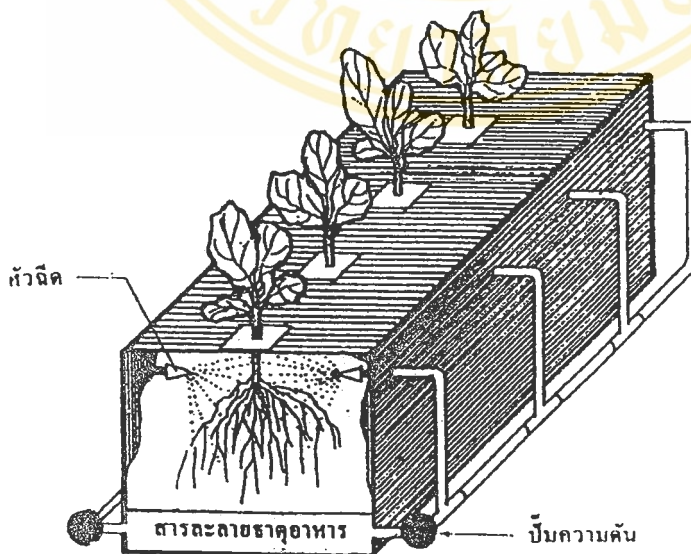
การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soiless culture) หมายถึง เทคโนโลยีการผลิตพืช แบบที่ไม่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูก แต่ทำการปลูกโดยใช้วัสดุปลูกที่เหมาะสม และอาศัยสารละลายธาตุอาหารพืช เป็นแหล่งอาหารในการเจริญเติบโตของพืช (14, 15, 24)

2.3.2 ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน สามารถจัดแบ่งออกได้หลายรูปแบบ ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของผู้จำแนก แต่จัดแบ่งตามลักษณะวิธีการให้สารละลายธาตุอาหารแก่บริเวณรากพืชออกได้เป็น 3 ระบบ คือ

2.3.2.1 ระบบการปลูกแบบให้รากพืชอยู่ในอากาศ (Aeroponics)

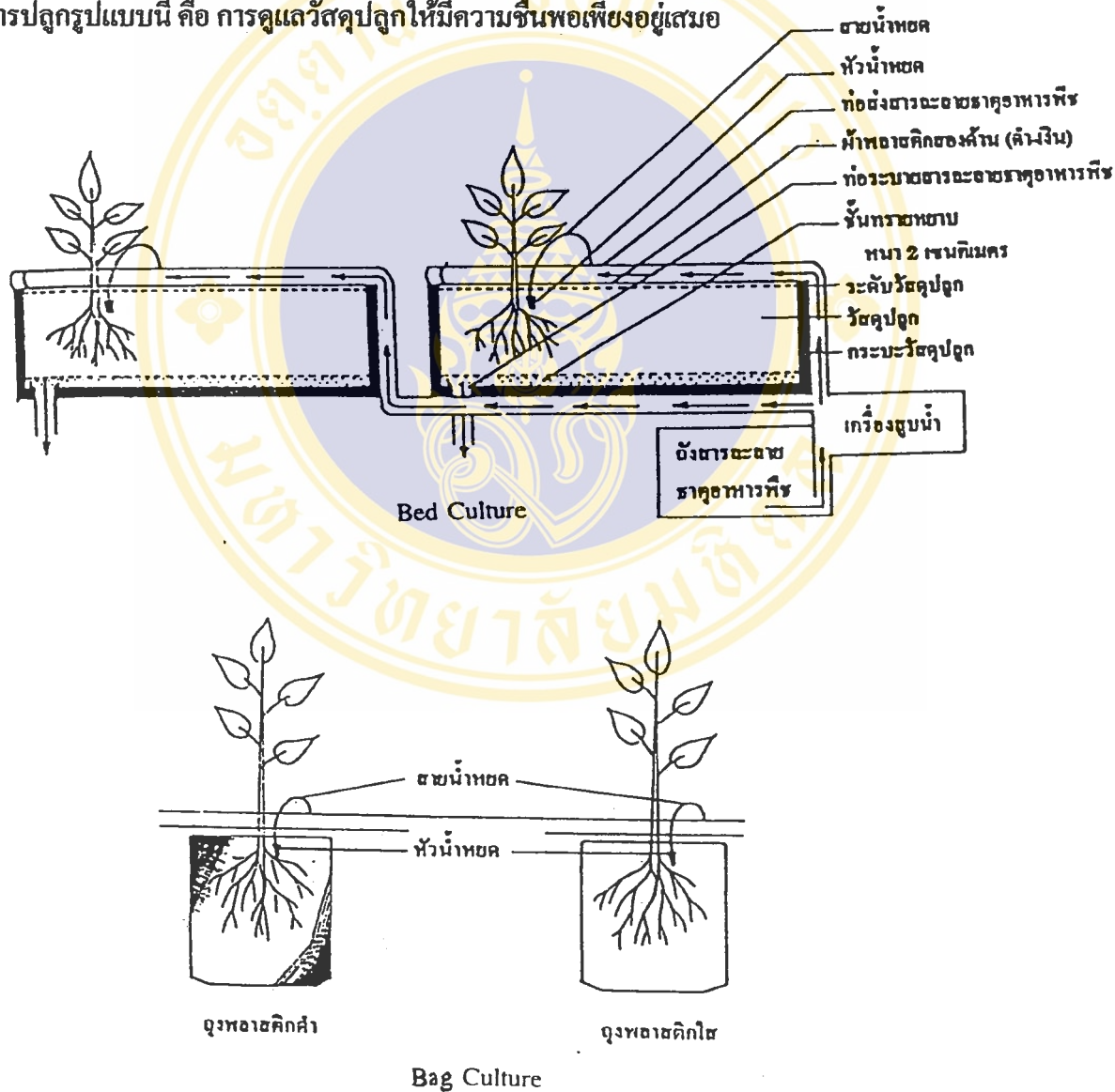
เป็นการปลูกพืชที่มีการให้สารละลายธาตุอาหารพืช ด้วยการฉีดพ่นสารละลายให้เป็นฝอยละเอียด ลักษณะคล้ายละอองหมอกให้แก่รากพืชที่แขวนอยู่ในอากาศที่มีค ตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งขึ้นกับชนิดของพืช และสภาพแวดล้อม โดยยึดโคนต้นเอาไว้กับภาชนะดังแสดงในภาพ 2-4 ซึ่งระบบนี้มีข้อดี คือ รากของพืชสามารถกระจายได้ดี ไม่มีสิ่งกีดขวาง และรับอากาศได้เต็มที่ จึงมักใช้ในการศึกษาด้านสรีระวิทยาของพืช แต่มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุอุปกรณ์ค่อนข้างสูง



ภาพที่ 2-4 ระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินให้รากอยู่กลางอากาศ
ที่มา : ถวัลย์, 2534 (14)

2.3.2.2 ระบบการปลูกโดยใช้วัสดุปลูก (Substrate culture)

เป็นการปลูกโดยใช้วัสดุปลูกซึ่งเป็นของแข็ง สำหรับให้รากพืชยึด และลำต้นลำต้นพืช แทนการใช้ดิน ซึ่งการเลือกใช้วัสดุต้องมีความเหมาะสมกับความต้องการของพืช เช่น มีการระบายอากาศดี อุณหภูมิได้พอเหมาะ มีความสะอาดปราศจากโรค และแมลง ไม่เป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของพืช และหาได้ง่ายในท้องถิ่น การให้สารละลายธาตุอาหารแก่พืชสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซึม (Infiltration) การแช่และระบาย (Soak and drain) การให้น้ำหยด (Drip irrigation) เป็นต้น วิธีการปลูกระบบนี้นิยมใช้ปลูกไม้ล้มลุกด้วยเพราะมีความสะดวกในการใช้ ข้อควรระวังของการปลูกรูปแบบนี้ คือ การดูแลวัสดุปลูกให้มีความชื้นพอเพียงอยู่เสมอ



ภาพที่ 2-5 ระบบการปลูกพืชโดยใช้วัสดุปลูก

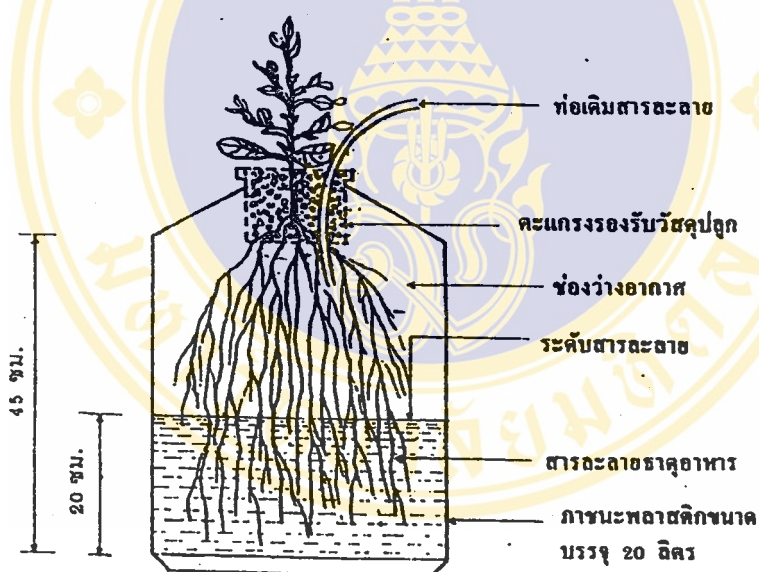
ที่มา: อารีย์, 2540 (15)

2.3.2.3 ระบบการปลูกในสารละลายธาตุอาหาร (Liquid culture ; Water culture)

การปลูกพืชในสารละลาย หรือที่เรียกว่า การปลูกพืชลอยน้ำ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากกว่าวิธีการระบบอื่นๆ โดยมีหลักการว่ารากพืชจะแช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารพืช แต่ส่วนที่อยู่เหนือขึ้นไป หรือโคนต้น จะถูกหุ้มด้วยวัสดุที่ไม่เป็นอันตรายต่อพืช และยกไว้เหนือระดับน้ำ เพื่อช่วยพยุงลำต้น ส่วนระบบของการให้สารละลายแก่พืช สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ระบบ คือ

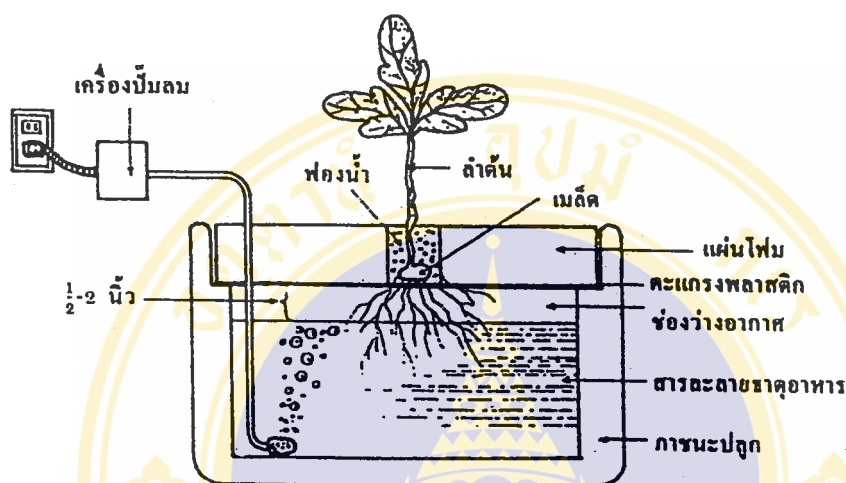
1. การปลูกในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

1.1 ชนิดไม่เติมอากาศ เป็นระบบที่ไม่มีการใช้อุปกรณ์เติมอากาศ ดังภาพ



ภาพที่ 2-6 ระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน ชนิดไม่เติมอากาศ
ที่มา : ถวัลย์, 2534 (14)

1.2 ชนิดเคมิคัล ระบบนี้ใช้อุปกรณ์ในการให้ออกซิเจนเพิ่มอากาศให้แก่รากพืช ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำ ติดตั้งง่าย สามารถนำมาใช้งานได้รวดเร็วและได้ผลแน่นอน

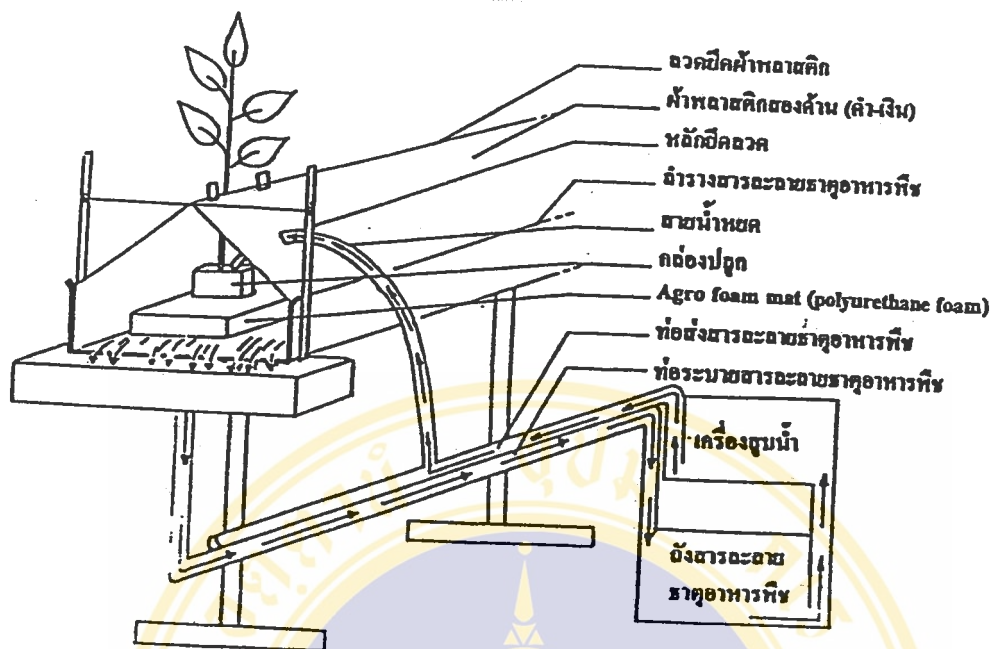


ภาพที่ 2-7 ระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน ชนิดเคมิคัล
ที่มา : ถวัลย์, 2534 (14)

2. การปลูกในสารละลายแบบหมุนเวียน

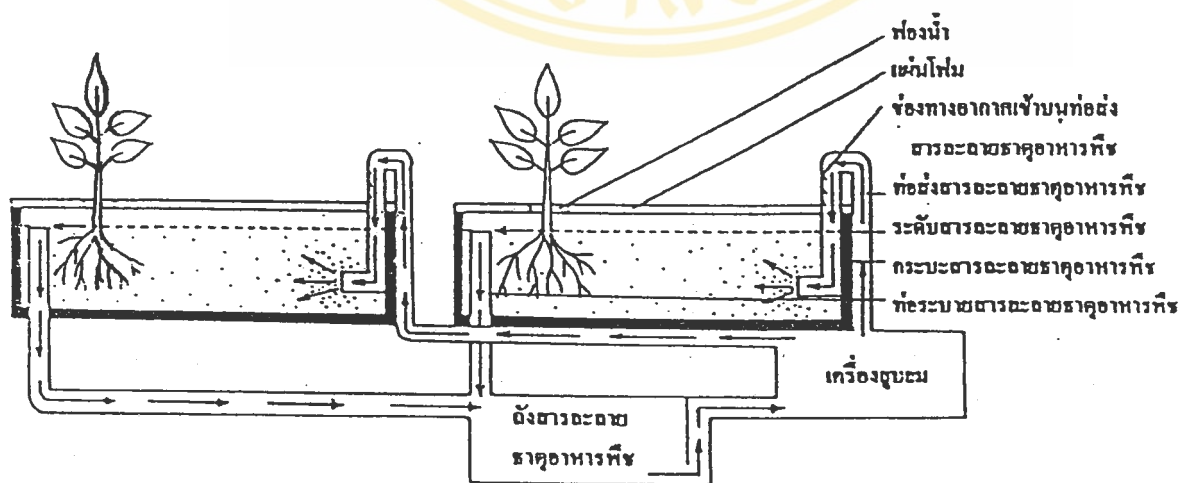
การปลูกในระบบนี้มีข้อดีในการช่วยให้สารละลายเกิดการเคลื่อนไหว รักษาธาตุอาหารต่างๆ ไม่ให้ตกตะกอน พืชจะได้รับอาหาร และอากาศเต็มที่ ซึ่งระบบนี้แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 2 วิธี คือ

2.1 การให้สารละลายไหลผ่านรากพืชเป็นชั้นน้ำบางๆ (Nutrient Film Technique) เป็นวิธีการปลูกที่ปล่อยสารละลายไหลเป็นแผ่นน้ำบางๆ ในลำรางน้ำซึ่งมีความลาดเอียง โดยรากพืชจะแช่สารละลายที่ปล่อยไหลผ่านรากพืช ด้วยอัตราเร็ว ประมาณ 2 ลิตร/นาที่ ด้านปลายของรางน้ำจะมีที่รองรับน้ำสารละลายที่ใช้แล้วไปรวมในถังเพื่อถูกกลับไปใช้ใหม่ วิธีนี้เป็นที่นิยมในการปลูกเชิงพาณิชย์ในหลายประเทศ



ภาพที่ 2-8 การปลูกพืชในสารละลายแบบหมุนเวียนแบบ Nutrient Film Technique
ที่มา : อารีย์, 2540 (15)

2.2 การให้สารละลายไหลผ่านรากพืชอย่างต่อเนื่อง (Nutrient Flow Technique) การปลูกด้วยวิธีนี้ มีลักษณะคล้ายกับแบบ Nutrient Film Technique แต่มีระดับความลึกของสารละลายมากกว่า จะคล้ายการปลูกพืชแช่ลอยในน้ำที่ไหลช้าๆ สมำเสมอ โดยเป็นน้ำดิน ความลึกประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งอาจจะมีการเติมอากาศหรือไม่ก็ได้



ภาพที่ 2-9 การปลูกพืชในสารละลายแบบหมุนเวียนแบบ Nutrient Flow Technique
ที่มา : อารีย์, 2540 (15)

2.3.3 ประโยชน์และปัญหาของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

ประโยชน์ ของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (8, 14, 15, 24)

1. สามารถทดแทนการปลูกพืชในดิน ของพื้นที่ที่มีปัญหา เช่น ดินเปรี้ยว ดินเค็ม หรือพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ รวมทั้งบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด ขาดพื้นที่ในการเพาะปลูก เช่น บริเวณพื้นที่ ที่เป็นภูเขาหิน และชุมชนเมืองต่างๆ
2. ประหยัดพื้นที่การปลูก เพราะสามารถปลูกให้หนาแน่นกว่าการปลูกในดิน เนื่องจากพืชไม่ต้องแย่งอาหาร และอากาศกัน
3. ประหยัดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน ในการเตรียมพื้นที่เพาะปลูก การบำรุงดูแลรักษา และการกำจัดศัตรูพืช
4. ให้ผลผลิตต่อช่วงเวลาสูง เพราะพืชเติบโตเร็วสามารถทำการเก็บเกี่ยวได้เร็วขึ้น
5. ควบคุมโรคและแมลง ศัตรูพืชได้ง่ายกว่า ในสภาพการปลูกในโรงเรือน
6. คุณภาพของผลผลิตดี เพราะสามารถควบคุมปัจจัยการผลิตได้
7. ใช้น้ำในการปลูกน้อยกว่าการปลูกในดิน เพราะ ไม่ต้องสูญเสียน้ำที่ซึมลงสู่ดิน

ปัญหาของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

1. ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง เนื่องจากต้องลงทุนด้านโรงเรือน และวัสดุอุปกรณ์
2. ต้องอาศัยความรู้ ความเข้าใจในระบบการปลูก และปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และต้องมีการดูแลอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ
3. ปัจจัยบางอย่างไม่สามารถควบคุมได้ตลอดเวลา เช่น กระแสไฟฟ้า หรือการเกิดขำรดของวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ ซึ่งจะเกิดผลเสียหายขึ้นได้
4. ในระบบการปลูกที่มีการหมุนเวียนสารละลาย อาจก่อให้เกิดการระบาดของโรค ถูกตามได้ง่าย ซึ่งยากต่อการป้องกันและรักษา

2.3.4 ปัจจัยที่สำคัญในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

1. ปัจจัยทางด้านพันธุกรรมของพืช

ปัจจัยทางด้านพันธุกรรมของพืชเป็นตัวกำหนดลักษณะการเจริญเติบโตของพืช

2. ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

2.1 แสง เป็นปัจจัยที่สำคัญในการเป็นแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์แสงของพืช ความเข้มของแสง จะมีผลต่อความสามารถในการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งจะแตกต่างกันตามชนิดพืช ดังนั้นควรจัดให้พืชได้รับปริมาณ และความเข้มแสงอย่างพอเพียง ในพื้นที่ที่ได้รับแสงไม่พอ เช่น ในบ้าน หรือห้องทดลอง อาจให้ไฟฟ้าเป็นแหล่งแสงสว่างแก่พืชแทนได้ แต่จะเกิดความสิ้นเปลืองมาก และพืชไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร

2.2 อากาศ พืชต้องการ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ เพื่อใช้ในการผลิตกลูโคส ในขบวนการสังเคราะห์แสง และต้องการออกซิเจนเพื่อการหายใจ และเปลี่ยนกลูโคสเป็นพลังงาน เพื่อใช้ในขบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ โดยปกติดินพืชส่วนที่เหนือดิน จะไม่มีปัญหาการขาดอากาศ แต่ระบบรากพืชมักจะขาดออกซิเจน ดังนั้นในการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน จำเป็นต้องเพิ่มออกซิเจนลงในน้ำ โดยการใช้เครื่องปั๊มลม หรือการหมุนเวียนสารละลายเพื่อเพิ่มออกซิเจน

2.3 น้ำ เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เนื่องจากพืชจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 90% โดยน้ำหนัก และน้ำเป็นตัวทำละลายธาตุอาหารพืชให้อยู่ในรูปไอออน หรือสารละลายโมเลกุลเล็ก และสามารถดูดซึมเข้าสู่รากพืชได้ คุณภาพของน้ำที่นำมาใช้ในระบบการพืชในสารละลายมีความสำคัญมาก จะต้องมีความสะอาด และคุณภาพเหมาะสม

2.4 ธาตุอาหารพืช ธาตุอาหารที่พืชต้องการมี 16 ธาตุ โดยสามารถรับจากอากาศได้ 3 ธาตุ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไฮโดรเจน อีก 13 ธาตุ อาศัยการดูดซึมจากรากพืช โดยแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

- ธาตุอาหารหลัก (Macronutrient elements) คือ กลุ่มธาตุอาหารที่พืชต้องการปริมาณมากได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟอร์ (กำมะถัน)

- ธาตุอาหารรอง (Micronutrient elements) คือ กลุ่มธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อย แต่มีความจำเป็นในการเจริญเติบโต ได้แก่ โบรอน สังกะสี ทองแดง เหล็ก แมงกานีส โมลิบดีนัม และคลอไรด์

2.3.5 ระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินที่เลือกใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ เลือกใช้ระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียน ชนิดเติมอากาศ ซึ่งมีการใช้อุปกรณ์การเติมอากาศ หรือ บัมอากาศ เนื่องจากระบบนี้ใช้ต้นทุนต่ำ วัสดุที่ใช้หาได้สะดวก ติดตั้งง่าย สามารถใช้งานได้รวดเร็ว และได้ผลที่แน่นอน และจากรูปแบบของระบบที่มีการเติมอากาศ สามารถเอื้ออำนวยต่อการเกิดกลไกในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งทางชีววิทยา เคมี และฟิสิกส์ ทั้งยังสามารถเพิ่มพื้นที่การบำบัดในแนวลึกได้ ซึ่งต่างจากระบบการปลูกแบบไม่ใช้ดินระบบอื่น ที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ในการบำบัดในเชิงระนาบ ทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการบำบัดมาก

2.4 ธาตุอาหารพืช

2.4.1 บทบาทของธาตุอาหารพืชหลัก ต่อการเจริญเติบโตของพืช

ไนโตรเจน (N)

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต ของโครงสร้างพืชทุกส่วน โดยเป็นส่วนประกอบโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ กรดอะมิโน และโปรตีนในโปรโตพลาสซึม ความต้องการไนโตรเจนของพืชจะขึ้นกับชนิดพืช อายุของพืช และฤดูกาล พืชจะดูดซึมไนโตรเจนในรูปของไนเตรตไอออน (NO_3^-) ได้ดี อาการขาดไนโตรเจนของพืช พบว่า จะทำให้ลำต้นแคระแกร็น ใบเขียว เหลืองซีดและแห้งตาย แต่ถ้าได้รับธาตุไนโตรเจนมากเกินไปพืชจะบอบบาง อ่อนแอ ล้มง่าย

ฟอสฟอรัส (P)

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารสำคัญ คือ กรดนิวคลีอิก ฟอสโฟไลปิด และโปรตีนในโปรโตพลาสซึม ช่วยในขบวนการสลายแป้ง ให้เป็นน้ำตาล และกระตุ้นการทำงานของเอ็นไซม์ ช่วยในการสร้างราก และรากสะสมอาหารของพืช โดยพืชสามารถดูดซึมฟอสฟอรัสในรูปของ โมโนไฮโดรฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) และไดไฮโดรฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4^-) ถ้าพืชขาดฟอสฟอรัสจะเกิดอาการใบเขียวคล้ำ การติดผลและเมล็ดจะลดลง

โพแทสเซียม (K)

โพแทสเซียม เป็นสารประกอบของเนื้อเยื่อเจริญของพืช เช่น ยอด ราก ลำต้น ใบอ่อน แต่ไม่ได้เป็นสารประกอบโครงสร้างของโมเลกุล แต่จะกระตุ้นการทำปฏิกิริยาในเซลล์ และการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และเร่งการดูดซึม ไนโตรเจนในรากพืช พืชจะดูดซึมโพแทสเซียม ในรูปของโพแทสเซียม ไอออน (K^+) เมื่อพืชขาดโพแทสเซียม ลำต้น และใบพืชจะลีบ ล้มง่าย แต่ถ้าได้รับโพแทสเซียมมากเกินไป จะรบกวนการดูดซึมแคลเซียมและแมกนีเซียมของพืช

แคลเซียม (Ca)

แคลเซียม เป็นสารประกอบของสารเชื่อมผนังเซลล์พืช เป็นปัจจัยร่วมในการสังเคราะห์โปรตีน ช่วยเพิ่มอัตราการดูดซึมธาตุโปแตสเซียม และลดความเป็นพิษของธาตุแมกนีเซียม ทำให้ดูดซึมแมกนีเซียมได้มากขึ้น พืชจะดูดธาตุแคลเซียมในรูปของ แคลเซียม อีออน (Ca^{++}) ถ้าพืชขาดแคลเซียมจะแสดงอาการรากงอก ยอดคั่ว ขั้วสั้น และใบเล็กลง

แมกนีเซียม (Mg)

แมกนีเซียม เป็นองค์ประกอบของโมเลกุล คลอโรฟิลล์ และช่วยในการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสในพืช โดยรวมตัวกันเป็นแมกนีเซียมฟอสเฟต พืชจะดูดซึมแมกนีเซียมในรูปของ แมกนีเซียม อีออน (Mg^{++}) ถ้าพืชขาดแมกนีเซียม จะแสดงอาการเหลืองซีด บริเวณเนื้อเยื่อใบ แต่ถ้าได้รับมากเกินไป จะแสดงอาการใบม้วน และจะเฉาตายจากปลายใบ

ซัลเฟอร์ (S)

ซัลเฟอร์ มีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์กรดอะมิโน 3 ชนิด คือ cystine cysteine และ methionine โดยจะดูดซึมซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟต อีออน (SO_4^-) ถ้าพืชได้รับ ซัลเฟอร์อย่างพอเพียงจะทำให้มีระบบรากที่สมบูรณ์ ปริมาณคลอโรฟิลล์สูง แต่ถ้าขาดพืชจะแสดงอาการใบเหลือง และมีการแตกพุ่มมาก

2.4.2 ธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำ

โดยปกติ แหล่งน้ำในธรรมชาติ จะมีแร่ธาตุต่างๆ เจือปนอยู่ ซึ่งเกิดจากขบวนการทางธรรมชาติ เช่น การพังทลายของดิน การพัฒนาของน้ำ การสลายตัวของซากพืชซากสัตว์ ประกอบกับคุณสมบัติในการเป็นตัวทำละลายของน้ำ จึงทำให้มีแร่ธาตุต่างๆ ละลายเจือปนอยู่ในมวลน้ำ แหล่งที่มาของธาตุอาหารที่พบในแหล่งน้ำ ได้แก่ อากาศ ดิน ซากพืช ซากสัตว์ และกิจกรรมของมนุษย์ เป็นต้น ปริมาณของธาตุอาหารในแหล่งน้ำจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่

1. ลักษณะวิทยาของแหล่งน้ำหรือรูปร่างของแหล่งน้ำ เช่น แหล่งน้ำที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณน้ำมาก ธาตุต่างๆ จะเจือจางได้มาก
2. ลักษณะธรณีวิทยาของแหล่งน้ำ ชนิดและปริมาณของธาตุอาหารพืช ที่มีในน้ำจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะของดิน และหินในบริเวณนั้นๆ
3. สภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ความใกล้ชิดสังคมมนุษย์ หรือแหล่งชุมชน จะทำให้ได้รับผลกระทบจากกิจกรรม และการใช้น้ำของมนุษย์

ปริมาณของแร่ธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำบางประเภทแสดงดังตาราง ที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ปริมาณธาตุอาหารในแหล่งน้ำบางประเภท

ชนิดธาตุ	ในแม่น้ำ ⁽¹⁾ (ไมโครกรัม/ลิตร)	แหล่งน้ำทั่วไป ⁽²⁾ (มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำทิ้งชุมชน ⁽³⁾ (มิลลิกรัม/ลิตร)
N	-	0.01-10.00	20-40
P	20	-	20-40
K	2,300	0.01-10.00	7-15
Ca	15,000	1.00-1,000	15-14
Mg	4,100	1.00-1,000	15-14
S	-	1.00-1,000	15-30
B	10	0.01-10.00	0.1-0.4
Zn	20	-	-
Cu	7	-	-
Fe	670	0.01-10.00	-
Mn	7	1.00-1,000	-
Mo	0.6	-	-
Cl	1,800	1.00-1,000	20-50

ที่มา: (1) Goldberg et al, 1971 (อ้างใน 1)

(2) Todd, _____ (อ้างใน 27)

(3) เกรียงศักดิ์, 2532 (25)

หมายเหตุ :- คือ ไม่มีการเสนอตัวเลข

2.5 บทบาทของโลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุ โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป ซึ่งได้แก่ธาตุที่มีเลขเชิงอะตอม 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 เช่น ตะกั่ว แคดเมียมปรอท นิกเกิล โครเมียม โคบอลต์ สังกะสี และทองแดง เป็นต้น (29, 30) ในการจำแนกประเภทของโลหะหนักตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้ 4 ประเภท คือ

- 2.5.1 โลหะหนักที่ให้คุณสมบัติประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ เหล็ก ทองแดง
- 2.5.2 โลหะหนักที่ให้โทษต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม
- 2.5.3 โลหะหนักที่ไม่เป็นคุณ หรือโทษ ต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ อลูมิเนียม

2.5.4 โลหะหนักที่เป็นประโยชน์ถ้าได้รับในปริมาณน้อย และจะเป็นโทษถ้าได้รับปริมาณมาก ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี

ปัจจัยที่สัมพันธ์กับปริมาณการสะสมโลหะหนักของพืชมีหลายประการ ได้แก่ ชนิดของพืช ประเภทของเนื้อเยื่อ ปริมาณของโลหะที่พืชได้รับ รูปทางเคมีของโลหะหนัก ชนิดของดิน แหล่งของโลหะหนัก ฤดูกาล และสภาพภูมิอากาศ (31) โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในดิน จะถูกดูดซึมเข้าสู่ต้นพืช เช่นเดียวกับธาตุอาหาร แต่ในพืชที่ต่างชนิดกัน จะมีความต้องการธาตุอาหารพืชที่ต่างกัน ทำให้การดูดซึม และสะสมแร่ธาตุต่างกัน จากการทดลองของ Iserman และคณะ (อ้างใน 29) พบว่า พืชชนิดต่างๆ ที่ปลูกในดินชนิดเดียวกัน จะมีการสะสมแคลเซียมในปริมาณที่ต่างกัน โดยจะมีการสะสมต่ำในธัญพืช และมีการสะสมมากในใบยาสูบ ในขณะที่เดียวกัน ในพืชต้นเดียวกันจะมีการสะสมโลหะหนักของเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ได้ต่างกัน เช่น ผักคะน้าจะมีการสะสมตะกั่ว และแคลเซียมในลำต้นได้สูงกว่าในใบ แต่จะมีการสะสมทองแดงและสังกะสีในส่วนใบมากกว่าในลำต้น นอกจากนี้ยังพบว่า ตะกั่วและสังกะสีจะมีปริมาณการสะสมที่แปรผันตามปริมาณน้ำในพืช ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณการสะสมแคลเซียม โครเมียม ทองแดง และปรอท (32)

รูปทางเคมีของโลหะหนักเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อการสะสมโลหะหนักในพืช โดยโลหะหนักที่อยู่ในรูปของเกลืออินทรีย์ ซึ่งละลายน้ำได้ดี จะถูกพืชดูดซึมเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักในภาคตะกอน จากการศึกษาของ อรวรรณ, 2529 (อ้างใน 33) พบว่า การสะสมของแมงกานีส และสังกะสีในผักคะน้า ส่วนที่บริโภคได้ในชุดการทดลองที่เติมโลหะหนักในรูปสารประกอบคลอไรด์ จะสูงกว่าชุดการทดลองที่เติมภาคตะกอน จากการศึกษาของ Puckett, 1973 (อ้างใน 33) พบว่า เมื่อเรียงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของพืช จากมากไปน้อยจะมีลำดับ คือ เหล็ก > ตะกั่ว > แคลเซียม แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับความเป็นพิษแล้ว ธาตุเหล็กจะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษเพราะความเข้มข้นในธรรมชาติมีสูงอยู่แล้ว เนื่องจากเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของโลก เช่นเดียวกับบอรัมเนียม และซิลิกอน การปนเปื้อนของธาตุเหล่านี้ในระดับที่ก่อความเป็นพิษต้องมีปริมาณสูงมากกว่าระดับในธรรมชาติมาก ซึ่งเกิดขึ้นได้ยาก ส่วนธาตุโลหะหนักที่เป็นธาตุอาหารโดยตรง เช่น แมงกานีส สังกะสี ทองแดง ก่อให้เกิดความเป็นพิษไม่รุนแรง ในขณะที่ปรอท แคลเซียม และตะกั่ว ซึ่งไม่เป็นธาตุอาหารพืช สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษอย่างรุนแรง ซึ่งแม้ได้รับในปริมาณต่ำก็ก่อให้เกิดอาการพิษได้ โดยเฉพาะตะกั่ว และแคลเซียม พืชสามารถสะสมไว้ได้ในปริมาณสูงโดยไม่แสดงอาการผิดปกติ ทำให้มนุษย์และสัตว์บริโภคเข้าไปโดยไม่มีสิ่งสังเกตให้รู้ล่วงหน้า ทำให้เกิดการสะสมพิษในร่างกาย ส่วนปรอทนั้นมีการสะสมในพืชน้อยมาก และถ้า

มนุษย์รับโปรทเข้าไปทางอาหาร จะสามารถขับออกจากร่างกายได้เนื่องจากโปรทจะถูกดูดซึมได้น้อยกว่า ร้อยละ 2 ของปริมาณที่รับเข้าไป (30)

ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมาก โดยเฉพาะตะกั่วในรูปอนินทรีย์ เช่น ฉนวนหุ้มสายเคเบิล ฉนวนกัมมันตภาพรังสี และใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก แก้ว และการทำเม็ดสี ทำให้ตะกั่วถูกปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อสมดุลธรรมชาติ ปกติตะกั่วสามารถพบเจือปนอยู่ในดิน น้ำ อากาศ และในพืชในความเข้มข้นต่ำ ค่าเฉลี่ยที่พบในดิน 5-25 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ปริมาณที่พบในพืชพรรณตามธรรมชาติ อยู่ในช่วง 0.1-5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม แต่พืชที่ขึ้นในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วจะพบ 1-1,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (29)

จากการศึกษาของ วรวิทย์, 2524 (32) พบว่า พืชผักเศรษฐกิจของประเทศไทย มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ในช่วง 9.5-47.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ปริมาณการสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในพืชเพิ่มขึ้น และในผักคะน้าจะสะสมตะกั่วเฉลี่ยในลำต้น 25.6 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าปริมาณการสะสมในใบเฉลี่ย 14.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

อรรวรรณ, 2525 (35) พบว่า ปริมาณตะกั่วในผักคะน้าจากพื้นที่เกษตรกรรมอยู่ในช่วง 9.78-23.61 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งอยู่ในระดับที่ยังไม่เป็นพิษต่อต้นผักคะน้า และผักคะน้าได้รับตะกั่วทางใบได้ดีกว่าทางราก โดยเฉพาะตะกั่วซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ

ความเป็นพิษของตะกั่วต่อมนุษย์นั้น พบว่า ตะกั่วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายของเด็กได้มากกว่าผู้ใหญ่ และกระจายสะสมในร่างกายได้นาน 16 - 27 ปี โดยจะสะสมมากที่สุดในระยะลูก สำหรับที่เกิดจากพิษของตะกั่วจะปรากฏได้ในระบบต่างๆ เช่น ในระบบเลือด ตะกั่วจะยับยั้งการสร้างเม็ดเลือดแดงที่ไขกระดูก ทำให้เม็ดเลือดแดงผิดปกติ และแตกง่าย ในระบบประสาท ทำให้เนื้อสมองบวม ทำลายเยื่อหุ้มปลายประสาท ซึ่งมีผลต่อการพัฒนาทางสมองในเด็กเล็ก นอกจากนี้ยังมีผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ ทำให้อสุจิของเพศชาย และไข่ของเพศหญิงผิดปกติ และเป็นหมัน (29)

แคดเมียม

แคดเมียมมีลักษณะทางฟิสิกส์ เคมี และโครงสร้างอะตอมคล้ายคลึงสังกะสี ทำให้เข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ของสิ่งมีชีวิตได้ และมีความเป็นพิษสูง โดยทั่วไปจะพบแคดเมียมร่วมกับสังกะสีเสมอ โดยมีอัตราส่วน แคดเมียม/สังกะสี ประมาณ 1:100 ถึง 1:1,000 ปริมาณของแคดเมียมที่พบในธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ปริมาณของแคดเมียมเฉลี่ยที่พบในธรรมชาติ

แหล่งที่พบ	หน่วย	ปริมาณ
ดิน	Ppm	0.15
แหล่งน้ำจืด	Ppb	1.00
น้ำทะเล	Ppb	0.15
อากาศ	ug/m ³	0.002-0.02

ที่มา : กิตติ, 2528 (34)

แคดเมียมสามารถสะสมในพืชใบได้มากกว่าในเมล็ด และสามารถสะสมในร่างกายได้ 18 ปี (29) ปริมาณแคดเมียมในพืชโดยปกติจะมีค่าต่ำ

จากการศึกษาของ วรวิทย์, 2524 (32) พบว่า มีแคดเมียมปนเปื้อนในผักเศรษฐกิจของประเทศ ไทยอยู่ในช่วง 0.31-13.6 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีการสะสมในลำต้นผักคะน้า 0.95 มิลลิกรัม/ กิโลกรัม และมีปริมาณที่สะสมในใบ 0.45 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

รื่นฤดี, 2533 (8) นำน้ำจากบึงมักสันซึ่งมีปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมเฉลี่ย 0.6 ppb (36) มาใช้ในการปลูกผักคะน้าด้วยระบบปลูกในสารละลาย พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในเนื้อเยื่อ ผักคะน้าอายุ 8 สัปดาห์ มีค่าต่ำกว่า 0.01 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เช่นเดียวกับผลการศึกษาของชัตติยะ, 2533 (33) ซึ่งนำดินตะกอนจากบึงมักกะสันซึ่งมีปริมาณแคดเมียม 0.14 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มาใช้ ในการปลูกผักคะน้า พบว่า ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในผักคะน้า ต่ำกว่า 0.01 มิลลิกรัม/ กิโลกรัม

สำหรับความเป็นพิษของแคดเมียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ พบว่า จะทำให้เกิดการอักเสบ ของงูมก และคอ โดยจะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน เกิดอาการแน่นหน้าอก หายใจขัด และเป็นปอด บวม ซึ่งอาจรุนแรงถึงชีวิตได้ เนื่องจากเนื้อเยื่อของปอดถูกทำลาย (29)

2.6 ชนิดของพืชในการทดลอง

คะน้าใบ	
ชื่อท้องถิ่น	ผักคะน้า , คะน้าจีน
ชื่อสามัญ	Chinese Kale
ชื่อวิทยาศาสตร์	Brassica oleracea L. var alboglabra Bailey.
วงศ์	Cruciferae



คะน้า จัดอยู่ในพืชตระกูลกะหล่ำ เป็นพืชอายุ 2 ฤดู (Biennial) แต่ปลูกเป็นผักอายุฤดูเดียว (Annual) (16) ลำต้นกลมหนา สีเขียวเข้ม สูง 35-50 เซนติเมตร ใบรูปไข่ สีเขียวเข้มเป็นมัน ก้านใบหนา ออกดอกเป็นช่อ มีผลแบบฝักแฉ่ง (silique) เมล็ดกลมสีน้ำตาล ถึงดำ (17)

พันธุ์ผักคะน้าที่นิยมปลูกในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ

1. คะน้าใบ มี 2 ชนิด คือ คะน้าใบกลม กับคะน้าใบแหลม มีใบใหญ่ หนา คั่นอวบใหญ่ ก้านเล็ก คะน้าใบแหลมจะมีปลายใบแหลม และระยะระหว่างข้อห่างกว่าคะน้าใบกลม มีความทนทานต่อดินฟ้าอากาศได้ดี รสชาติหวานปนขมนิดๆ กรอบ

2. คะน้ายอดหรือคะน้าก้าน จะมีข้อยาว ใบน้อย ก้านใหญ่ รสกรอบอร่อย ด้านทานโรค และความร้อนได้ดี

คะน้าสามารถปลูกได้ดีตลอดปีในที่มีแหล่งน้ำอย่างเพียงพอ (18) ช่วงเวลาที่ให้ผลผลิตดีที่สุดอยู่ในช่วงเดือน ตุลาคม - เมษายน (16, 18, 19) ขึ้นได้ดีในดินแทบทุกชนิดที่มีความอุดมสมบูรณ์ มีความชื้นในดินสูงสม่ำเสมอ และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 5.5 - 6.8 อายุเก็บเกี่ยว 45 - 60 วัน (18, 19)

คะน้าเป็นผักที่นิยมบริโภคอย่างกว้างขวาง และเป็นผักที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ดังแสดงในตารางที่ 2-6 จากผลการวิจัยของ Robert, 1990 (อ้างใน 20) พบว่า คะน้ามีแคลเซียมสูง และร่างกายของมนุษย์สามารถดูดซึมแคลเซียมจากผักคะน้าได้ดีไม่น้อยกว่านม

ตารางที่ 2-6 แสดงคุณค่าทางอาหารของผักคะน้าในส่วนที่กินได้ ปริมาณ 100 กรัม

คุณค่าทางอาหาร	หน่วย	ปริมาณ
น้ำ	%	83
พลังงาน	กิโลแคลอรี	24
โปรตีน	กรัม	2.1
ไขมัน	กรัม	0.5
คาร์โบไฮเดรต	กรัม	2.2
แคลเซียม	มิลลิกรัม	245
ฟอสฟอรัส	มิลลิกรัม	80
เหล็ก	มิลลิกรัม	1.2
โซเดียม	มิลลิกรัม	75

ตารางที่ 2-6 แสดงคุณค่าทางอาหารของผักคะน้าในส่วนที่กินได้ ปริมาณ 100 กรัม (ต่อ)

คุณค่าทางอาหาร	หน่วย	ปริมาณ
โปรแตสเซียม	มิลลิกรัม	378
วิตามินบี 1	มิลลิกรัม	0.05
วิตามินบี 2	มิลลิกรัม	.08
ไนอาซีน	มิลลิกรัม	1
กรดแอสคอบิก	มิลลิกรัม	141
เบต้า-แคโรทีน	มิลลิกรัม	186.92
เชื้อใยอาหาร	กรัม	3.2

ที่มา : คัดแปลงจาก 1. มหาวิทยาลัยมหิดล และมูลนิธิโคโยต้าประเทศไทย, 2540 (20)
2. เมืองทอง และสุรรัตน์, 2525 (16)

จากการศึกษาลักษณะประจำพันธุ์บางประการของผักคะน้า โดย พิรุณ สุวรรณบริรักษ์, 2524 (21) พบว่า คะน้าใบให้ผลผลิตสูงในรูปของน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูง และมีความสม่ำเสมอของพันธุ์สูงกว่าคะน้ายอด

อารีย์ เสนานันท์สกุล, 2540 (15) ศึกษาเรื่อง การคัดเลือกเทคนิคที่เหมาะสมในการปลูกพืช โดยวิธีไฮโดรโปนิก พบว่าผักคะน้าที่ปลูกด้วยวิธีไฮโดรโปนิกในระบบ non-circulating system ให้ผลผลิตในรูปน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และพื้นที่ใบ สูงกว่าผักคะน้าที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิกเทคนิคอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

วันฤดี ศรีสุนทร, 2533 (8) ศึกษาการนำน้ำเสียจากบึงมักกะสันมาใช้ประโยชน์ในการปลูกผักคะน้าด้วยวิธีปลูกพืชในน้ำ พบว่า ผักคะน้าสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำเสียจากบึงมักกะสัน และสามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำเสียได้ แต่ให้ผลผลิตเมื่ออายุ 8 สัปดาห์ ในรูปน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต่ำกว่าผักคะน้าที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาในระบบต้นแบบทดลองขนาดเล็ก ในสภาพโรงเรือนชั่วคราว สถานที่ทำการทดลอง คือ บริเวณบ่อบำบัดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลายา

3.1 วัสดุอุปกรณ์

1. น้ำทิ้งชุมชน มหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลายา ใช้น้ำจากบ่อกักน้ำทิ้งก่อนเข้าระบบบำบัด จุดเก็บตัวอย่างน้ำแสดงดังภาพที่ 3-1 โดยใช้เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก สูบน้ำใส่ถังพลาสติกขนาดใหญ่ เพื่อนำไปยังบริเวณทดลอง

2. น้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น เนื่องจากระบบบำบัดน้ำทิ้งของมหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายาขัดข้อง จึงเตรียมโดยใช้น้ำทิ้งที่เก็บจากข้อที่ 1 มาทำการเติมอากาศ 24 ชั่วโมง

3. พืชทดลอง ใช้ต้นกล้าคะน้าใบ (*Brassica oleracea* L. var *alboglabra* Bailey) อายุ 30 วัน

4. สารละลายธาตุอาหารพืช ใช้สารละลายมาตรฐานสำหรับผักคะน้าของ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต พระนครศรีอยุธยา (43) ซึ่งมีส่วนประกอบ ดังนี้

ธาตุอาหารหลัก ปุ๋ยเคมีสูตร 21-21-21 5.0 กรัม / น้ำ 20 ลิตร

ธาตุอาหารรอง ธาตุอาหารเสริม 2.5 กรัม / น้ำ 20 ลิตร

ธาตุเหล็ก (NAFE EDTA) 0.03 M 10 หยด / สารละลายอาหาร 20 ลิตร

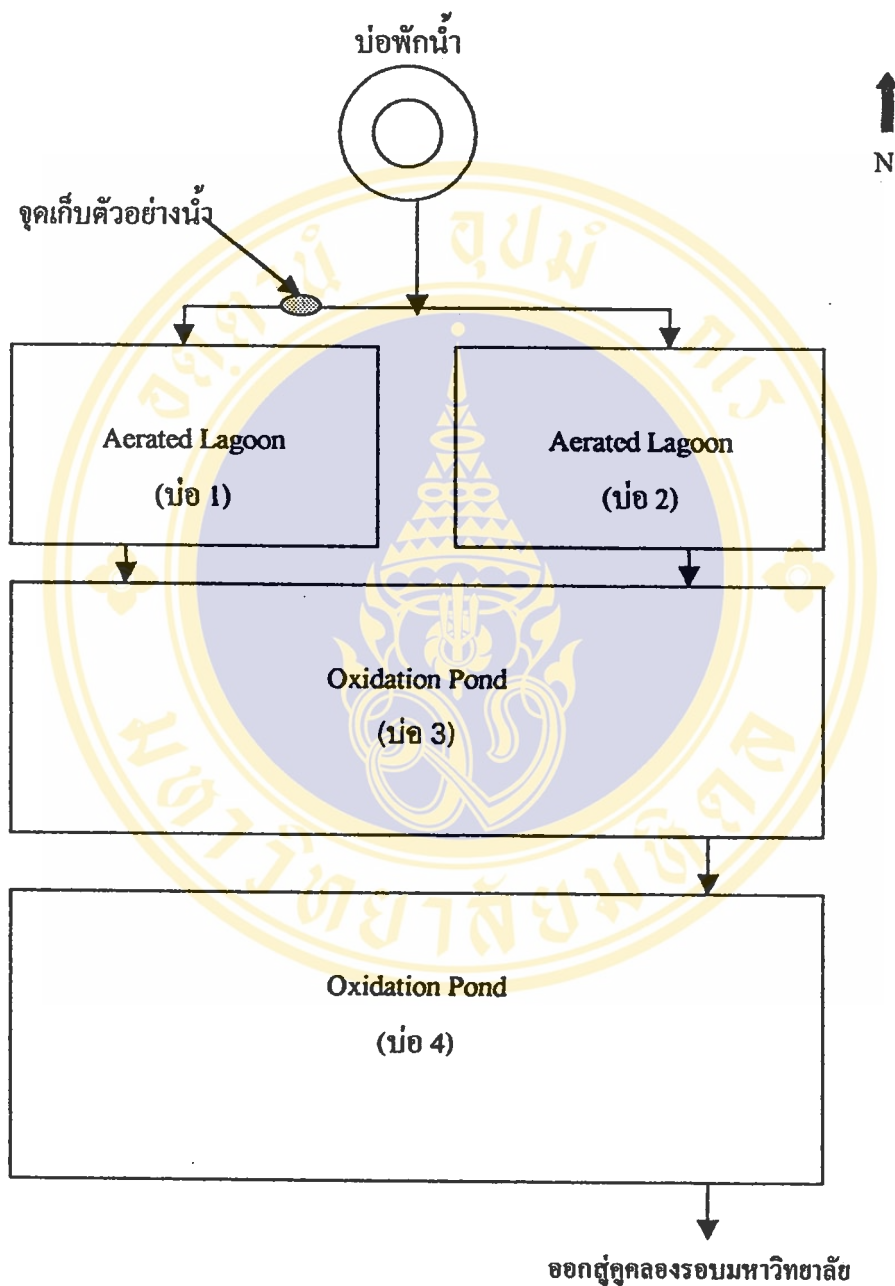
ในการเตรียมสารละลายธาตุอาหารพืชในการทดลองครั้งนี้ ใช้น้ำประปาเป็นตัวทำละลาย

5. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ ใช้สารเคมีเกรดงานวิเคราะห์ (Analytical Grade)

6. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- เครื่องมือวัด pH (pH Meter)
- เครื่องมือวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)
- เครื่องชั่งไฟฟ้า อย่างหยาบ , อย่างละเอียด
- เครื่อง Flamephotometer
- เครื่อง Spectrophotometer

- เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
- ตู้อบ (Hot Air Oven)



ภาพที่ 3-1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลอง บริเวณระบบบำบัดน้ำทิ้งมหาวิทยาลัยมหิดล

3.2 การวางแผนการทดลอง

ในการศึกษา วางแผนการทดลองแบบ 2 x 3 Factorial Incomplete Randomize Block Design ศึกษากระบวนการปลูกพืชในสารละลาย ซึ่งได้รับน้ำทิ้งชุมชนที่มีคุณลักษณะต่างกัน 2 ลักษณะ คือ น้ำทิ้งที่ไม่ผ่านระบบบำบัด กับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว โดยมีระดับความลึกของน้ำต่างกัน 3 ระดับ คือ 10 , 30 และ 50 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการศึกษาได้จัดชุดการทดลองเป็น 7 ชุดการทดลอง (Treatment) คือ

- ชุดการทดลองที่ 1 (T1) จัดระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านการบำบัด และมีระดับความลึกของน้ำทิ้ง 10 เซนติเมตร
- ชุดการทดลองที่ 2 (T2) จัดระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านการบำบัด และมีระดับความลึกของน้ำทิ้ง 30 เซนติเมตร
- ชุดการทดลองที่ 3 (T3) จัดระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านการบำบัด และมีระดับความลึกของน้ำทิ้ง 50 เซนติเมตร
- ชุดการทดลองที่ 4 (T4) จัดระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว และมีระดับความลึกของน้ำทิ้ง 10 เซนติเมตร
- ชุดการทดลองที่ 5 (T5) จัดระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว และมีระดับความลึกของน้ำทิ้ง 30 เซนติเมตร
- ชุดการทดลองที่ 6 (T6) จัดระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว และมีระดับความลึกของน้ำทิ้ง 50 เซนติเมตร
- ชุดการทดลองที่ 7 (T7) จัดระบบการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารพืช สูตรมาตรฐาน สำหรับการปลูกผักคะน้า (43) มีระดับความลึกของสารละลาย 10 เซนติเมตร

ในชุดการทดลองที่ 1 - 6 จะประกอบด้วย 2 หน่วยทดลอง คือ

- หน่วยทดลองที่ 1 (S1) เป็นหน่วยทดลองควบคุม (Control) ไม่มีการปลูกพืชลงในระบบทดลอง
- หน่วยทดลองที่ 2 (S2) เป็นหน่วยทดลองศึกษา ซึ่งทำการปลูกพืชในระบบ

ส่วนชุดการทดลองที่ 7 มีหน่วยการทดลองเพียง 1 หน่วย คือ หน่วยทดลองที่ทำการปลูกพืช เพื่อเป็นชุดทดลองควบคุม ในการศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักคะน้าในแต่ละชุดการทดลอง ในแต่ละหน่วยทดลองจะมีการศึกษา 2 ซ้ำ โดยชุดการทดลองที่ 1-6 จะทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และเก็บตัวอย่างน้ำทุก 10 วัน เป็นจำนวน 5 ครั้ง คือ เมื่อพืชที่ใช้ในการทดลองมีอายุ 40 ,

50 , 60 , 70 และ 80 วัน ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 7 จะทำการเติมสารละลายธาตุอาหารพืช ให้มีระดับเท่าเดิม ทุก 10 วัน เช่นกัน

ในการจัดแปลงการทดลอง ใช้การสุ่มแบบไม่สมบูรณ์ โดยจัดชุดการทดลองที่ได้รับน้ำ ที่ทั้งที่ระดับความลึกเท่ากัน ไว้ด้วยกัน และจัดวางชุดการทดลองที่ได้รับน้ำทั้งที่มีความลึกจากน้อย ไปมากตามแนวจากทิศใต้ ไปทิศเหนือ เพื่อให้ทุกชุดการทดลองได้รับแสงสว่างอย่างพอเพียง และ มีความสะดวกในการดูแลรักษา ซึ่งการจัดแปลงการทดลองแสดงดังรูปที่ 3-2

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมแปลงทดลอง

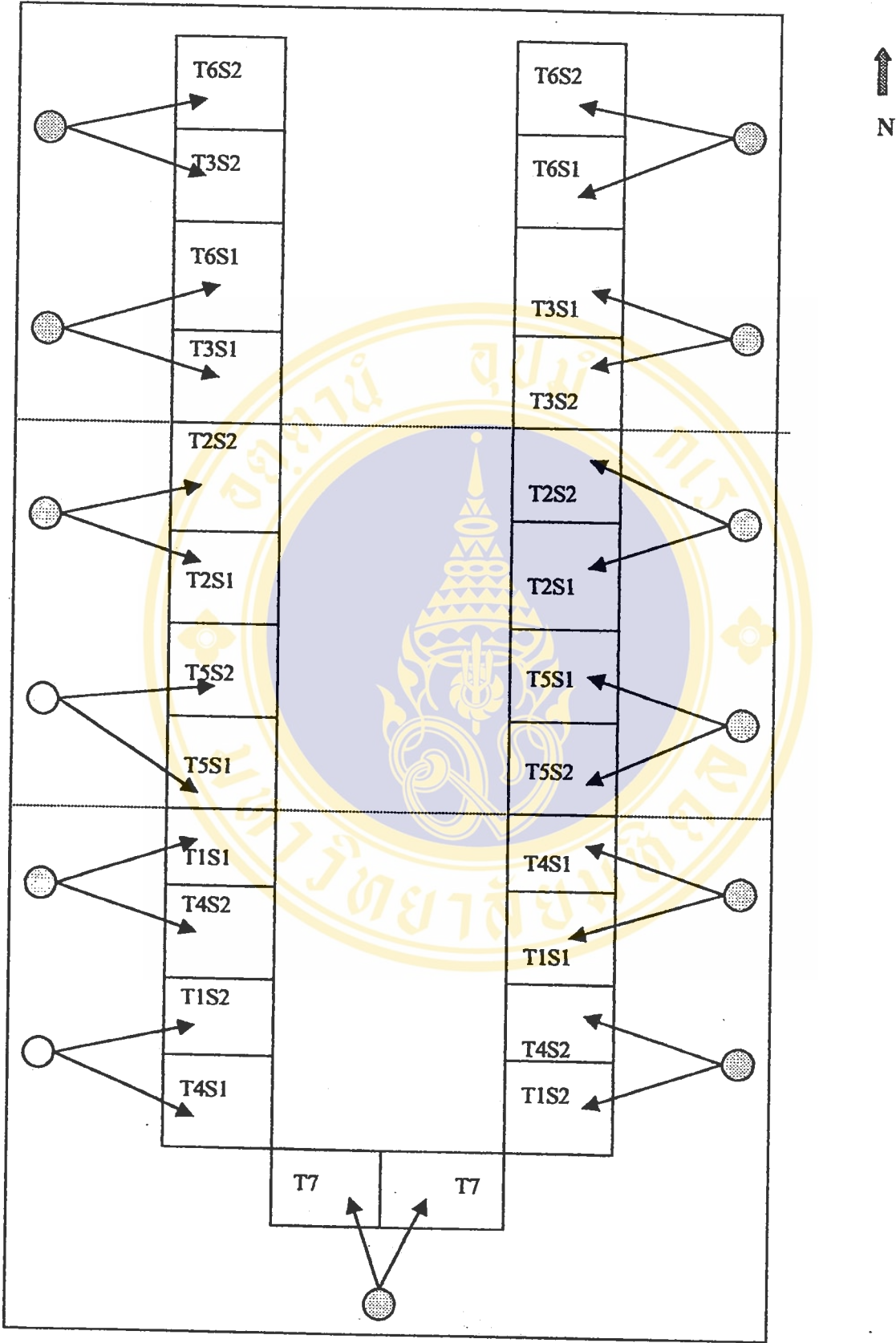
เตรียมกล่องโฟมขนาดพื้นที่หน้าตัด 45.5 x 45.5 ตารางเซนติเมตร ตัดแต่งให้มีระดับ ความลึกต่างกัน ตามระดับของน้ำทั้งในแต่ละชุดการทดลอง โดยให้ขอบกล่องสูงกว่าระดับของสารละลาย 3 เซนติเมตร ดังนั้น จะมีกล่องที่มีความลึกต่างๆ เป็นจำนวน ดังนี้

1. กล่องโฟมขนาด 45.5 x 45.5 x 13 ซม.	จำนวน 10	ใบ
2. กล่องโฟมขนาด 45.5 x 45.5 x 31 ซม.	จำนวน 8	ใบ
3. กล่องโฟมขนาด 45.5 x 45.5 x 53 ซม.	จำนวน 8	ใบ

รวมทั้งสิ้น 26 ใบ พร้อมฝาปิด แล้วเจาะบริเวณฝา เป็นช่องสี่เหลี่ยมขนาด 4 x 4 เซนติเมตร จำนวน 9 ช่อง โดยจุดกึ่งกลางของช่องจะห่างจากขอบกล่อง 7.25 เซนติเมตร และระยะ ระหว่างช่องตามแนวนอน และแนวตั้ง ห่างกัน 15 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3-3 แต่ละกล่องจะต่อสาย ยางที่มีหัวทรายรูปแท่ง ยาว 8 นิ้ว เพื่อเปิดป้อนลมเติมอากาศ โดยติดตั้งแท่งทรายในแนวทะแยงมุม ของกล่อง ที่ระดับลึก 10 เซนติเมตรจากผิวของน้ำ โดยยึดผูกไว้กับฝากล่อง ภายในกล่องบุด้วย พลาสติกบางใส เพื่อป้องกันสารปนเปื้อน (ภาพที่ 3-4)

3.3.2 โรงเรือนทดลอง

ใช้โรงเรือนทดลองชั่วคราวอย่างง่าย ขนาด 3 x 7.5 เมตร รอบโรงเรือนบุตาเล็ก เพื่อ ช่วยป้องกันแมลง หลังคาใช้พลาสติกใส เพื่อป้องกันฝน โดยจัดตั้งโรงเรือนในแนวเหนือ-ใต้ เพื่อ รับแสงได้ทั่วถึงตลอดวัน (ภาพที่ 3-5)

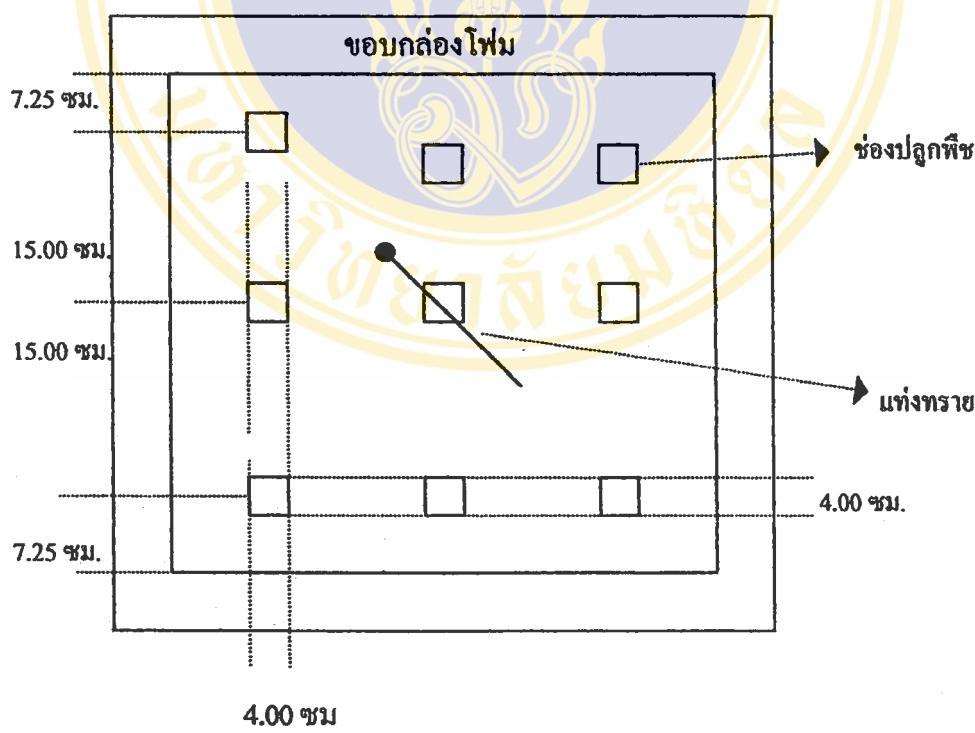


ภาพที่ 3-2 แผนผังการจัดแปลงทดลอง และตำแหน่งของชุดการทดลอง แท่งทราย และเครื่องปั๊มอากาศ

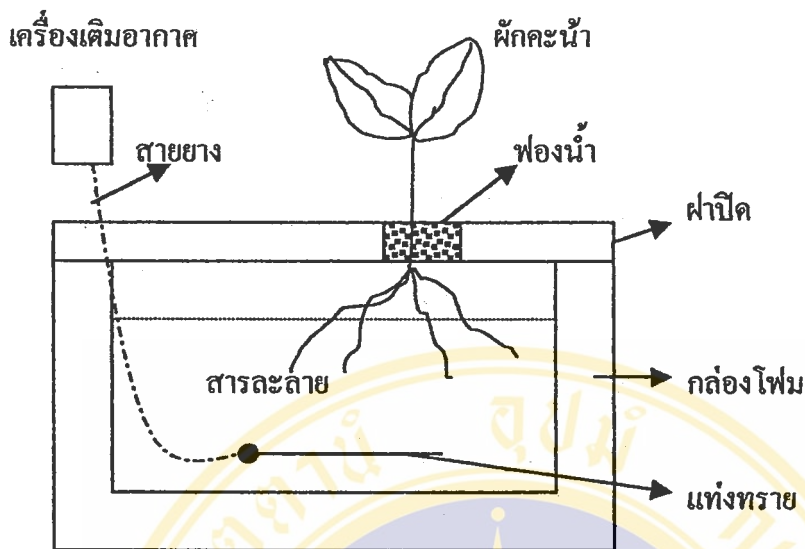
3.3.3 การเตรียมพืชทดลอง

การเพาะกล้าผักคะน้า

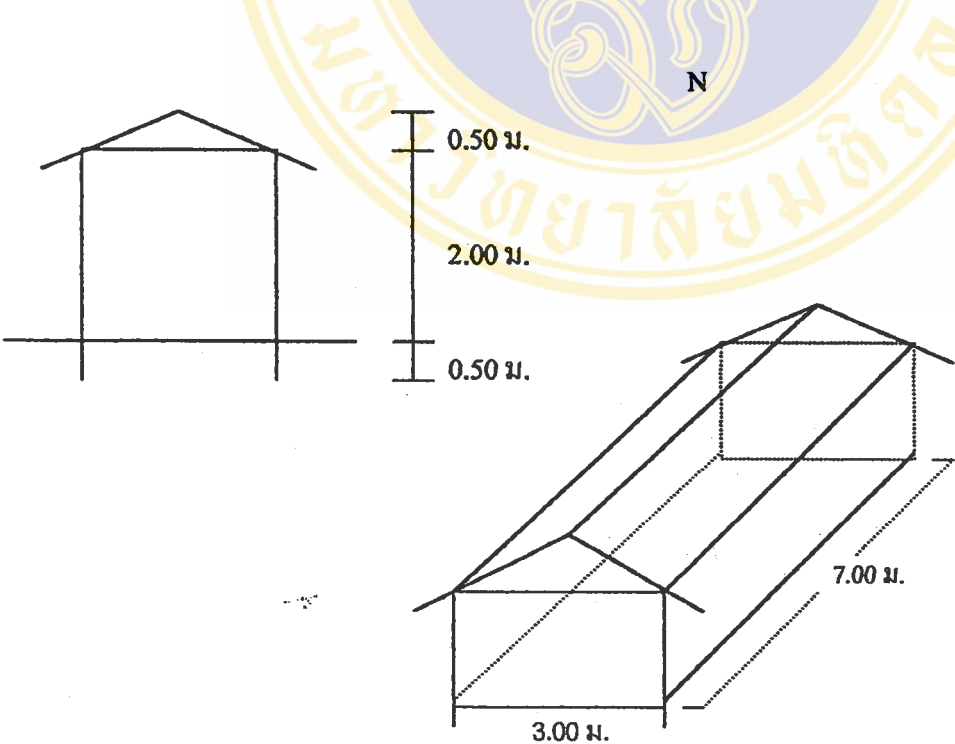
นำเมล็ดผักคะน้าแช่น้ำ 12 ชั่วโมง เลือกเมล็ดที่จมน้ำมาวางกระเบาะเพาะ ซึ่งปูด้วยกระดาษซับที่ชุ่มน้ำ คลุมทับด้วยกระดาษอีกชั้นหนึ่ง พรมน้ำพอชุ่ม ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เมื่อมีต้นอ่อนงอกยาวประมาณ 1 เซนติเมตร คึงกระดาษที่คลุมออก แล้วนำไปปรับแสงแดดอ่อนๆ และพรมน้ำให้ชุ่มประมาณ 7 วัน เมื่อต้นกล้าแข็งแรง จึงย้ายลงในช่องโฟมที่เตรียมไว้ โดยใช้ฟองน้ำหุ้มลำต้นไว้ ให้รากพืชและผิวของสารละลาย ธาตุอาหารที่เจือจางลง 10 เท่า เปิดป้มอากาศเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นเลือกต้นกล้าอายุ 30 วัน ที่แข็งแรง ลงปลูกในแต่ละชุดการทดลอง และให้อากาศตลอดเวลา (ภาพที่ 3-4) ทำการเก็บเกี่ยวเมื่อมีอายุ 80 วัน



ภาพที่ 3-3 ตำแหน่งของการเจาะช่องเพื่อการปลูกพืช และตำแหน่งของช่องต่อสายเคเบิลอากาศ



ภาพที่ 3-4 ภาพตัดขวางแสดงตำแหน่งของการจัดวางพืชในชุดการทดลอง



ภาพที่ 3-5 ลักษณะโครงสร้างโรงเรียนที่ใช้ทดลอง

3.3.4 การเก็บตัวอย่าง

1. การเก็บตัวอย่างน้ำ

- เก็บตัวอย่างน้ำก่อนนำมาใช้ในการปลูกพืช ใส่ขวดพลาสติก 500 มิลลิลิตร เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ปริมาณธาตุอาหาร และโลหะหนัก

- เก็บตัวอย่างน้ำ ก่อนและหลังการเปลี่ยนถ่ายน้ำทุก 10 วัน ของแต่ละชุดการทดลอง ยกเว้นชุดการทดลองที่ 7 ตัวอย่างละ 500 มิลลิลิตร ใส่ขวดพลาสติก ปิดฝาและแช่เย็นเพื่อไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ครั้งละ 24 ตัวอย่าง รวมกับตัวอย่างน้ำก่อนเข้าระบบครั้งละ 2 ตัวอย่าง รวมเป็น 26 ตัวอย่าง เป็นจำนวน 5 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 150 ตัวอย่าง

2. การเก็บตัวอย่างผักคะน้า เก็บผักคะน้าพร้อมรากที่มีอายุ 80 วัน จากทุกชุดการทดลอง บรรจุใส่ถุงพลาสติก เพื่อป้องกันปนเปื้อน นำไปแช่ตู้เย็น

3.3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำที่เก็บใส่ขวดพลาสติก ปิดสนิทแช่เย็น เมื่อจะทำการวิเคราะห์ นำออกมาวางไว้ให้อยู่ในอุณหภูมิห้อง เขย่าให้ทั่วแล้วจึงนำไปทำการวิเคราะห์

ตัวอย่างพืช

ล้างลำต้น และรากผักคะน้าด้วยน้ำประปา 2 ครั้ง และล้างในน้ำกลั่น 1 ครั้ง ตัดส่วนรากออกจากลำต้น นำมาชั่งหาน้ำหนักสด แล้วนำไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง เมื่อตัวอย่างแห้งสนิท นำมาชั่งหาน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำไปบดละเอียด เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมธาตุอาหาร และโลหะหนัก

2. การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำใช้วิธีการวิเคราะห์ของ Standard Method for The Examination of Water and Wastewater (36) โดยมีดัชนีคุณภาพน้ำที่ทำการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ดัชนีคุณภาพน้ำ ธาตุอาหารพืช โลหะหนัก และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

Parameter	Method
Water Quality	
pH	pH Meter
Conductivity	Conductivity Meter
BOD	Azide Modification
TSS	Filtration
TP	Ascobic Acid Method
TKN	Kjeldahl
Nutrient and Heavy Metal	
NO ₃ ⁻ -N	Brucine Method
K	Flamephotometry Method
Fe	Phenantroline Method
Mg	Atomic Absorption Spectrophotometer
Mn	Atomic Absorption Spectrophotometer
Pb	Atomic Absorption Spectrophotometer
Cd	Atomic Absorption Spectrophotometer

การวัดผลผลิต และการวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

- การวัดความสูง ส่วนเหนือพื้น (Shoot Length)
- การวัดพื้นที่ใบ
- การวัดจำนวนใบ
- การวัดน้ำหนักสด หลังเก็บเกี่ยว
- การวัดน้ำหนักแห้ง หลังเก็บเกี่ยว
- การวิเคราะห์ธาตุอาหาร และ โลหะหนัก ตามวิธีของ Chemical Analysis of Ecological Material

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.4.1 สถิติเชิงพรรณนา ใช้อธิบายความแตกต่าง ของแต่ละตัวแปรอิสระในรูปของค่าเฉลี่ย , ใช้แผนภูมิ (กราฟ) ในการแสดงความแตกต่าง หรือความสัมพันธ์ ของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตาม , ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด ใช้คำร้อยละ

3.4.2 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) เพื่อทดสอบหาความแตกต่างทางสถิติ



บทที่ 4

ผลการทดลอง และ อภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำทิ้งชุมชนจากมหาวิทยาลัยมหิดล ศูนย์ศาลาया ก่อนได้รับการบำบัด (น้ำทิ้งดิบ) กับ น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นโดยการเติมอากาศและตกตะกอนด้วยสารส้ม พบว่า คุณภาพน้ำ และลักษณะของน้ำทั้ง 2 ประเภท เป็นดังนี้

4.1.1 น้ำเสียชุมชนมหาวิทยาลัยมหิดลศูนย์ศาลาया

ลักษณะของน้ำที่ใช้ในการทดลองมีสีคล้ำ มีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า หรือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถมองเห็นตะกอนแขวนลอยในมวลน้ำ อุณหภูมิของน้ำตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 25-31 องศาเซลเซียส เมื่อศึกษาคุณภาพของน้ำ พบว่า มีค่าเฉลี่ย ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) = 7.44 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) = 120×10 ไมโครโมห์ ต่อเซนติเมตร ความเข้มข้นของบีโอดี (BOD) = 63.24 มก./ล. ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) = 37.91 มก./ล. ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) = 21.34 มก./ล. ความเข้มข้นของไนเตรด-ไนโตรเจน = 1.05 มก./ล. ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (TP) = 9.32 มก./ล. (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4-1) ส่วนปริมาณธาตุอาหารพืชที่ทำการวิเคราะห์ พบว่า มีปริมาณของโปแตสเซียม (K) = 6.00 มก./ล. เหล็ก (Fe) = 0.77 มก./ล. แมงกานีส (Mn) = 0.46 มก./ล. และ แมกนีเซียม (Mg) = 30.93 มก./ล. สำหรับโลหะหนัก คือ ตะกั่ว (Pb) และ แคดเมียม (Cd) ไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากมีปริมาณต่ำกว่าความสามารถในการตรวจวัดของเครื่องมือ คือ ต่ำกว่า 0.05 มก./ล. (รายละเอียดดังตารางที่ 4-2)

4.1.2 น้ำเสียชุมชนมหาวิทยาลัยมหิดลศูนย์ศาลายาที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม และเติมอากาศ ทำให้น้ำมีความใสกว่าน้ำเสียดิบและไม่มียากันแต่ยังสามารถเห็นตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กๆ ในมวลน้ำ อุณหภูมิ ของน้ำตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 23-27 องศาเซลเซียส สำหรับคุณภาพของน้ำมีค่าเฉลี่ย ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) = 8.16 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) = 90 x 10 ไมโครโมห์ ต่อ เซนติเมตร ค่าความเข้มข้นของบีโอดี (BOD) = 9.20 มก./ล. ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) 5.38 มก./ล. ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) = 16.76 มก./ล. ความเข้มข้นของไนเตรต-ไนโตรเจน = 1.63 มก./ล. ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (TP) = 5.00 มก./ล. (รายละเอียดแสดงคังคารางที่ 4-1) ปริมาณธาตุอาหารพืชที่ตรวจพบมีดังนี้ โพแทสเซียม (K) = 3.33 มก./ล. แมกนีเซียม (Mg) = 21.83 มก./ล. สำหรับ ปริมาณของเหล็ก (Fe) , แมงกานีส (Mn) , แคดเมียม(Cd) และตะกั่ว(Pb) ไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากมีปริมาณต่ำกว่าความสามารถในการตรวจวัดของเครื่องมือ

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ศึกษาทดลอง

คุณสมบัติ ที่ทำการศึกษา	น้ำที่ใช้ในการศึกษาทดลอง					
	น้ำเสียดิบ			น้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น		
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
pH	7.60	7.31	7.44	7.77	8.38	8.16
Conductivity (µMöh/cm)	80x10	140x10	120x10	90x10	90x10	90x10
BOD (mg/l)	188.40	16.50	63.24	10.08	8.34	9.202
SS (mg/l)	56.52	17.00	37.91	6.28	3.50	5.38
TKN (mg/l)	30.54	12.29	21.34	29.68	7.50	16.76
TP (mg/l)	20.24	3.18	9.33	8.66	1.70	5.00
Nitrate (mg/l)	4.69	0.14	1.05	7.26	0.19	1.63

ตารางที่ 4-2 ปริมาณธาตุอาหารพืช และ โลหะหนักในน้ำที่ศึกษาทดลอง

ธาตุอาหารพืช และ โลหะหนัก	น้ำที่ใช้ในการทดลอง	
	น้ำเสียดิบ	น้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น
K (mg/l)	06.00	03.33
Fe (mg/l)	00.77	nd
Mn (mg/l)	00.46	nd
Mg (mg/l)	30.93	21.83
Pb (mg/l)	nd	nd
Cd (,g/l)	nd	nd

หมายเหตุ nd หมายถึง มีปริมาณต่ำกว่า 0.05 มก./ล.

4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบการปลูกพืชในสารละลาย

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ 3 ระดับ ความลึก คือ 10 ซม. , 30 ซม. และ 50 ซม. โดยที่ศึกษาถึงการใช้น้ำที่แตกต่างกัน 2 ประเภท คือ น้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัด และ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว ปรากฏว่า เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ ชุดการทดลองที่ ทำการศึกษาในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด ที่ระดับความลึก 30 ซม. และ 50 ซม. ไม่สามารถทำการศึกษาคต่อไปได้ เนื่องจากผักคะน้าในทั้ง 2 ชุดการทดลองตายทั้งหมด แสดงว่า ระบบ การปลูกผักคะน้าในสารละลายไม่เหมาะสมในการใช้บำบัดน้ำเสียดิบ ที่ระดับความลึก 30 ซม. ขึ้นไป สำหรับชุดการทดลองที่สามารถทำการศึกษาได้จนถึงเวลาสิ้นสุดการทดลองได้แก่

1. ชุดการทดลองที่ 1 (T1) คือ ระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำเสียดิบที่ความลึกน้ำ 10 ซม.
2. ชุดการทดลองที่ 4 (T4) คือ ระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทั้งผ่านการบำบัดขั้นต้น มีความลึกน้ำ 10 ซม.
3. ชุดการทดลองที่ 5 (T5) คือ ระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทั้งผ่านการบำบัดขั้นต้น มีความลึกน้ำ 30 ซม.
4. ชุดการทดลองที่ 6 (T6) คือ ระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทั้งผ่านการบำบัดขั้นต้น มีความลึกน้ำ 50 ซม

5. ชุดการทดลองที่ 7 (T7) คือ ระบบการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารพืชสูตรมาตรฐาน สำหรับ การปลูกผักคะน้า (43) และมีความลึกน้ำ 10 ซม.

ผลของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของแต่ละชุดการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัด และมีความลึกน้ำ 10 เซนติเมตร

ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบในช่วงอายุทุก 10 วัน ของผักคะน้า ตั้งแต่ พืชอายุ 30 วัน จนถึง 80 วัน แสดงดังตารางที่ 4-3

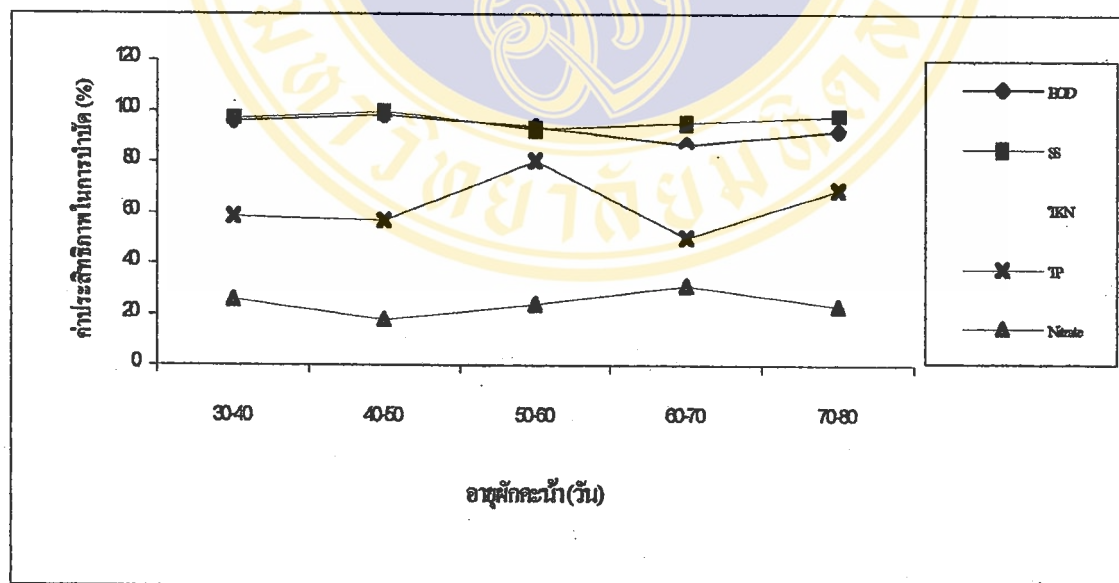
ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียดิบ ที่ความลึก10 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัด ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้าทุก 10 วัน (%)				
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน
BOD	95.98	98.06	93.82	86.66	91.93
SS	96.84	99.68	92.94	94.88	97.54
TKN	85.76	77.13	77.86	83.46	70.51
TP	58.65	56.47	80.19	50.00	68.63
Nitrate	25.67	17.76	24.14	31.18	23.37

จากตารางจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้เสียดิบ ในทุก ช่วงอายุของพืช มีความสามารถในการบำบัด BOD ได้ร้อยละ 86.66 – 98.06 ประสิทธิภาพในการลด ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำ (SS) ร้อยละ 92.94 – 99.68 สามารถลดปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดได้ ร้อยละ 70.51 – 85.76 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของระบบที่มีฝาปิดอยู่ด้านบนภาชนะที่บรรจุน้ำ เมื่อเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนจากไนเตรคในน้ำไปเป็นกาซไนโตรเจน แต่ไม่สามารถ

ระเหยออกไปสู่อากาศได้เต็มที่ ทำให้ก๊าซไนโตรเจนบางส่วนละลายกลับลงมาในมวลน้ำอีกครั้งหนึ่ง ประกอบกับการเปลี่ยนถ่ายน้ำที่ทำทุก 10 วัน ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวอาจไม่นานพอที่จะทำให้พืชสามารถดึงไนโตรเจนในน้ำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร สำหรับประสิทธิภาพในการลดปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) อยู่ระหว่างร้อยละ 50 – 80.19 ส่วนประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนเตรดไนโตรเจนในการศึกษานี้ ใช้การหาประสิทธิภาพโดยเทียบจากชุดการทดลองควบคุมที่ไม่ได้ทำการปลูกพืช เนื่องจากในน้ำเสียโดยทั่วไปจะสามารถทำการตรวจวัดค่า ไนเตรด-ไนโตรเจนได้ค่อนข้างต่ำ เพราะสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัดจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย และไนไตรต์ เมื่อผ่านการบำบัด หรือได้สัมผัสกับอากาศ จะเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของไนเตรด-ไนโตรเจน ดังนั้นประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนเตรด-ไนโตรเจนในการศึกษารุ่นนี้จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่มีการปลูกพืช เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการปลูกพืช ข้อมูลจากตารางชี้ให้เห็นว่าในระบบที่มีการปลูกพืชสามารถลดปริมาณของไนเตรด-ไนโตรเจนได้ร้อยละ 17.76 ถึง ร้อยละ 31.18 ของระบบที่ไม่มีการปลูกพืช

สำหรับการศึกษาดังกล่าวถึงผลของความแตกต่างของอายุผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัด



ภาพที่ 4-1 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียดิบที่ความลึกน้ำ 10 ซม

ของระบบนั้น จากข้อมูลในตารางที่ 4-3 และจากภาพที่ 4-1 ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกัน ได้ชัดเจน แต่พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD และ SS มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบกว่าพารามิเตอร์อื่นๆ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมแล้วมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งอาจเป็นเพราะ ความสูงของระดับน้ำต่ำ ปริมาณน้ำน้อย ทำให้อากาศจากเครื่องเติมอากาศ ผสมเข้ากับมวลของน้ำอย่างทั่วถึง จึงมีปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำมาก และมีการตกตะกอนของสารแขวนลอยได้ดี สำหรับความสามารถในการบำบัดค่าไนเตรด-ไนโตรเจน และค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) มีความสอดคล้องกัน นั่นคือ สามารถลดปริมาณของไนโตรเจนได้มากที่สุดในช่วงที่ผักคะน้ามียายุ 60-70 วัน และมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตลอดการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน

4.2.2 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 10 เซนติเมตร

ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ แสดงดังตารางที่ 4-4

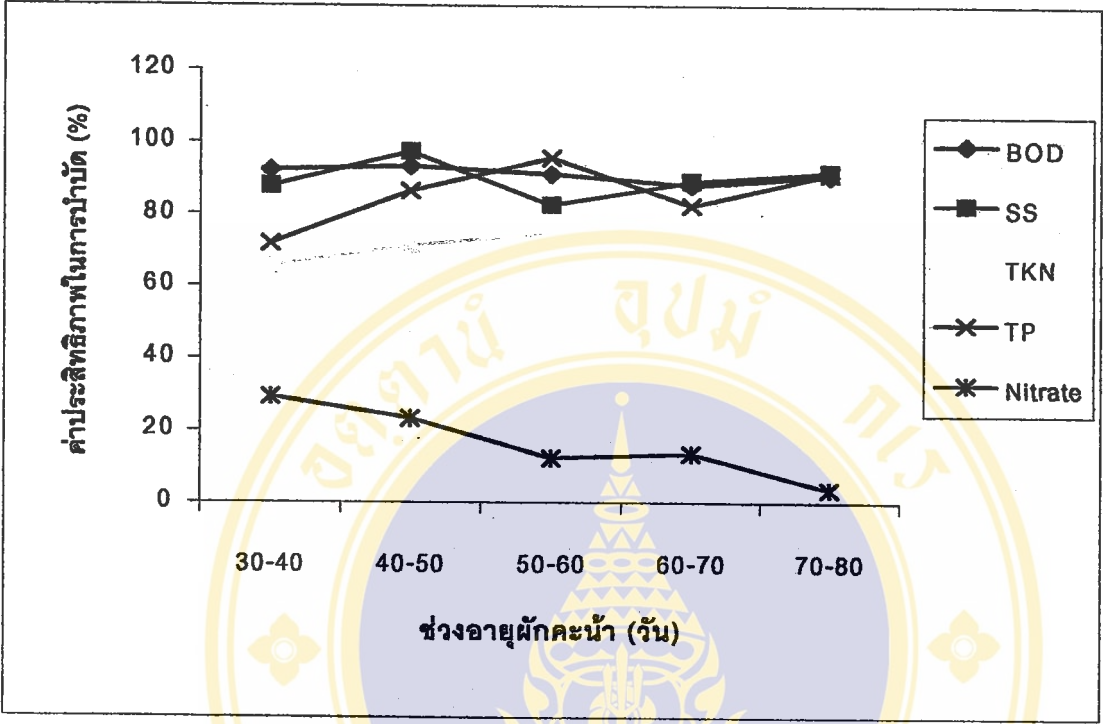
ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น และมีความลึกน้ำ 10 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัด ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้าทุก 10 วัน (%)				
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน
BOD	92.16	93.16	91.04	88.13	90.60
SS	87.83	97.28	82.48	89.14	91.65
TKN	65.33	71.15	74.66	68.59	62.95
TP	71.73	86.37	95.62	82.35	91.28
Nitrate	29.43	23.27	12.30	13.62	3.56

จากข้อมูลในตารางที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 10 เซนติเมตร สามารถทำการบำบัดค่า BOD ได้ร้อยละ 88.13-93.16 และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำ (SS) ได้ร้อยละ 82.48-97.28 สำหรับความ

สามารถในการลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ของระบบมีประสิทธิภาพร้อยละ 65.33-74.66 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบที่ระดับความลึกเดียวกัน(ร้อยละ 70.51-85.76) แต่สำหรับความสามารถในการลดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด ร้อยละ 77.73-95.62 มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบที่มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 50.00-80.19 ความสามารถในการลดปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจน มีค่าร้อยละ 3.56-29.43 นั่นคือ ในระบบที่มีการปลูกพืชจะสามารถลดปริมาณไนเตรตในน้ำได้มากกว่าชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชได้ไม่มากนัก คือในช่วงอายุ 30 วัน ถึง 70 วัน มีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 10 แต่ในช่วงอายุ 70-80 วันมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพียงร้อยละ 3.56

สำหรับการศึกษาถึงผลของความแตกต่างของอายุผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบนั้น จากข้อมูลในตารางที่ 4-4 และจากภาพที่ 4-2 ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ กับช่วงอายุของผักคะน้าได้ชัดเจน แต่แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD และ SS มีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงค่อนข้างต่ำ หรือมีความคงที่ค่อนข้างสูง เพราะในระบบนี้มีระดับน้ำสูงเพียง 10 ซม. ปริมาณน้ำในระบบจึงน้อยเมื่อเทียบกับระบบที่มีความลึกน้ำมากกว่า ทำให้ปริมาณอากาศจากเครื่องเติมอากาศสามารถผสมเข้ากับมวลน้ำในระบบได้ทั่วถึง เช่นเดียวกับกับระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบที่ความลึกของน้ำ 10 ซม. เท่ากัน ส่วนความสามารถในการลดปริมาณ TKN มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในช่วงอายุ 30-50 วัน และลดลงในช่วงอายุ 50-80 วัน เช่นเดียวกันกับประสิทธิภาพในการบำบัด TP ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในช่วงที่ผักคะน้ามีอายุ 30-50 วัน แล้วลดลงในช่วง อายุ 50-80 วัน



ภาพที่ 4-2 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 10 เซนติเมตร

4.2.3 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 30 เซนติเมตร

ประสิทธิภาพในการบำบัด แสดงดังตารางที่ 4-5

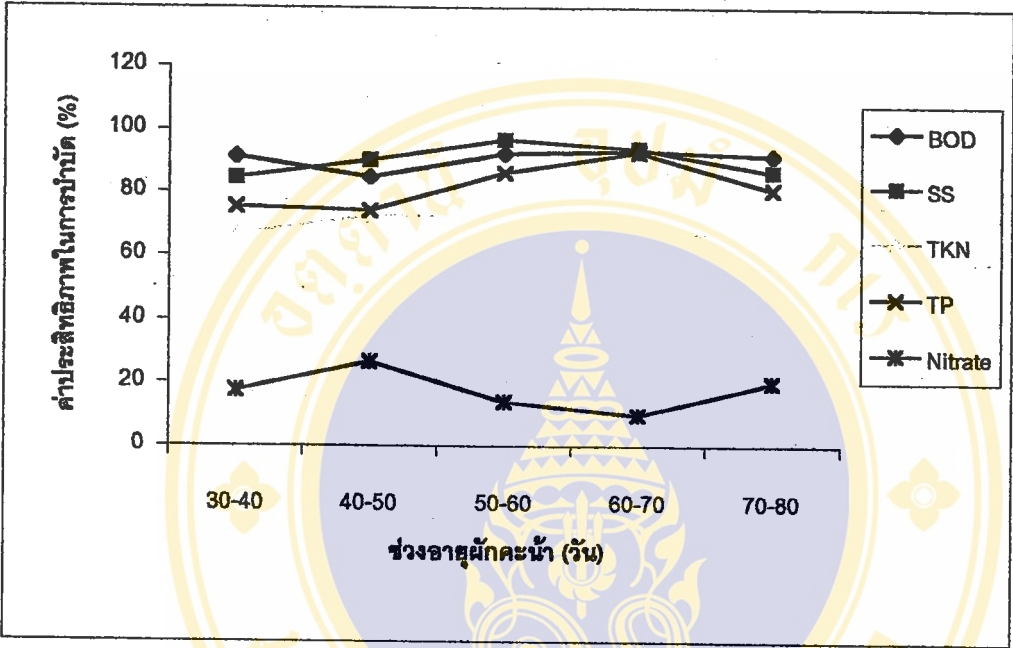
ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 30 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัด ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้าทุก 10 วัน (%)				
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน
BOD	91.41	84.89	92.40	93.31	91.77
SS	84.54	90.30	96.81	94.00	86.61
TKN	66.80	72.47	72.44	69.46	63.39
TP	75.36	74.13	86.34	92.94	80.96
Nitrate	17.58	26.76	14.13	9.94	20.24

จากตารางที่ 4-5 แสดงประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 30 ซม. มีความสามารถในการลดปริมาณของ BOD ร้อยละ 89.00-93.31 และปริมาณสารแขวนลอย (SS) ได้ ร้อยละ 84.54-96.81 และสามารถลดปริมาณของ BOD และ SS ได้สูงสุดในช่วงที่ผักคะน้ามีอายุ 50-70 วัน เช่นเดียวกันกับประสิทธิภาพในการลดปริมาณ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) มีค่าร้อยละ 74.13-92.94 โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อผักคะน้ามีอายุ 50-70วัน ความสามารถมการลดปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ได้ร้อยละ 63.39-72.47 ช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ช่วงที่ผักคะน้ามีอายุ 40-60 วัน สำหรับความสามารถในการลดปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจน มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 9.94 - 26.76 และมีค่าสูงสุดในช่วงที่ ผักคะน้ามีอายุ 40-50วัน

สำหรับการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอายุผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ นั้นเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-3 พบว่าไม่สามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกันได้ชัดเจน แต่พบว่าพารามิเตอร์ แต่ละตัวจะถูกบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงอายุที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ ในช่วงที่ผักคะน้าอายุ 40-50 วัน จะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของ ไนเตรต และ ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ได้มากกว่าช่วงอื่นๆ และเมื่อผักคะน้ามีอายุในช่วง 50-70 วันระบบมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ BOD SS และ TP สูงกว่าช่วงอายุอื่น เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ระบบที่ผ่านมาพบว่า ความสามารถในการบำบัด BOD ของระบบนี้มีค่าของประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเฉลี่ยต่ำกว่า

2 ระบบ ข้างต้น ซึ่งอาจเป็นเพราะในระบบนี้มีระดับของน้ำสูงกว่า มวลของน้ำมากกว่า อาจมีผลให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมีความทั่วถึงน้อยกว่า



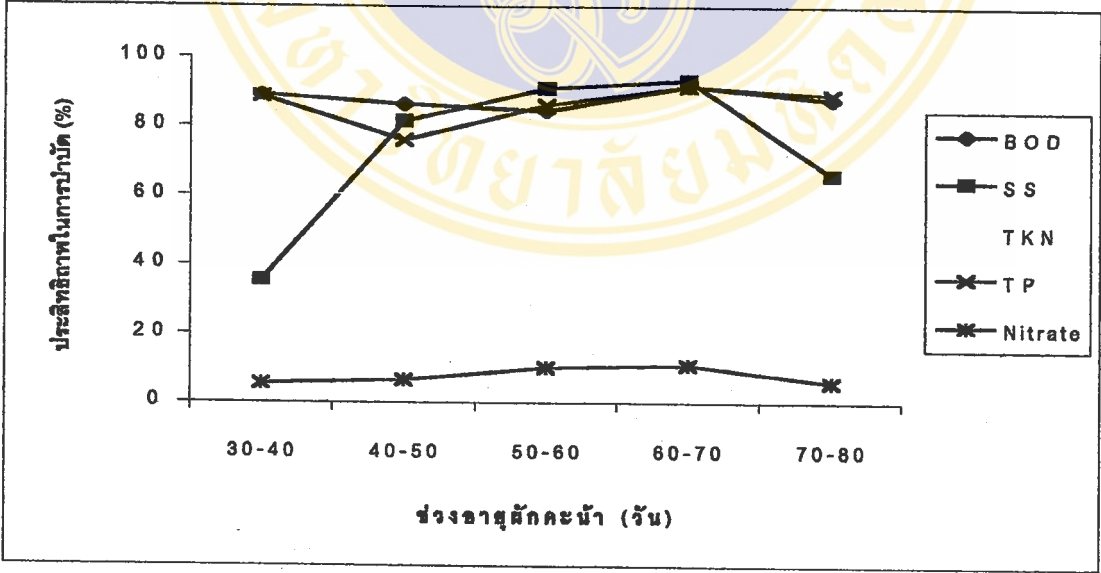
ภาพที่ 4-3 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำทิ้งเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 30 เซนติเมตร

4.2.4 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร

ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบในช่วงอายุทุก 10 วัน ของผักคะน้า ตั้งแต่พืชอายุ 30 วัน จนถึง 80 วัน แสดงดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัด ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้าทุก 10 วัน (%)				
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน
BOD	89.18	86.45	84.69	92.00	87.92
SS	35.52	81.53	91.15	93.71	66.02
TKN	60.00	60.44	64.15	64.45	52.94
TP	88.77	75.96	86.34	91.76	89.45
Nitrate	5.46	6.50	10.36	11.09	5.95



ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 50 เซนติเมตร

จากตารางที่ 4-6 และจากภาพที่ 4-4 แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกของน้ำ 50 ซม. ระบบมีความสามารถในการลดปริมาณของ BOD ได้ร้อยละ 84.69-92.00 ส่วนความสามารถในการลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำ (SS) มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วง ร้อยละ 35.52 ถึง ร้อยละ 93.71 โดยที่ในช่วงที่ผักค่น้ำมีอายุ 30-40 วัน หรือในช่วงเริ่มการทดลองระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำสุด ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ในระบบนี้มีความลึกของน้ำมาก มีปริมาณน้ำในระบบสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ประกอบกับในช่วงแรกรากของพืชยังมีน้อย ทำให้สามารถดักกรองตะกอนได้น้อยกว่ากว่าระบบที่มีระดับน้ำต่ำกว่า สำหรับความสามารถในการลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ของระบบ พบว่า มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ TKN ร้อยละ 52.94-64.45 ในขณะที่ลดปริมาณของไนเตรตได้ร้อยละ 5.46-11.09 ซึ่งน้อยกว่าทุกระบบที่ทำการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของน้ำในระบบที่มีมาก เมื่อสารประกอบไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ มีการเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของไนเตรต ทำให้มีความเข้มข้นของไนเตรตมาก ในขณะที่การเจริญเติบโตของผักค่น้ำในชุดการทดลองนี้น้อยกว่าในชุดการทดลองอื่น ส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการดึงไนเตรตในน้ำมาใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตของพืชเป็นไปได้น้อยด้วยเช่นกัน จากภาพที่ 4-4 แสดงให้เห็นความสอดคล้องกันในการบำบัดค่า TKN กับ ไนเตรต ของระบบ คือในช่วงที่ระบบสามารถลดปริมาณ TKN ได้มากก็เป็นช่วงที่สามารถลดปริมาณไนเตรตได้มาก และในช่วงที่ลดปริมาณ TKN ได้น้อยก็สามารถลดไนเตรตได้น้อยด้วยเช่นกัน ส่วนความสามารถของระบบในการลดปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) พบว่า มีประสิทธิภาพร้อยละ 75.96-91.76

สำหรับการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอายุผักค่น้ำ ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบนั้นเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-4 พบว่าไม่สามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกันได้ชัดเจน แต่พบว่าพารามิเตอร์ แต่ละตัวจะถูกบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงอายุเดียวกัน คือ ในช่วงที่ผักค่น้ำมีอายุ 60-70 วัน

4.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกัน ที่ระดับความลึกเดียวกัน

จากการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียดิบ ที่ระดับความลึก 30 ซม. และ 50 ซม. ไม่สามารถดำเนินระบบจนถึงสิ้นสุดการทดลองได้ เนื่องจากผักค่น้ำที่ทำการปลูกในทั้ง 2 ชุดการทดลอง

ตายทั้งหมด เมื่อดำเนินการทดลองได้เพียง 2 สัปดาห์ ดังนั้นในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับน้ำทิ้งที่มีลักษณะสมบัติต่างกัน คือ ระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบ กับระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น จึงสามารถทำการเปรียบเทียบได้เฉพาะชุดการทดลองที่มีระดับความลึกของน้ำ 10 ซม. ซึ่งรายละเอียดของประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้ง 2 ระบบ แสดงดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำของระบบการปลูกพืชที่ได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกัน ที่ความลึกน้ำ 10 เซนติเมตร

พารามิเตอร์	ชนิดน้ำที่ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า (%)					
		30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน	เฉลี่ย
BOD	ไม่บำบัด	95.98	98.06	93.82	86.66	91.93	93.82
	บำบัดขั้นต้น	92.16	93.16	91.04	88.31	90.60	91.05
SS	ไม่บำบัด	96.84	99.68	92.94	94.88	97.54	96.37
	บำบัดขั้นต้น	87.83	97.28	82.48	89.14	91.65	89.67
TKN	ไม่บำบัด	85.76	77.13	77.86	83.46	70.51	78.94
	บำบัดขั้นต้น	65.33	71.15	74.66	68.59	62.95	68.54
TP	ไม่บำบัด	58.65	56.47	80.19	50.00	68.63	62.79
	บำบัดขั้นต้น	71.37	86.37	95.62	82.35	91.28	85.40
Nitrate	ไม่บำบัด	25.67	17.76	24.14	31.18	23.37	24.42
	ไม่บำบัด	29.43	23.27	12.30	13.62	3.56	16.44

จากข้อมูลดังตารางที่ 4-7 พบว่า ระบบการปลูกพืชในสารละลายซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ระดับความลึกเดียวกันนั้น ระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น เกือบทุกพารามิเตอร์ คือ BOD , SS , TKN และ ไนเตรต-ไนโตรเจน มีเพียงความสามารถในการลดปริมาณ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) เท่านั้น ที่ระบบซึ่งได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้น

ค้นแล้วมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อทำการทดสอบทางสถิติเพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งของทั้ง 2 ระบบ พบว่า

4.3.1 ผลของช่วงอายุผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบ

จากการทดสอบทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่า ช่วงอายุของผักคะน้าไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD, ปริมาณสารแขวนลอย (SS) , ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) , ปริมาณสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และในเครต ของทั้งระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบ และระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น (รายละเอียดคงภาคผนวก ข.)

4.3.2 ผลของคุณสมบัติของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

เมื่อทำการทดสอบทางสถิติเพื่อศึกษาผลของคุณสมบัติของน้ำเสียที่ระบบได้รับ ต่อความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ พบว่า คุณสมบัติของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าปริมาณสารแขวนลอย (SS) , ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของระบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า TKN และ SS มากกว่า ระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ในขณะที่ ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ TP พบว่าระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น มีประสิทธิภาพ สูงกว่าระบบที่ได้รับน้ำเสียดิบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัด BOD และ ในเครต ของทั้ง 2 ระบบมีความไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สรุปได้ว่า ทั้ง 2 ระบบ มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำได้ไม่ต่างกัน สำหรับประสิทธิภาพของระบบในการบำบัด TKN และ SS มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากน้ำเสียดิบ มีการปนเปื้อนสูงกว่าน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ซึ่งมีการกำจัดสารปนเปื้อนในมวลของน้ำบางส่วนมาแล้ว ทำให้สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดในน้ำมีน้อยกว่าน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่างกัน แต่ในการบำบัด TP ระบบที่ได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถบำบัดได้มากกว่าระบบที่ได้รับน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น นั้นเนื่องจากในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น มีการเติมอากาศ และการตกตะกอนบางส่วนแล้ว ทำให้สารประกอบฟอสฟอรัสที่ปน

เป็นอยู่ในมวลน้ำถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถดึงมาใช้ได้ดีกว่าทำให้ปริมาณของฟอสฟอรัสในระบบที่ได้รับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นลดลงได้มากกว่า

4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับน้ำทิ้งที่คุณสมบัติเหมือนกัน ที่ระดับความลึกของน้ำต่างกัน

ในการศึกษานี้สามารถทำการเปรียบเทียบ ได้เฉพาะชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ความลึกของน้ำต่างกัน 3 ระดับ คือ 10 ซม. 30 ซม. และ 50 ซม. โดยจะทำการเปรียบเทียบเพื่อศึกษาความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัดในแต่ละพารามิเตอร์ ดังนี้

4.4.1 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD

ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ของระบบที่มีความลึกของน้ำต่างกัน ในชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น แสดงดังตารางที่ 4-8 จากข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของระบบทั้ง 3 ระดับความลึก มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 86.45 – 93.16 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยแล้ว ที่ระดับความลึก 10 ซม. มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ระดับความลึก 30 ซม. และ 50 ซม. โดยมีค่าเฉลี่ย ร้อยละ 91.05 , 90.75 และ 88.05 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพ โดยเฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างทางสถิติแล้วพบว่า ช่วงอายุของผักคะน้า ไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD ของระบบในทุก ระดับความลึกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รวมทั้ง ระดับความลึกที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ ก็ไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หมายความว่าในชุดการทดลองที่ได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่มีความลึกของน้ำในระบบ 10 ซม. 30 ซม. และ 50 ซม. สามารถลดปริมาณค่าความสกปรกในรูปของ BOD ได้ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ทั้ง 3 ระบบได้รับปริมาณอากาศจากเครื่องเติมอากาศอย่างพอเพียง

ตารางที่ 4-8 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของระบบที่มีความลึกต่างกัน

ความลึกของน้ำ ในระบบศึกษา	ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า (%)					
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน	เฉลี่ย
10 ซม.	92.16	93.16	91.04	88.31	90.60	91.05
30 ซม.	91.41	84.89	92.40	93.31	91.77	90.75
50 ซม.	89.18	86.45	84.69	92.00	87.92	88.05

4.4.2 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารแขวนลอยในน้ำ (SS)

ประสิทธิภาพในการบำบัดสารแขวนลอยในน้ำของระบบทั้ง 3 ความลึกแสดงดังตารางที่ 4-9 จากข้อมูลดังตารางแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการบำบัดของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ระดับความลึก 10 ซม. , 30 ซม.และ 50 ซม. มีประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยร้อยละ 89.67 , 90.45 และ 73.58 ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของระบบที่ความลึก 10 และ 30 ซม. มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ความลึก 50 ซม. มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากในระดับความลึก 10 และ 30 ซม. นั้นการหมุนเวียนของน้ำภายในชุดการทดลองจากการทำงานของเครื่องเติมอากาศ สามารถผ่านรากของผักคะน้าได้ทั่วถึงทำให้ตะกอนถูกดักกรองติดกับรากผักคะน้า ได้มาก แต่ในระดับความลึก 50 ซม. มีการหมุนเวียนของมวลน้ำอยู่เพียงชั้นบน เนื่องจากการติดตั้ง อุปกรณ์การเติมอากาศจะอยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ 10 ซม. ทำให้น้ำที่อยู่ลึกลงไปได้รับการหมุนเวียนไม่มากเท่ากับระบบที่มีความลึกน้อยกว่า ประกอบกับในชุดการทดลองนี้มีการเจริญเติบโตของผักคะน้าน้อย การเจริญของรากน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ทำให้ตะกอนถูกดักกรองได้น้อยเช่นกัน จึงสามารถทำการบำบัดสารแขวนลอยในน้ำได้น้อยกว่าชุดการทดลองที่มีความลึกน้ำ 10 ซม. และ 30 ซม.

จากการทดสอบทางสถิติเพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพของระบบในแต่ละระดับความลึกพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบทั้ง 3 ความลึกไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และช่วงอายุของผักคะน้า ก็ไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้ง 3 ระบบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (รายละเอียดดังภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 4-9 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบที่มีความลึกต่างกัน

ความลึกของน้ำ ในระบบศึกษา	ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า (%)					
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน	เฉลี่ย
10 ซม.	87.83	97.28	82.48	89.14	91.65	89.67
30 ซม.	84.54	90.30	96.81	94.00	86.61	90.45
50 ซม.	35.52	81.53	91.15	93.71	66.02	73.58

สรุปได้ ช่วงอายุของผักคะน้า และระดับความลึกของน้ำในระบบไม่มีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารแขวนลอย (SS) ในน้ำมีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพของการบำบัดโดยเฉลี่ยแล้ว พบว่า ระบบที่มีความลึกของน้ำ 10 ซม. และ 30 ซม. มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่มีระดับความลึกของน้ำ 50 ซม.

4.4.3 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)

ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำทิ้งเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น แสดงดังตารางที่ 4-10 ประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบที่มีความลึกของน้ำ 10 ซม. และ 30 ซม. จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่มีความลึก 50 ซม. ในทุกช่วงอายุของผักคะน้า ทำให้ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเฉลี่ยของระบบความลึก 50 ซม. ต่ำกว่าระบบที่มีความลึกน้อยกว่า

จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบที่มีความลึกน้ำ 50 ซม. น้อยกว่าระบบที่มีความลึกน้ำ 10 และ 30 ซม. อย่างไม่มีนัยสำคัญ

เมื่อทำการทดสอบถึงผลของช่วงอายุผักคะน้าที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัด พบว่า ช่วงอายุของผักคะน้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบที่ความลึกทั้ง 3 ระดับ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4-10 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบที่มีความลึกต่างกัน

ความลึกของน้ำ ในระบบศึกษา	ประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า (%)					
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน	เฉลี่ย
10 ซม.	65.33	71.15	74.66	68.59	62.95	68.54
30 ซม.	66.80	72.47	72.44	69.46	63.39	68.91
50 ซม.	60.00	60.44	64.15	64.45	52.94	60.39

4.4.4 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

ประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดฟอสฟอรัสทั้งหมดของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ทั้ง 3 ระดับความลึก แสดงดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบที่มีความลึกต่างกัน

ความลึกของน้ำ ในระบบศึกษา	ประสิทธิภาพในการบำบัด TP ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า (%)					
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน	เฉลี่ย
10 ซม.	71.37	86.37	95.62	82.35	91.28	85.40
30 ซม.	75.36	74.13	86.34	92.94	80.96	81.95
50 ซม.	88.77	75.96	86.34	91.76	89.45	86.45



จากตารางที่ 4-11 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ทั้ง 3 ระดับความลึกอยู่ในช่วง ร้อยละ 71.37 – 95.62 เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของทั้ง 3 ระบบ พบว่า ที่ระดับความลึก 30 ซม. มีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ระดับความลึก 10 และ 50 ซม. แต่เมื่อทำการทดสอบทางสถิติเพื่อหาความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ระดับความลึก ทั้ง 3 ระดับ ไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพในการบำบัด TP ทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สำหรับผลของช่วงอายุของผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบพบว่า ช่วงอายุของผักคะน้าไม่มีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบทั้ง 3 ระดับความลึกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (รายละเอียดดังภาคผนวก ข)

4.4.5 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรด

ประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรด ของระบบการปลูกพืชในสารละลายที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นทั้ง 3 ระดับความลึก แสดงดังตาราง 4-12 โดยที่ในการคิดประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในการศึกษาครั้งนี้ทำการหาประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบกับชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืช เนื่องจากน้ำที่ส่งก่อนเข้าสู่ระบบทดลองจะมีปริมาณของไนเตรด-ไนโตรเจนต่ำมาก เพราะว่ในน้ำที่จะมีการปนเปื้อนของสารประกอบไนโตรเจนในรูปอื่น เช่น แอมโมเนีย และไนไตรต์ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งประกอบกับการที่น้ำได้สัมผัสกับอากาศ สารประกอบไนโตรเจนจึงเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของไนเตรด ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจะทราบได้จากการตรวจวัดค่าไนโตรเจนทั้งหมด(TKN) ซึ่งได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อ 4.4.3 ดังนั้นในการเปรียบเทียบการลดปริมาณของไนเตรดนี้บอกให้ทราบว่าในระบบที่มีการปลูกพืชจะสามารถลดปริมาณของไนเตรดได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการปลูกได้เท่าใด

ตารางที่ 4-12 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัด ในเตรต ของระบบที่มีความลึกต่างกัน

ความลึกของน้ำ ในระบบศึกษา	ประสิทธิภาพในการบำบัดในเตรต ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า (%)					
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน	เฉลี่ย
10 ซม.	29.43	23.27	12.30	13.62	3.56	16.44
30 ซม.	17.58	26.76	14.13	9.94	20.24	17.73
50 ซม.	5.46	6.50	10.36	11.09	5.95	7.87

เมื่อพิจารณาจากตารางจะพบว่าค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัดที่ระดับความลึก 50 ซม. ต่ำกว่าที่ระดับความลึก 10 และ 30 ซม. และเมื่อพิจารณาค่าทดสอบทางสถิติ พบว่า ที่ระดับความลึก 50 ซม. ให้ผลของประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่าที่ระดับความลึก 10 และ 30 ซม.อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับผลของอายุผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัดพบว่า ไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างทางสถิติ ของประสิทธิภาพในการบำบัดของแต่ละระบบ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

สรุปได้ว่า ที่ระดับความลึก 10 และ 30 ซม.ผักคะน้าสามารถดูดซับไนเตรตในน้ำมาใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีกว่า ที่ระดับความลึกน้ำ 50 ซม. หรือ เมื่อมีความลึกของน้ำมากกว่า 30 ซม. ความสามารถของพืชในการดูดซับไนเตรตในน้ำมาใช้ประโยชน์เป็นไปได้ลดลง ประกอบกับที่ระดับน้ำสูงขึ้น การเจริญเติบโตของผักคะน้ากลับมีน้อยกว่าในระบบที่มีความลึกต่ำกว่า (รายละเอียดดัง หัวข้อ 4.5)

ทั้งนี้อีกเหตุผลหนึ่ง อาจเนื่องมาจากการที่ระดับความลึก 50 ซม. มีปริมาณของน้ำมากกว่าที่ระดับความลึกต่ำกว่า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดมาอยู่ในรูปของไนเตรต ทำให้มีความเข้มข้นมากกว่าในระบบที่มีระดับความลึกต่ำกว่า ในขณะที่ผักคะน้ามีความสามารถจำกัดในการดึงไนเตรตในน้ำมาใช้ ทำให้ปริมาณของไนเตรตในระบบ จึงมีเหลือปนในมวลงน้ำมากกว่า

4.5 ผลการศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืช และ
โลหะหนัก ในผักคะน้า

ในการเสนอผลการศึกษาเรื่องการเจริญเติบโตของผักคะน้า จะใช้สัญลักษณ์ แทนความหมาย
ดังนี้

T1	หมายถึง	ผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับน้ำเลี้ยงดิบ ที่ความลึก ของน้ำ 10 ซม.
T4	หมายถึง	ผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการ บำบัดขั้นต้น ที่ความลึกน้ำ 10 ซม.
T5	หมายถึง	ผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่ 5 ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัด ขั้นต้น ที่ความลึกของน้ำ 30 ซม.
T6	หมายถึง	ผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่ 6 ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัด ขั้นต้น ที่ความลึกของน้ำ 50 ซม.
T7	หมายถึง	ผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่ 7 ซึ่งเป็นระบบที่ปลูกผักในสารละลายธาตุ อาหาร และ มีความลึกของสารละลาย 10 ซม.

ผลของการศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และการสะสมปริมาณธาตุอาหารพืช และ โลหะหนัก
ของผักคะน้าที่ทำการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-13 จากข้อมูลดังตารางสามารถอธิบายผลการศึกษา
ได้ ดังนี้

ตารางที่ 4-13 แสดงค่าเฉลี่ยของการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืช และ โลหะหนัก ของ ผักคะน้า ในแต่ละชุดการทดลอง

ค่าที่ทำการตรวจวัด	ค่า เริ่มต้น	ชุดการทดลอง				
		T1	T4	T5	T6	T7
การเจริญเติบโต						
- พื้นที่ใบ (ซม. ²)	9.14	33.77	50.51	49.27	21.77	58.68
- ความสูง (ซม.)	12.95	32.10	36.35	32.27	24.42	41.80
- จำนวนใบ (ใบ)	3-4	7-8	8-9	9-10	6-7	9-10
ผลผลิต						
- น้ำหนักสด (ก./ต้น)	3.63	29.690	36.90	30.54	13.38	43.76
- น้ำหนักแห้ง (ก./ต้น)	0.28	2.625	3.75	2.92	2.07	3.35
การสะสมธาตุอาหาร พืช และ โลหะหนัก (ppm)						
- ไนโตรเจน	-	1,314.00	1,344.00	1,421.50	1,273.50	2,100.00
- ฟอสฟอรัส	-	174.00	482.50	417.00	330.50	372.50
- โพแทสเซียม	-	711.148	565.65	697.675	561.65	861.15
- เหล็ก	-	327.50	659.00	343.00	347.50	699.00
- แมงกานีส	-	952.00	421.00	504.00	400.50	3,234.00
- แมกนีเซียม	-	126.00	134.70	116.00	88.60	159.65
- แคลเซียม	-	nd	nd	nd	nd	nd
- ตะกั่ว	-	0.028	0.017	0.014	nd	nd

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีการตรวจวัด
nd หมายถึง ตรวจวัดไม่พบเนื่องจากมีค่าต่ำกว่า 0.05 มก.

4.5.1 ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของผักคะน้า

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 4-13 พบว่า ผักคะน้าที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารพืช ซึ่งเป็นชุดการทดลองควบคุม มีการเจริญเติบโตสูงสุด ทั้งพื้นที่ใบ ความสูงและจำนวนใบ โดยมีค่า พื้นที่ใบโดยเฉลี่ย 58.68 ตร.ซม. ความสูงเฉลี่ย 41.80 ซม. และมีจำนวนใบเฉลี่ย 9-10 ใบ

สำหรับชุดการทดลองศึกษาที่ได้รับน้ำทิ้งที่มีคุณสมบัติของน้ำ และระดับน้ำต่างกัน พบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ 4 มีการเจริญเติบโตสูงสุด รองลงมา คือชุดการทดลองที่ 5 , 1 และ 6 ตามลำดับ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า ผักคะน้าที่ปลูกในน้ำทิ้งเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่ระดับความลึก 10 ซม. และ 30 ซม. มีการเจริญเติบโตมากกว่า ผักคะน้าที่ปลูกในน้ำเสียดิบที่ระดับความลึก 10 ซม. ส่วนผักคะน้าที่ปลูกในน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้นที่ระดับความลึก 50 ซม. จะมีการเจริญเติบโตต่ำสุด แต่ผักคะน้าที่ปลูกในทุกชุดการทดลองมีการเจริญเติบโตต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุม

4.5.2 ผลการศึกษาผลผลิตของผักคะน้า จากระบบการทดลอง

ผลผลิตของผักคะน้าในการศึกษาครั้งนี้ ใช้การวัดค่าเฉลี่ยน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ต่อต้นของผักคะน้า เมื่อเริ่มทำการทดลอง ต้นกล้าผักคะน้าที่ใช้ มีน้ำหนักสดเฉลี่ย 3.63 กรัม/ต้น และมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 0.28 กรัม/ต้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองควบคุม มีน้ำหนักสูงสุด คือ 43.76 กรัม/ต้น และมีน้ำหนักแห้ง 3.35 กรัม/ต้น สำหรับผักคะน้าในชุดการทดลองศึกษา พบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ 4 มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือ ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ 5 , 1 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการเจริญเติบโตของผักคะน้า

ในทุกชุดการทดลองมีอัตราการรอดของผักคะน้า 100 % เมื่อทำการเปรียบเทียบผลผลิตต่อหน่วยทดลอง และคิดเป็นผลผลิตต่อตารางเมตรแล้ว จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 แสดงผลผลิตน้ำหนักสดต่อหน่วยทดลอง และผลผลิตต่อตารางเมตรของผักคะน้า

ค่าการเปรียบเทียบ ผลผลิตน้ำหนักสด (กรัม)	ชุดการทดลอง				
	T1	T4	T5	T6	T7
ผลผลิต/ต้น	29.69	36.90	30.54	13.38	43.76
ผลผลิต/หน่วย ทดลอง	237.52	295.20	244.32	107.04	350.08
ผลผลิต/ตาราง เมตร	1,131.00	1,405.71	1,163.43	509.71	1,667.05

4.5.3 ผลการศึกษาปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืช และโลหะหนักในผักคะน้า

จากตารางที่ 4-12 ผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองควบคุม (T7) มีปริมาณการสะสมธาตุไนโตรเจน (2,100 ppm) โพแทสเซียม (861.15 ppm) เหล็ก (699.00 ppm) แมงกานีส (3,234 ppm) และแมกนีเซียม (159.65 pm) สูงกว่าชุดการทดลองอื่น แต่ ชุดการทดลองที่ 4 และ 5 มีปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสสูงกว่าชุดการทดลองควบคุม โดยที่ชุดการทดลองที่ 4 มีปริมาณการสะสมสูงสุด คือ 482.50 ppm และชุดการทดลองที่ 5 มีฟอสฟอรัสสะสมอยู่ 417.00 ppm ส่วนในชุดการทดลองที่ 7 หรือชุดการทดลองควบคุมพบว่ามีสารสะสมอยู่ในผักคะน้า 372.50 ppm

เมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมธาตุอาหารพืช ในระหว่างชุดการทดลองศึกษาชุดที่ 1 ถึงชุดที่ 6 พบว่ามีปริมาณของการสะสมธาตุอาหารต่างๆ ดังนี้

- 1. การสะสมไนโตรเจน ชุดการทดลองที่มีปริมาณธาตุไนโตรเจนสะสมอยู่ในผักคะน้าสูงสุด คือชุดการทดลองที่ 5 (1,421.55 ppm) รองลงมาคือชุดการทดลองที่ 4 , 1 และ 6 โดยมีปริมาณการสะสม 1,344.00 , 1,314.00 และ 1,273.50 ppm ตามลำดับ

2. การสะสมฟอสฟอรัส พบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ 4 มีการสะสมฟอสฟอรัสสูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่ 5 , 6 และ 1 ปริมาณที่พบ คือ 482.50 ppm , 417.00 ppm , 330.50 ppm และ 174.00 ppm ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าผักคะน้าที่ปลูกในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นจะมีปริมาณของธาตุฟอสฟอรัสสะสมมากกว่าผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่ได้น้ำเสียบ

3. การสะสมธาตุโปแตสเซียม พบว่า มีลำดับของปริมาณการสะสมธาตุโปแตสเซียมในผักคะน้าจากมากไปน้อยดังนี้ คือ ชุดการทดลองที่ 1 (711.15 ppm) ชุดการทดลองที่ 5 (697.67 ppm) ชุดการทดลองที่ 4 (565.65 ppm) และชุดการทดลองที่ 6 (561.65 ppm)

สำหรับปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืชที่เป็นโลหะหนักซึ่ง ได้แก่ เหล็ก , แมงกานีส , แมกนีเซียม พบว่า มีปริมาณการสะสมของแต่ละธาตุดังนี้

4. ปริมาณการสะสมธาตุเหล็ก พบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ 4 มีธาตุเหล็กสะสมอยู่สูงสุด คือ 659 ppm รองลงมาได้แก่ ชุดการทดลองที่ 6 , 5 และ 1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ผักคะน้าที่ปลูกในชุดการทดลองที่ได้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นในทุกระดับความลึก จะมีปริมาณการสะสมธาตุเหล็กมากกว่าผักคะน้าที่ปลูกในน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการบำบัด แม้ว่าจะมีการเจริญเติบโตน้อยกว่าก็ตาม

5.การสะสมธาตุแมงกานีส ในผักคะน้ามีลำดับของปริมาณการสะสมจากมากไปน้อยดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1 (925.00 ppm) ชุดการทดลองที่ 5 (504.00 ppm) ชุดการทดลองที่ 4 (421 ppm) และชุดการทดลองที่ 6 (400.50 ppm) จากข้อมูลดังตารางแสดงให้เห็นได้ว่า ผักคะน้าที่ปลูกในน้ำเสียบ มีปริมาณการสะสมธาตุแมงกานีสสูงกว่าผักคะน้าที่ปลูกในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นในทุกระดับความลึก ซึ่งเป็นเพราะในน้ำเสียบมีธาตุแมงกานีสเจือปนอยู่ ที่ความเข้มข้น 0.46 ppm ในขณะที่ ในน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมีปริมาณธาตุแมงกานีสเจือปนอยู่น้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้

6.การสะสมธาตุแมกนีเซียม พบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ 4 มีปริมาณการสะสมสูงสุด 134.70 ppm รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่ 1 , 5 และ 6 ตามลำดับ โดยมีปริมาณการสะสม 126.00 , 116.00 และ 88.60 ppm เมื่อพิจารณาจากปริมาณของแมกนีเซียมในน้ำจากตารางที่ 4-1 พบว่า ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีแมกนีเซียมเจือปนอยู่ 21.83 ppm ส่วนในน้ำเสียบมีปริมาณสูงกว่า คือ 30.93 ppm แต่เมื่อพิจารณาปริมาณของแมกนีเซียมในผักคะน้า ในชุดการทดลองที่ 4 ได้น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว กลับมีปริมาณการสะสมแมกนีเซียมมากกว่าชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งได้น้ำเสียบ

โดยที่มีความลึกเท่ากัน เนื่องจากพืชจำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารต่างๆ ในการเจริญเติบโต โดยที่ส่วนต่างๆ ของพืชสามารถดูดซับธาตุอาหารได้ แต่เนื่องจากรากของพืชเป็นส่วนที่สัมผัสกับสารละลายโดยตรงจึงมีหน้าที่หลักในการดูดซับธาตุอาหาร โดยที่พืชจะดูดซับเอาธาตุอาหารมาใช้ได้ต่อเมื่ออยู่ในรูปของไอออนในสารละลาย หรือ ในรูปของไอออนที่ถูกคอลลอยด์ดูดซับไว้ ซึ่งสามารถเกิดการแลกเปลี่ยน หรือแทนที่กลับมาอยู่ในสารละลายได้อีก ดังนั้นการที่พืชไม่สามารถเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ หรือมีการสะสมธาตุอาหารต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกันอาจเป็นเพราะมีปริมาณธาตุอาหารน้อยกว่าความต้องการของพืช หรืออาจมีปริมาณมาก แต่อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถดูดซับไปใช้ได้

สำหรับโลหะหนักที่ไม่ได้เป็นธาตุอาหารพืช คือ ตะกั่ว และแคดเมียม มีปริมาณต่ำมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ทั้ง 2 ชนิด แต่จากการตรวจวัดปริมาณที่สะสมอยู่ในผักคะน้า พบว่า

7. การสะสมธาตุแคดเมียม ตรวจไม่พบการสะสมแคดเมียมในผักคะน้าทุกตัวอย่าง

8. การสะสมธาตุตะกั่ว ตรวจพบการสะสมตะกั่ว ในชุดการทดลองที่ 1 , 4 และ 5 โดยที่มีปริมาณการสะสม 0.028 , 0.017 และ 0.014 ppm ตามลำดับ แต่ในชุดการทดลองที่ 6 ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่ได้รับน้ำที่ผ่านการบำบัดขึ้นดินที่ความลึก 50 เซนติเมตร กับชุดการทดลองที่ 7 ซึ่งเป็นชุดการทดลองควบคุมไม่สามารถตรวจพบ เนื่องจากมีปริมาณการสะสมธาตุตะกั่วเจือปนต่ำกว่า 0.05 มก. แสดงให้เห็นได้ว่าในน้ำที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นถึงจะไม่สามารถตรวจพบสารตะกั่ว เนื่องจากมีการปนเปื้อนในปริมาณที่ต่ำกว่าความสามารถของเครื่องมือจะทำการตรวจวัดได้ แต่เมื่อนำมาปลูกพืช พืชสามารถดูดซับตะกั่ว และสะสมในเนื้อเยื่อเซลล์พืชได้ และจากข้อมูลจะเห็นได้ว่าผักคะน้าที่ปลูกในน้ำเสียดิบจะมีปริมาณการสะสมตะกั่วมากกว่าในพืชที่ปลูกในน้ำที่ผ่านการบำบัดขึ้นดิน

จากการศึกษาโลหะหนักในพืชเศรษฐกิจทั่วประเทศ โดยวรวิทย์ , 2524 (32) พบว่า ผักคะน้า มีการสะสมตะกั่วและแคดเมียม ในส่วนของลำต้นมากกว่าใบ โดยที่มีปริมาณตะกั่วสะสมเฉลี่ย ในส่วนลำต้น 25.60 ppm และ 14.80 ppm ในส่วนของใบ โดยปริมาณการสะสมตะกั่วในผักคะน้าจะแปรผันตามปริมาณของน้ำในดินพืช ถ้าพืชมีปริมาณน้ำในดินมาก จะทำให้มีการสะสมตะกั่วได้มากด้วยเช่นกัน สำหรับการสะสมแคดเมียม พบว่าปริมาณเฉลี่ยในลำต้น 0.95 ppm และ 0.45 ppm ในส่วนของใบ เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองครั้งนี้จะเห็นว่า ผักคะน้าที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีการปนเปื้อนของตะกั่ว และ แคดเมียมน้อยมาก เนื่องจากในน้ำที่ใช้ทำการศึกษาทดลองมีการปนเปื้อนของ

ตะกั่วและแคดเมียมน้อยมาก ในขณะที่ปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดของผักคะน้าในชุดการทดลองควบคุมซึ่งปลูกในสารละลายธาตุอาหาร ไม่สามารถทำการตรวจวัดได้ เมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับปริมาณที่ยอมรับให้บริโภคได้ ของคณะกรรมการวิชาการร่วมFAO/WHO (ดังตารางที่ 4-15) พบว่า หากบริโภคผักคะน้าที่ได้จากชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งมีการปนเปื้อนของตะกั่วสูงสุด คือ 0.028 ppm จะสามารถบริโภคผักคะน้าได้ สัปดาห์ละ 1.78 กก. คือน้ำหนักตัวผู้บริโภค 1 กก. นั่นคือหากผู้บริโภคมีน้ำหนักตัว 50 กก. สามารถบริโภคผักคะน้าจากชุดการทดลองที่ 1 ได้ สัปดาห์ละ 89 กก. หรือ วันละ 12.71 กก. จึงได้รับปริมาณสารตะกั่ว 0.05 มก./กก.น้ำหนักตัว/สัปดาห์ ตามที่เกณฑ์ที่ยอมรับ จึงสามารถกล่าวได้ว่าผักคะน้าที่ได้จากการทดลองสามารถบริโภคได้โดยไม่ก่อให้เกิดความผิดปกติจากการสะสมโลหะหนัก

ตารางที่ 4-15 ปริมาณโลหะหนักชนิดต่างๆที่ปนเปื้อนในอาหารและยอมรับให้บริโภคได้สูงสุด

ชนิดโลหะหนัก	หน่วย	ปริมาณที่ยอมให้บริโภคได้
ทองแดง	มก./กก.น้ำหนักตัว/วัน	0.05 – 0.50
เหล็ก	”	0.80
สังกะสี	”	0.30 – 1.00
ตะกั่ว	มก./กก.น้ำหนักตัว/สัปดาห์	0.05
แคดเมียม	”	0.0067 – 0.0083

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียนชนิดเดิม อากาศในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ความสามารถในการดำเนินระบบ

จากการทดลองพบว่า ในการดำเนินระบบการทดลองนั้น ระบบที่ได้รับน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น หรือน้ำเสียดิบ มีเพียงระบบที่มีความลึกของน้ำ 10 ซม. เท่านั้นที่สามารถดำเนินการได้จนสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง แต่ระบบที่ได้รับน้ำทิ้งที่มีความลึกของน้ำ 30 และ 50 ซม. ไม่สามารถดำเนินระบบได้ เนื่องจากผักคะน้าที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถเจริญเติบโตได้ แสดงให้เห็นว่าในการเลือกใช้ระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียนมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น เหมาะสมที่จะทำการบำบัดในระดับความลึก 10 ซม.

สำหรับระบบที่ได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว สามารถดำเนินการทดลองจนสิ้นสุดระยะทดลองได้ทั้ง 3 ระดับความลึก แสดงให้เห็นว่า ระบบการปลูกพืชในสารละลายสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นได้ โดยมีข้อจำกัดในด้านความลึกน้อยกว่าการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียดิบ

5.1.2 ผลของคุณสมบัติของน้ำทิ้งต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ

จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติของน้ำทิ้งมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบการปลูกพืชในสารละลาย โดยที่ระบบซึ่งได้รับน้ำเสีย จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และสารแขวนลอยในน้ำ(SS) ได้มากกว่าระบบซึ่งได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น ในขณะที่ ระบบซึ่งได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดแล้วสามารถลดปริมาณของฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำได้ดีกว่าระบบที่ได้รับน้ำทิ้งดิบ แต่ระบบทั้ง 2 ระบบ สามารถลดปริมาณของค่าความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) และปริมาณ ไนเตรต-ไนโตรเจน ได้ไม่แตกต่างกัน

5.1.3 ผลของระดับความลึกน้ำในระบบต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

จากการทดลอง พบว่า ระดับของน้ำทิ้งในระบบ ไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) , สารแขวนลอยในน้ำ (SS) , ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) , ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และ ไนเตรต-ไนโตรเจน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % แต่มีผลให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัดปริมาณไนโตรเจน โดยที่ ระดับความลึกน้ำ 10 และ 30 ซม. จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบที่มีความลึกน้ำ 50 ซม.

5.1.4 ผลของอายุผักคะน้าต่อประสิทธิภาพในการบำบัด

ช่วงอายุของผักคะน้าไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) , สารแขวนลอยในน้ำ (SS) , ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) , ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และ ไนเตรต-ไนโตรเจน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

5.1.5 ผลการศึกษาการเจริญเติบโต และผลผลิตของผักคะน้า

จากผลการทดลอง พบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองทุกชุดมีการเจริญเติบโตต่ำกว่าผักคะน้าในชุดการทดลองควบคุม แต่เมื่อเปรียบเทียบในชุดการทดลองศึกษาด้วยกัน พบว่า ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ซึ่งมีระดับของน้ำ 10 ซม. จะมีการเจริญเติบโตสูงสุด รองลงมาคือ ผักคะน้าในชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ที่มีความลึกน้ำ 30 ซม. และผักคะน้าในชุดการทดลองที่ได้รับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น และมีความลึกน้ำ 50 ซม. จะมีการเจริญเติบโตต่ำที่สุด

5.1.6 ปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืช และโลหะหนัก

พบว่า ปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืช คือ ไนโตรเจน โปแตสเซียม เหล็ก และแมกนีเซียม ในผักคะน้าทุกชุดการทดลองมีต่ำกว่าชุดการทดลองควบคุม แต่ ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัส ในชุดการทดลองที่ 4 คือ ระบบที่ปลูกผักคะน้าในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น ซึ่งมีความลึกน้ำ 10 ซม. จะมีปริมาณสูงสุดและสูงกว่าชุดการทดลองควบคุม สำหรับแมกนีเซียในผักคะน้าที่ปลูกด้วยน้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านการบำบัดขั้นต้น และมีความลึกน้ำ 10 ซม. มีปริมาณการสะสมสูงสุด แต่ปริมาณการสะสมของธาตุอาหารพืชทั้งหมดยังอยู่ในเกณฑ์ปกติที่สามารถพบได้ในผักทั่วไป

สำหรับปริมาณการสะสมโลหะหนักในผักคะน้า คือ แคดเมียม และตะกั่ว พบว่า ในชุดการทดลองควบคุมตรวจไม่พบตะกั่ว และแคดเมียม และผักคะน้าในทุกชุดการทดลองตรวจไม่พบปริมาณสารแคดเมียม แต่ตรวจพบการสะสมสารตะกั่วในชุดการทดลองที่ 1 , 4 และ 5 แต่มีอยู่ปริมาณต่ำกว่าที่พบในพืชผักทั่วไป

5.2 แนวทางที่เหมาะสมในการนำระบบการปลูกพืชในสารละลายมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชน

จากการศึกษาทดลองในครั้งนี้พบว่า ในการนำระบบการปลูกพืชในสารละลายแบบไม่หมุนเวียนชนิดเดิมอากาศมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนนั้นไม่เหมาะสมต่อการใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียดิบที่มีความลึกมากกว่า 10 ซม. เนื่องจากดินผักคะน้าไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำไม่มากพอให้รากของพืชหายใจได้ ประกอบกับถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในน้ำ

สำหรับการนำระบบการปลูกพืชในสารละลายนี้มาใช้ในการบำบัดน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นสามารถทำได้ทั้ง 3 ระดับความลึก และในระดับ 50 ซม. จะให้ผลผลิตของผักคะน้าและมีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัด คำนวณที่ระดับความลึก 10 และ 30 ซม.

ดังนั้นจากการศึกษาครั้งนี้ ระบบการปลูกพืชในสารละลายน่าจะเหมาะในการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียดิบที่มีความลึกของน้ำ 10 ซม. หรือนำมาใช้กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วที่ระดับความลึก 10 และ 30 ซม. จึงให้ผลเป็นที่น่าพอใจสูงสุด

5.3 ปัญหา และอุปสรรคที่พบในการวิจัย

5.3.1 เนื่องจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเสียจากชุมชนจริงๆ ทำให้คุณสมบัติของน้ำที่นำเข้าสู่ระบบทดลองมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อผลประสิทธิภาพในการบำบัดในช่วงการเปลี่ยนแปลงที่กว้างทำให้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติมีความคลาดเคลื่อนสูง

5.3.2 ในการทดลองครั้งนี้ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิในการระหว่างทำการทดลอง ซึ่งมีผลต่อต้นพืชในการดูดซึมน้ำ และธาตุอาหารในพืช เมื่ออุณหภูมิภายในโรงเรือนทดลองสูงทำให้ต้นพืชมีการคายระเหยน้ำมากขึ้น ดังนั้นหากพืชไม่สามารถดูดซึมน้ำได้สมดุลกับอัตราการคายระเหยน้ำ จะทำให้พืชเหี่ยวเฉา เกิดอาการใบไหม้ และตายได้

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย

5.4.1 ควรทำการศึกษาโดยการใช้รูปแบบของระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช่ดินรูปแบบอื่นๆ ซึ่งอาจมีความเหมาะสม หรือให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีกว่าระบบนี้

5.4.2 ควรทำการศึกษาทดสอบ หาชนิดของพืชที่มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในระบบการบำบัดน้ำทิ้งด้วยระบบการปลูกพืชในสารละลาย ซึ่งอาจเป็นพรรณ ไม้ น้ำ หรือกลุ่มไม้ประดับ

5.4.3 ควรศึกษาถึงผลของปริมาณของอากาศ จากเครื่องเติมอากาศที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในระบบ ที่มีความลึกต่างๆ กัน

5.4.4 ควรมีการศึกษาและตรวจวัดการปนเปื้อนทางชีววิทยาเพิ่มเติม เพื่อทราบถึงแนวโน้มของการปนเปื้อนของสิ่งมีชีวิตพืคพวยหา หรือเชื้อจุลินทรีย์จากน้ำสู่ลำต้นของพืช

5.4.5 ควรมีการศึกษาถึงความเหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์ของการนำระบบ การปลูกพืชในสารละลายมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจอีกทางหนึ่ง

5.4.6 ในการศึกษาครั้งต่อไปควรจะใช้ น้ำเสียสังเคราะห์มาใช้ในการศึกษา เนื่องจากสามารถควบคุมคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการทดลองได้ตลอดการทดลอง ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพที่แน่นอนของระบบรวมทั้งอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ (เช่น อายุพืช) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบได้ถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

1. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่5. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
2. จุมพล ชุนอ่อน. การบำบัดน้ำเสียจากบ้านพักอาศัยด้วยระบบถังเกรอะ-ถังกรองไร้อากาศสำเร็จรูป [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม]. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2540.
3. มุลนิธิโลกสีเขียว. จัดการน้ำอนาคตอันใกล้. วารสารโลกสีเขียว 2540; ปีที่6, ฉบับที่ 4: 26-41.
4. ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ. น้ำเสียชุมชน และปัญหามลภาวะทางน้ำในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. รายงานการศึกษาเสนอต่อคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2530.
5. เสริมพล รัตสุข, ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. การจัดการน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2524.
6. จำเนียร ธนสีสังกูร. ปริมาณและคุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ. ใน: เกษม จันทรแก้ว, บรรณาธิการ. การนำน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ในการเกษตร. วิทยาสารสิ่งแวดล้อม 2524; 4 : 2.1 – 2.34.
7. จิระศักดิ์ กิริตติมากร. การนำน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ในการเกษตร. ใน: เกษม จันทรแก้ว, บรรณาธิการ. การนำน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ในการเกษตร. วิทยาสารสิ่งแวดล้อม 2524; 4 : 6.1 – 6.27.
8. รื่นฤดี ศรีสุนทร. การใช้ประโยชน์ของน้ำเสียบึงมักกะตันเพื่อการปลูกคะน้า (*Brassica oleracea* L. var *alboglab* Bailey) ด้วยวิธีปลูกพืชในน้ำ [วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม]. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
9. Jurdi MS, Soufi MS, Acra A. Water reclamation and reuse by hydroponic plant growth in a recirculated system. In: Future of water reuse volume II. Proceeding of The Water Symposium III 1984 Aug 26-31 ; Sandiago, California: AWWA Research Foundation, 1985: 732-745.
10. Singh S. A computer simulation model for wastewater management in an integrated (fish production - hydroponics) system [PH.D. Thesis in Agriculture Engineering]

- Virginia: Faculty of Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
11. Boyden BH, Rababah AA. Recycling nutrients from municipal wastewater. J Desalination 1996; 106 (ISS 1-3): 241-246.
 12. Jewell WJ. Resource - recovery wastewater treatment. J American Scientist 1994; 84 (n 4): 366-375.
 13. Nkuchia JM, An evaluation of wastewater reuse benefits (Aquaculture , Irrigation) [DR.PH. Thesis in Public Health]. Michigan: School of Public Health, The University of Michican, 1994.
 14. ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์. ปลุกพืชโดยไม่ใช้ดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: พรวนนกการพิมพ์, 2534.
 15. อารีย์ เสนานันท์สกุล. การคัดเลือกเทคนิคที่เหมาะสมในการปลุกพืชโดยวิธีไฮโดรโปนิคส์ [วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาพืชสวน]. กรุงเทพมหานคร: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตร, 2540.
 16. เมืองทอง ทวนศรี, สุริรัตน์ ปัญญาโตะนะ. สวนผัก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ม.ป.ท., 2525.
 17. สุรัช มังฉาชีพ. พืชเศรษฐกิจในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์นันทชัย, 2535.
 18. กองบรรณาธิการฐานเกษตรกรรม. อาชีพปลูกผัก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์เอเชีย, 2531.
 19. กลุ่มงานโรคพืช กรมส่งเสริมการเกษตร. ผักปลอดสารพิษและการผลิต. ใน: ไร่ฟ้า 51. ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ม.ป.ท. :114 – 122.
 20. มหาวิทยาลัยมหิดล, มูลนิธิโตโยต้า ประเทศไทย. มหัศจรรย์ผัก 108. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ม.ป.ท., 2540.
 21. พิรุณ สุวรรณบริรักษ์. การศึกษาลักษณะประจำพันธุ์บางประการของผักคะน้า [ปัญหาพิเศษ ปริญญาตรี สาขาพืชสวน]. กรุงเทพมหานคร: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2524.
 22. ช่วยชูศรี ศรีภูมิ. สารเจือปนบางประเภทในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม. ใน: เกษม จันทร์แก้ว, บรรณาธิการ. การนำน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ในการเกษตร. วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม 2524; 4 : 3.1 – 3.32.

23. เบญจา พวงสุวรรณ. รายงานการศึกษาวิเคราะห์ผลงานวิจัยอันดับที่ 6 น้ำทิ้ง-น้ำเสีย พ.ศ. 2514-2523. กองวิเคราะห์โครงการและประเมินผล สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และพลังงาน, 2525.
24. นพพล เรียบเลิศหิรัญ. การปลูกพืชไร้ดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1 . กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์รวีเจียว, 2538.
25. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิสวกรรมกรกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 1 . พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์, 2532.
26. จิตติมา วสุสิน. การศึกษาระสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชน และที่พักอาศัย กรณีศึกษา น้ำเสียจากศูนย์ศาลาया [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร]. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2539.
27. Mark J H. Water and Wastewater Technology. John Wiley & Sons , Inc. USA, 1977.
28. กฤติยา มลาสาณต์. เกษตรวิจัย (การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน). เดลินิวส์ 1 มิ.ย. 2541.
29. สุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2539.
30. กิตติ เอกอำพน. ความเป็นพิษของโลหะหนัก (I). จุลสารสภาวะแวดล้อม 2528; ปีที่ 4 , 4 : 10-16.
31. Fegusson J E. The Heavy Elements: Chemical, Environmental Impact and Health Effects. 1st edition. Great Britain: BPCC Wheatons, 1990.
32. วรวิทย์ ชีวการณวิวัฒน์. โครงการวิจัยโลหะหนักในพืชเศรษฐกิจ. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
32. ชัดศิระ โสตะจินดา. การใช้ประโยชน์ของตะกอนบึงมักกะสันเพื่อการปลูกผักคะน้า [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม]. กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
34. กิตติ เอกอำพน. ความเป็นพิษของโลหะหนัก(II). จุลสารสภาวะแวดล้อม 2528; ปีที่ 4, 5 : 24-31.
35. อรพรรณ ศิริพิริยะ. ปริมาณและการแพร่กระจายโลหะหนักในดินเขตกรุงเทพมหานคร อันส่งผลต่อการเจริญเติบโต และองค์ประกอบบางเคมีของพืช. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.

36. APHA, AWWA, WPCF. Standard Method for The Examination of Water and Wastewater. 18th edition. Washington D.C. APHA, 1992.
37. วิทยา เพ็ชรวิจิตร. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอ เอส พริ้นต์ติ้งเฮาส์, 2525.
38. กรมวิชาการเกษตร กองพืชไร่. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดิน และปุ๋ย. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ที่สำนักข่าวพาณิชย์. 2521: 22 - 26.
39. Bouwer H, Lance J C, Riggs M S . Water Quality and Economic Aspects of The Flushing Meadows Project. Journal of The Water Pollution Control Federation 1974; 46 (5): 844-859.
40. Butler J E, Loveridge R F, Ford M G, Bone D A. Gravel Bed Hydroponics System Used for Secondary and Tertiary Treatment of Sewage Effluent. Journal of The Institute of Water and Environmental Management 1990; 4(1-3): 276-284.
41. AyaZ S C, Saygin O. Hydroponics Tertiary-Treatment. J Water Research 1996; 30(Iss5): 1295-1298.
42. Willium J, Bahgat M, May E, Ford M G, Butler J E. Mineralization and Pathogen Removal in Gravel-Bed Hydroponics Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. J Water Science and Technology 1995; 32(Iss 3): 49-58.
43. จำปี บ้านนา. เทคโนโลยีการเกษตร. วารสารเทคโนโลยีชาวบ้าน 2539; ปีที่ 10, ฉบับที่ 186: 67-68.
44. กรรณิการ์ สิริสิงห์. เติมน้ำไฮโดรโปนิกส์และการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ประชุมวงศ์ จำกัด, 2522.
45. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์, 2539.

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลผลการทดลอง



ตารางภาคผนวก ก - 1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบทดลอง

พารามิเตอร์	ซ้ำ	น้ำเสียดิบ						น้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
BOD (mg/l)	1.	57.25	184.64	32.52	17.17	25.64	63.444	09.50	08.61	09.46	09.27	08.78	09.124
	2.	55.29	192.16	27.68	15.83	24.20	63.032	10.66	08.07	08.84	09.73	09.10	09.28
	เฉลี่ย	56.27	188.40	30.10	16.50	24.92	63.24	10.08	08.34	09.15	09.50	08.94	09.202
SS (mg/l)	1.	36.24	56.39	17.24	36.23	43.20	37.86	05.93	05.74	06.19	03.57	05.23	05.332
	2.	37.28	56.65	16.76	36.05	43.08	37.946	06.23	06.02	06.37	03.43	05.07	05.424
	เฉลี่ย	36.76	56.52	17.00	36.14	43.14	37.91	06.08	05.88	06.28	03.50	05.15	05.378
TP (mg/l)	1.	06.17	21.27	11.03	03.15	06.56	09.636	02.82	08.59	07.59	01.67	04.31	04.996
	2.	06.31	19.21	09.77	03.21	06.64	09.028	02.70	08.73	07.49	01.73	04.41	05.012
	เฉลี่ย	06.24	20.24	10.40	03.18	06.60	09.332	02.76	08.66	07.54	01.70	04.36	05.004
TKN (mg/l)	1.	11.95	30.45	30.79	14.67	19.82	21.53	07.44	20.38	30.42	10.99	15.70	16.986
	2.	12.63	30.15	30.31	13.03	19.66	21.15	07.56	20.52	28.94	09.77	15.88	16.534
	เฉลี่ย	12.29	30.30	30.54	13.85	19.74	21.34	07.50	20.45	29.68	10.38	15.79	16.76
Nitrate (mg/l)	1.	00.11	00.162	04.73	00.199	00.207	01.08	00.19	00.203	07.325	00.282	02.221	02.044
	2.	00.17	00.120	04.65	00.079	00.127	01.03	00.25	00.171	07.195	00.22	00.301	01.627
	เฉลี่ย	00.14	00.141	04.69	00.139	00.167	01.05	00.22	00.187	07.26	00.251	00.261	01.63

ตารางภาคผนวก ก -2 ผลการหาค่า BOD ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่าBOD (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าBOD (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าBOD (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าBOD (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าBOD (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
T1S1	1.	02.48	95.59	05.36	97.21	00.29	99.03	01.74	89.46	01.48	94.06
	2	02.54	95.48	05.24	97.15	00.43	98.57	01.98	88.00	01.66	93.34
	เฉลี่ย	02.51	95.54	05.30	97.18	00.36	98.80	01.86	88.73	01.57	93.70
T1S2	1.	02.18	96.12	04.02	97.86	02.17	92.79	02.04	87.63	01.05	91.77
	2.	02.34	95.84	03.16	98.26	01.55	94.85	02.36	85.69	01.97	92.09
	เฉลี่ย	02.26	95.98	03.59	98.06	01.86	93.82	02.20	86.66	02.01	91.93
T4S1	1.	00.77	92.36	00.73	91.25	02.00	78.14	00.15	98.42	00.72	91.94
	2.	00.85	91.56	00.67	91.95	01.20	86.66	00.11	98.84	00.96	89.26
	เฉลี่ย	00.81	91.96	00.70	91.60	01.60	82.51	00.13	98.63	00.84	90.60
T4S2	1.	00.92	90.87	00.48	94.24	00.77	91.58	01.18	87.58	00.49	94.51
	2.	00.66	93.45	00.66	92.08	00.87	90.50	01.04	89.04	01.19	86.69
	เฉลี่ย	00.79	92.16	00.57	93.16	00.82	91.04	01.11	88.31	00.84	90.60

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = $\frac{\text{ค่า BOD ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด} - \text{ค่า BOD หลังผ่านระบบบำบัด}}{\text{ค่า BOD ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด}} \times 100$

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลการหาค่า SS ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
T1S1	1.	01.85	94.96	00.93	98.35	02.09	87.70	00.86	97.62	00.74	98.28
	2.	02.03	94.48	00.75	98.67	02.27	86.64	01.00	97.22	01.02	97.64
	เฉลี่ย	01.94	94.72	00.84	98.51	02.18	87.17	00.93	97.42	00.88	97.96
T1S2	1.	01.09	97.03	00.09	99.84	01.29	92.41	01.78	95.07	00.97	99.75
	2.	01.23	96.65	00.27	99.52	01.11	93.47	01.92	94.69	01.15	97.33
	เฉลี่ย	01.16	96.84	00.18	99.68	01.20	92.94	01.85	94.88	01.06	97.54
T4S1	1.	00.51	91.61	00.42	92.86	02.49	60.35	00.28	92.85	00.36	93.01
	2.	00.65	89.31	00.60	89.80	02.31	63.21	00.42	87.15	00.50	90.29
	เฉลี่ย	00.58	90.46	00.51	91.33	02.40	61.78	00.35	90.00	00.43	91.65
T4S2	1.	00.66	89.15	00.07	98.81	01.01	83.92	00.45	87.14	00.37	92.81
	2.	00.82	86.51	00.25	95.75	01.19	81.04	00.31	91.14	00.49	90.49
	เฉลี่ย	00.74	87.83	00.16	97.28	01.10	82.48	00.38	89.14	00.43	91.65

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = ค่า SS ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด - ค่า SS หลังผ่านระบบบำบัด X 100

ค่า SS ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด

ตารางภาคผนวก ก - 3 (ต่อ) ผลการหาค่า SS ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า SS (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
TSS1	1.	00.74	87.49	00.75	87.24	00.15	97.61	00.43	87.71	00.72	86.02
	2	02.08	65.79	00.57	90.30	00.33	94.75	00.27	92.29	00.90	82.52
	เฉลี่ย	01.41	76.64	00.66	88.77	00.24	96.18	00.35	90.00	00.81	84.27
TSS2	1.	01.06	82.56	00.48	91.83	00.11	98.24	00.16	95.43	00.56	89.12
	2.	00.82	86.52	00.66	88.77	00.29	95.38	00.26	92.57	00.82	84.10
	เฉลี่ย	00.94	84.54	00.57	90.30	00.20	96.81	00.21	94.00	00.69	86.61
TSS1	1.	05.19	14.64	00.83	85.88	02.20	64.97	00.42	88.00	04.03	21.75
	2.	03.41	43.87	00.65	88.94	02.36	62.41	00.28	92.00	00.43	91.65
	เฉลี่ย	04.30	29.27	00.74	87.41	02.28	63.69	00.35	90.00	02.23	56.69
TSS2	1.	03.83	36.99	01.17	80.10	00.46	92.67	00.14	96.00	02.38	53.78
	2.	04.01	34.05	00.99	82.96	00.64	89.63	00.30	91.43	01.12	78.26
	เฉลี่ย	03.92	35.52	01.08	81.53	00.55	91.15	00.22	93.71	01.75	66.02

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = $\frac{\text{ค่า SS ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด} - \text{ค่า SS หลังผ่านระบบบำบัด}}{\text{ค่า SS ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด}} \times 100$

ค่า SS ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด

ตารางภาคผนวก ก - 4 ผลการหาค่า TP ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
T1S1	1.	05.36	14.11	18.30	09.58	05.49	47.21	02.81	11.63	05.87	11.06
	2	05.72	08.33	14.50	28.36	04.11	60.49	02.63	17.29	4065	29.54
	เฉลี่ย	05.54	11.22	16.40	18.97	04.80	53.85	02.72	14.46	05.26	20.30
T1S2	1.	01.47	76.44	09.80	51.58	01.30	87.50	01.34	57.86	02.50	62.12
	2.	03.69	40.86	07.82	61.36	02.82	72.88	01.84	42.14	01.64	75.14
	เฉลี่ย	02.58	58.65	08.81	56.47	02.06	80.19	01.59	50.00	02.07	68.63
T4S1	1.	02.35	14.85	06.57	24.13	04.60	38.99	01.63	04.12	02.95	32.33
	2.	02.53	08.33	05.95	31.29	02.92	61.27	01.45	14.70	02.21	49.31
	เฉลี่ย	02.44	11.59	06.26	27.71	03.76	50.13	01.54	09.41	02.58	40.82
T4S2	1.	00.63	77.17	01.85	78.63	00.24	96.82	00.22	87.06	00.29	93.35
	2.	00.95	65.67	00.51	94.11	00.42	94.42	00.38	77.64	00.47	89.21
	เฉลี่ย	00.79	71.37	01.18	86.37	00.33	95.62	00.30	82.35	00.38	91.28

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = ค่า TP ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด - ค่า TP หลังผ่านระบบบำบัด X 100

ค่า TP ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด

ตารางภาคผนวก ก - 4 (ต่อ) ผลการหาค่า TP ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่า TP (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
TSS1	1.	01.84	33.33	06.43	25.75	02.39	68.30	01.00	41.17	02.13	51.14
	2.	02.76	00.00	08.33	03.81	03.89	48.40	00.68	60.01	02.27	47.94
	เฉลี่ย	02.30	16.66	07.38	14.78	03.14	58.35	00.84	50.59	02.20	49.54
TSS2	1.	00.47	82.97	01.77	79.56	00.96	87.27	00.18	89.41	00.91	79.13
	2.	00.89	60.14	02.71	68.70	01.10	85.41	00.06	96.47	00.75	82.79
	เฉลี่ย	00.68	75.36	02.24	74.13	01.03	86.34	00.12	92.94	00.83	80.96
TSS1	1.	02.63	04.71	08.06	06.93	02.16	71.35	00.41	75.88	01.75	59.86
	2.	00.84	69.56	06.34	26.79	03.84	49.07	00.15	91.18	01.57	64.00
	เฉลี่ย	01.72	37.68	07.20	16.86	03.00	60.21	00.28	85.53	01.66	61.93
TSS2	1.	00.23	91.66	02.69	68.94	00.94	87.53	00.20	88.23	00.53	87.84
	2.	00.39	85.88	04.07	82.98	01.12	85.15	00.08	95.29	00.39	91.06
	เฉลี่ย	00.31	88.77	03.38	75.96	01.03	86.34	00.14	91.76	00.46	89.45

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = ค่า TP ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด - ค่า TP หลังผ่านระบบบำบัด X 100

ค่า TP ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด

ตารางภาคผนวก ก – 5 ผลการหาค่า TKN ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
T1S1	1.	03.66	70.22	10.13	66.56	13.59	55.50	04.08	70.54	09.93	49.69
	2	06.08	74.94	13.93	54.02	11.87	61.14	05.52	60.14	11.79	40.27
	เฉลี่ย	03.37	72.58	12.03	60.29	12.73	58.32	04.80	65.34	10.86	44.98
T1S2	1.	01.38	88.77	06.84	77.42	07.18	76.49	02.83	79.56	05.56	71.83
	2.	02.12	82.75	07.02	76.83	06.34	79.23	01.75	87.36	06.08	69.19
	เฉลี่ย	01.75	85.76	06.93	77.13	06.76	77.86	02.29	83.46	05.82	70.51
T4S1	1.	05.18	30.93	10.48	48.75	09.65	67.48	05.04	51.44	09.28	41.23
	2.	05.36	28.53	08.74	57.25	14.85	49.98	05.76	52.22	08.04	49.07
	เฉลี่ย	05.27	29.73	09.61	53.00	12.25	58.73	05.40	51.83	08.66	45.15
T4S2	1.	03.02	59.73	05.66	72.32	06.43	78.33	03.72	64.16	06.61	58.14
	2.	02.18	70.93	06.14	69.98	08.61	70.99	02.80	73.02	05.09	67.76
	เฉลี่ย	02.60	65.33	05.90	71.15	07.52	74.66	03.26	68.59	05.85	62.95

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = ค่าTKN ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด - ค่าTKN หลังผ่านระบบบำบัด X 100

ค่า TKN ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด

ตารางภาคผนวก ก - 5 (ต่อ) ผลการหาค่า TKN ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าTKN (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
TSS1	1.	03.96	47.60	10.21	50.07	16.01	46.06	04.41	57.51	10.26	35.02
	2	04.66	37.46	08.99	56.03	11.21	62.23	05.63	45.77	10.44	33.88
	เฉลี่ย	04.31	42.53	09.60	53.05	13.61	54.14	05.02	51.64	10.35	34.45
TSS2	1.	02.61	65.20	05.15	74.81	07.43	74.96	02.36	77.26	06.30	60.10
	2.	02.37	68.40	06.11	70.13	08.93	69.92	03.98	61.66	05.26	66.68
	เฉลี่ย	02.49	66.80	05.63	72.47	08.18	72.44	03.17	69.46	05.78	63.39
TSS1	1.	05.40	28.00	14.08	31.15	17.54	40.90	06.22	40.08	10.35	34.45
	2.	03.22	57.06	09.28	54.61	16.38	44.82	05.64	45.66	12.21	22.67
	เฉลี่ย	04.31	42.53	11.68	42.88	16.93	42.86	05.93	42.87	11.28	28.56
TSS2	1.	01.86	75.20	07.42	63.71	09.77	67.08	04.16	59.92	08.07	48.89
	2.	04.14	44.80	08.76	57.17	11.51	61.22	03.22	68.98	06.79	56.99
	เฉลี่ย	03.00	60.00	07.09	60.44	10.64	64.15	03.69	64.45	07.43	52.94

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = $\frac{\text{ค่า TKN ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด} - \text{ค่า TKN หลังผ่านระบบบำบัด}}{\text{ค่า TKN ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด}} \times 100$

ค่า TKN ของน้ำก่อนเข้าระบบบำบัด

ตารางภาคผนวก ก - 6 ผลการหาค่า Nitrate ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงเวลาพืช									
		30-40 วัน		40-50 วัน		50-60 วัน		60-70 วัน		70-80 วัน	
		ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
T1S1	1.	02.259	-	09.079	-	08.766	-	03.261	-	08.255	-
	2	02.455	-	07.765	-	09.056	-	03.459	-	06.949	-
	เฉลี่ย	02.357	-	08.422	-	08.911	-	03.360	-	07.602	-
T1S2	1.	01.629	30.88	06.779	19.51	06.529	26.73	02.824	15.95	05.492	27.75
	2.	01.875	20.46	07.073	16.01	06.991	21.55	01.760	47.62	06.158	18.99
	เฉลี่ย	01.752	25.67	06.926	17.76	06.760	24.14	02.292	31.78	05.825	23.37
T4S1	1.	03.833	-	07.947	-	08.897	-	03.921	-	06.219	-
	2.	03.541	-	07.431	-	08.255	-	03.639	-	05.905	-
	เฉลี่ย	03.687	-	07.689	-	08.576	-	03.780	-	06.062	-
T4S2	1.	02.388	35.23	05.741	25.33	07.278	15.13	03.379	10.61	05.749	05.16
	2.	02.816	23.63	06.059	21.21	07.764	09.47	03.151	16.63	05.943	01.96
	เฉลี่ย	02.602	29.43	05.900	23.27	07.521	12.30	03.265	13.62	05.846	03.56

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = ค่า ในเตรตของระบบบำบัดไม่ปลูกพืช - ค่า ในเตรตของระบบบำบัดที่ปลูกพืช X 100

ค่า ในเตรตของระบบบำบัดที่ปลูกพืช

ตารางภาคผนวก ก -6 (ต่อ) ผลการหาค่า Nitrate ของน้ำหลังผ่านระบบบำบัด และประสิทธิภาพในการบำบัด

ชุดการทดลอง	ซ้ำ	ช่วงอายุพืช											
		30-40 วัน			40-50 วัน			50-60 วัน			60-70 วัน		
		ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		ค่าNitrate (mg/l)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	
TSS1	1.	03.476	-		07.933	-		08.897	-		03.231	-	
	2	02.564	-		07.437	-		10.167	-		03.805	-	
	เฉลี่ย	03.020	-		07.685	-		09.532	-		03.518	-	
TSS2	1.	02.236	25.96		05.507	28.34		08.806	07.61		03.049	13.33	
	2.	02.742	09.20		05.749	25.18		07.564	20.65		03.287	03.55	
	เฉลี่ย	02.489	17.58		05.628	26.76		08.185	14.13		03.168	09.94	
T6S1	1.	03.769	-		08.364	-		11.342	-		04.056	-	
	2.	02.263	-		07.892	-		12.404	-		04.252	-	
	เฉลี่ย	03.016	-		08.128	-		11.873	-		04.154	-	
T6S2	1.	02.753	08.72		07.375	09.26		10.997	07.38		03.782	08.95	
	2.	02.951	02.20		07.823	03.74		10.289	13.34		03.604	13.23	
	เฉลี่ย	02.852	05.46		07.599	06.50		10.643	10.36		03.693	11.09	

ประสิทธิภาพในการบำบัด (%) = ค่า ในสูตร ของระบบบำบัด ไม่ปลูกพืช - ค่า ในสูตร ของระบบบำบัด ที่ปลูกพืช X 100

ค่า ในสูตร ของระบบบำบัด ที่ไม่ปลูกพืช

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน
(Analysis of Variance : ANOVA)



ตารางภาคผนวก ข – 1 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของระดับความลึกน้ำ และช่วงอายุผักคะน้า ต่อประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น

ความลึก (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน		
10 ซม.	92.16	93.16	91.04	88.31	90.60	455.27	91.054
30 ซม.	91.41	84.89	92.40	93.31	91.77	453.78	90.756
50 ซม.	89.18	86.45	84.69	92.00	87.92	440.24	88.048
รวม	272.75	264.50	268.13	273.62	270.29	1,349.29	269.858
เฉลี่ย	90.916	88.166	89.376	91.206	90.096	449.76	89.952

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก. อายุผักคะน้า	4	18.132	4.533	0.510
ข. ความลึกน้ำ	2	27.429	13.714	1.543
ความคลาดเคลื่อน	8	71.110	8.888	
รวม	14			

ค่าจากตาราง $F_{95; 4,8} = 3.84$

$F_{95; 2,8} = 4.46$

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า ช่วงอายุของผักคะน้า และระดับความลึกของน้ำมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของระบบไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางภาคผนวก ข – 2 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของประสิทธิภาพการบำบัด BOD ของระบบที่มีความลึกน้ำ 10 ซม. ซึ่งได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกัน ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า

ตารางข้อมูล

ชนิดของน้ำ (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน		
น้ำเสียดิบ	95.98	98.06	93.82	86.66	91.93	466.45	93.29
น้ำผ่าน การบำบัด	92.16	93.16	91.04	88.31	90.60	455.27	91.054
รวม	188.14	191.22	184.86	194.97	182.53	921.72	184.344
เฉลี่ย	94.07	95.61	92.43	87.485	91.265	460.86	92.172

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก.อายุผักคะน้า	4	76.558	19.139	5.929
ข. ชนิดของน้ำ	1	12.498	12.498	3.872
ความคลาดเคลื่อน	4	12.914	3.228	
รวม	9			
ค่าจากตาราง	F95; 4,4	=	6.39	
	F95; 1,4	=	7.71	

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า ช่วงอายุของผักคะน้า และชนิดของน้ำที่มีคุณสมบัติต่างกันมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของระบบไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางภาคผนวก ข – 3 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของระดับความลึกน้ำ และช่วงอายุผักคะน้า
ต่อประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น

ความลึก (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน		
10 ซม.	87.83	97.28	82.48	89.14	91.65	448.38	89.676
30 ซม.	84.54	90.30	96.81	94.00	86.61	452.26	90.452
50 ซม.	35.52	91.15	81.53	93.71	66.02	367.93	73.586
รวม	207.89	278.73	260.82	276.85	244.28	1,268.57	253.714
เฉลี่ย	69.29	92.91	86.94	92.28	81.42	422.84	84.568

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน				
เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก. อายุผักคะน้า	4	1,133.469	283.367	1.655
ข. ความลึกน้ำ	2	906.585	453.292	2.642
ความคลาดเคลื่อน	8	1,369.318	171.165	
รวม	14			

ค่าจากตาราง $F_{95; 4,8} = 3.84$
 $F_{95; 2,8} = 4.46$

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า ช่วงอายุของผักคะน้า และระดับความลึกของน้ำมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางภาคผนวก ข – 4 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของประสิทธิภาพการบำบัด SS ของระบบ ที่มีความลึกน้ำ 10 ซม. ซึ่งได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกัน ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า

ตารางข้อมูล

ชนิดของ น้ำ (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน		
น้ำเสียดิบ	96.84	99.68	92.94	94.88	97.54	481.88	96.376
น้ำผ่าน การบำบัด	87.83	97.28	82.48	89.14	91.65	448.38	89.676
รวม	184.67	196.96	175.42	184.02	189.19	930.26	186.052
เฉลี่ย	92.335	98.48	87.71	92.01	94.595	465.13	93.026

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก. อายุผักคะน้า	4	123.954	30.988	6.269
ข. ชนิดของน้ำ	1	112.225	112.225	22.704
ความคลาดเคลื่อน	4	19.771	4.943	
รวม	9			

ค่าจากตาราง F95; 4,4 = 6.39

F95; 1,4 = 7.71

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า

- ก. ช่วงอายุของผักคะน้าไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- ข. ชนิดของน้ำมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัดจากตารางข้อมูลแล้วพบว่า ชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียดิบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

ตารางภาคผนวก ข – 5 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของระดับความลึกน้ำ และช่วงอายุผักคะน้า ต่อประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น

ความลึก (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน		
10 ซม.	71.37	86.37	95.62	82.35	91.28	426.99	85.398
30 ซม.	75.36	74.13	86.34	92.94	80.96	409.73	81.946
50 ซม.	88.77	75.96	86.34	91.76	89.45	432.28	86.456
รวม	235.50	236.46	268.30	267.05	261.69	1269.00	253.80
เฉลี่ย	78.50	78.82	89.43	89.02	87.23	423.00	84.60

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน				
เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก. อายุผักคะน้า	4	361.208	90.302	1.885
ข. ความลึกน้ำ	2	55.626	27.813	0.581
ความคลาดเคลื่อน	8	71.110	8.888	
รวม	14			

ค่าจากตาราง $F_{95; 4,8}$ = 3.84

$F_{95; 2,8}$ = 4.46

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า ช่วงอายุของผักคะน้า และระดับความลึกของน้ำมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางภาคผนวก ข – 6 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของประสิทธิภาพการบำบัด TP ของระบบที่มีความลึกน้ำ 10 ซม. ซึ่งได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกัน ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า

ตารางข้อมูล

ชนิดของน้ำ (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน		
น้ำเสียดิบ	58.65	56.47	80.19	50.00	68.63	313.94	62.788
น้ำผ่าน การบำบัด	71.37	86.37	95.62	82.35	91.28	426.99	85.398
รวม	130.02	142.84	175.81	132.35	159.91	740.93	148.186
เฉลี่ย	65.01	71.42	87.90	66.17	79.95	370.465	74.093

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก.อายุผักคะน้า	4	772.950	193.237	5.914
ข. ชนิดของน้ำ	1	1278.031	1278.031	39.117
ความคลาดเคลื่อน	4	130.688	32.672	
รวม	9			

ค่าจากตาราง F95; 4,4 = 6.39
 F95; 1,4 = 7.71

- ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า
- ก. ช่วงอายุของผักคะน้าไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 - ข. ชนิดของน้ำมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด TP ของระบบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัดจากตารางข้อมูลแล้วพบว่า ชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียดิบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่าชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

ตารางภาคผนวก ข – 7 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของระดับความลึกน้ำ และช่วงอายุผักคะน้า ต่อประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น

ความลึก (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน		
10 ซม.	65.33	71.15	74.66	68.59	62.95	342.68	68.536
30 ซม.	66.80	72.47	72.44	69.46	63.39	344.56	68.912
50 ซม.	60.00	60.44	64.15	64.45	52.94	301.98	60.396
รวม	192.13	204.06	211.25	202.50	179.28	989.22	197.844
เฉลี่ย	64.043	68.020	70.410	67.500	59.760	329.74	65.948

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน				
เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก. อายุผักคะน้า	4	205.77	51.442	2.888
ข. ความลึกน้ำ	2	231.538	115.769	6.501
ความคลาดเคลื่อน	8	142.459	17.807	
รวม	14			

ค่าจากตาราง $F_{95; 4,8} = 3.84$

$F_{95; 2,8} = 4.46$

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า

- ก. ช่วงอายุของผักคะน้า ไม่มีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- ข. ระดับความลึกของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเมื่อพิจารณาจากตารางข้อมูลแล้ว พบว่า ที่ระดับความลึกน้ำ 50 ซม. จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ต่ำกว่าที่ความลึกน้ำ 10 และ 30 ซม.

ตารางภาคผนวก ข – 8 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของประสิทธิภาพการบำบัด BOD ของระบบที่มีความลึกน้ำ 10 ซม. ซึ่งได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกัน ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า

ตารางข้อมูล

ชนิดของน้ำ (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน		
น้ำเสียดิบ	85.76	77.13	77.86	83.46	70.51	394.72	78.944
น้ำผ่าน การบำบัด	65.33	71.15	74.66	68.59	62.95	342.68	68.5364
รวม	151.09	148.28	152.52	152.05	133.46	737.40	147.48
เฉลี่ย	75.545	74.14	76.26	76.025	66.735	368.70	73.742

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก.อายุผักคะน้า	4	128.259	32.065	1.282
ข. ชนิดของน้ำ	1	270.815	250.815	10.831
ความคลาดเคลื่อน	4	100.013	25.003	
รวม	9			

ค่าจากตาราง $F_{95; 4,4} = 6.39$
 $F_{95; 1,4} = 7.71$

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า

- ก. ช่วงอายุของผักไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ของระบบแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- ข. ชนิดของน้ำมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด SS ของระบบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัดจากตารางข้อมูลแล้วพบว่า ชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียดิบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้น

ตารางภาคผนวก ข – 9 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของระดับความลึกน้ำ และช่วงอายุผักคะน้า
ต่อประสิทธิภาพในการบำบัด Nitrate ของระบบที่ได้รับน้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น

ความ ลึก (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40 วัน	40-50 วัน	50-60 วัน	60-70 วัน	70-80 วัน		
10 ซม.	29.43	23.27	12.30	13.62	03.56	82.18	16.436
30 ซม.	17.58	26.76	14.13	09.94	20.24	88.65	17.730
50 ซม.	05.46	00.50	10.36	11.09	5.95	33.36	06.672
รวม	52.47	50.53	36.79	34.65	29.75	204.19	40.838
เฉลี่ย	17.49	16.84	12.26	11.55	09.92	68.063	13.612

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน				
เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก. อายุผักคะน้า	4	135.6179	33.9054	0.5366
ข. ความลึกน้ำ	2	365.4815	182.7407	2.8922
ความคลาดเคลื่อน	8	505.4699	63.1837	
รวม	14			

ค่าจากตาราง $F_{95; 4,8} = 3.84$
 $F_{95; 2,8} = 4.46$

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า ช่วงอายุของผักคะน้า และระดับความลึกของน้ำมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด Nitrate ของระบบไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางภาคผนวก ข – 10 การวิเคราะห์ 2-way ANOVA ของประสิทธิภาพการบำบัด Nitrate ของระบบที่มีความลึกน้ำ 10 ซม. ซึ่งได้รับน้ำเสียที่มีคุณสมบัติต่างกัน ในแต่ละช่วงอายุผักคะน้า

ตารางข้อมูล

ชนิดของน้ำ (b)	ช่วงอายุผักคะน้า (k)					รวม	เฉลี่ย
	30-40วัน	40-50วัน	50-60วัน	60-70วัน	70-80วัน		
น้ำเสียดิบ	25.67	17.76	24.14	31.18	23.37	122.12	24.424
น้ำผ่าน การบำบัด	29.43	23.27	12.30	13.62	03.56	082.18	16.436
รวม	55.10	41.03	36.44	44.80	26.93	204.30	40.86
เฉลี่ย	27.55	20.516	18.22	22.40	13.465	102.151	20.13

ตารางวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

เหตุศึกษา	df	SS	MS	F
ก.อายุผักคะน้า	4	301.2457	75.3114	1.5220
ข. ชนิดของน้ำ	1	159.5203	159.2503	3.2183
ความคลาดเคลื่อน	4	197.9262	49.4815	
รวม	9			

ค่าจากตาราง	F95; 4,4	=	6.39
	F95; 1,4	=	7.71

ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ ต่ำกว่าค่าที่เปิดได้จากตาราง สรุปได้ว่า ช่วงอายุของผักคะน้า และชนิดของน้ำที่มีคุณสมบัติต่างกันมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัด Nitrate ของระบบไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ-สกุล นางสาวชลิตา ช้างแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด 12 มิถุนายน 2516
สถานที่เกิด จังหวัดนนทบุรี ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, พ.ศ. 2533 – 2536
วิทยาศาสตรบัณฑิต (วาริชศาสตร์)
มหาวิทยาลัยมหิดล, พ.ศ. 2539 – 2544
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร)