

การคัดเลือกพืชทนเค็มเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินแนวนอน



ชินดนัย เอื้อเพื่อพันธุ์

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

การคัดเลือกพืชทนเค็มเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินแนวนอน



ชินดนัย เอื้อเพื่อพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การคัดเลือกพืชทนเค็มเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

ซินดนัย เอื้อเฟื้อพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน ชื่นบาล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิราภรณ์ ชื่นบาล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวัฒน์ สาครวาสี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิราภรณ์ ชื่นบาล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การคัดเลือกพืชทนเค็มเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดิน แนวนอน
ชื่อผู้เขียน	นายชินดนัย เอื้อเพื่อพันธุ์
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธูปน ชื่นบาล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกพืชทนเค็มสำหรับโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ (1) การคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม และ (2) การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

การทดลองที่ 1 พืชทนเค็มที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ रुपฤๅษี กกราชินี หญ้าแฝก และ ชะคราม ทำการปลูกลงในกระถางที่มีดินเป็นวัสดุปลูก ความทนเค็มของพืชถูกทดสอบที่ระดับความเค็ม 0, 12, 15 และ 18 ppt ตามลำดับ 4 ชุดการทดลอง ชุดทดลองละ 3 ซ้ำ พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ จำนวนต้น และความสูงของพืช และลักษณะทางกายภาพ ผลการทดลองพบว่า หญ้าแฝก และ रुपฤๅษี สามารถทนความเค็มที่ 12 และ 15 ppt ตามลำดับ กกราชินี และชะคราม สามารถทนความเค็มที่ 18 ppt เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อกักน้ำของโรงงานฝักและผลไม้ดองที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 14.6-16.5 ppt ดังนั้น रुपฤๅษี กกราชินี และ ชะคราม มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

การทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอนสร้างจากอ่างพลาสติก กว้าง 0.64 m. ยาว 0.85 m. และสูง 0.3 m. ตามลำดับ ภายในบรรจุวัสดุตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ ดินหินเกล็ด และทราย จากนั้นพืชทนเค็มทั้งหมด ได้แก่ रुपฤๅษี กกราชินี ชะคราม และ ระบบควบคุม (ไม่มีต้นพืช) มาปลูกในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน สำหรับ 4 ชุดการทดลอง การทดลองละ 3 ซ้ำ รวมทั้งสิ้น 12 อ่าง น้ำทิ้งที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำทิ้งที่

นอกจากบ่อพักน้ำของโรงงานผักและผลไม้ดอง ที่มีค่า ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความเค็ม การนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ไนเตรท และฟอสเฟต อยู่ในช่วง 192-218 mg/l 149.6-169.4 mg/l 98.5-107.3 mg/l 14.6-16.5 ppt 24.1-26.9 mS/cm 15,430-17,239 mg/l 0.73-0.86 mg/L.NO₃⁻ และ 3.58-3.83 mg/L.PO₄³⁻ ตามลำดับ แต่ละระบบเติมน้ำที่เข้าสู่ระบบแบบต่อเนื่องที่ 6 l/d พื้นที่รับน้ำ 0.43 m² อัตราการระบรทุกชลศาสตร์ที่ 1.40 cm./d การระบรทุกสารอินทรีย์ที่ 0.0025 kg./m²-d และ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำออกจากระบบทุกๆ 5 วัน เป็นระยะเวลา 140 วัน ผลการทดลองพบว่าพืชทนเค็มที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่จากโรงงานผักและผลไม้ดองคือ ชะคราม โดยค่า ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความเค็ม การนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ไนเตรท และฟอสเฟต ลดลงเหลือ 33.47±2.00 mg/l 19.68±1.25 mg/l 12.24±0.94 mg/l 11.40±0.13 ppt 19.39±0.14 mS/cm 12,412±91.84 mg/l 0.35±0.02 mg/L.NO₃⁻ และ 0.69±0.02 mg/L.PO₄³⁻ ตามลำดับ และ ประสิทธิภาพ ในการบำบัด ร้อยละ 83.2 87.3 88.6 24.4 21.7 21.7 58.3 และ 81.6 ตามลำดับ สำหรับกกราชินีนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่รองลงมาจากชะคราม และรูปฤกษ์ไม่สามารถบำบัดน้ำที่นี้ได้ เนื่องจากการตายจากสภาวะความเป็นพิษของไอออน ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ทำได้ใกล้เคียงกับระบบควบคุม

ในด้านปริมาณโซเดียมในพืช หลังจากการทดลองพบว่าชะครามมีการดูดซึมโซเดียมเข้าไปในต้นเพิ่มขึ้น 25.12 g. รองลงมาได้แก่ รูปฤกษ์ และ กกราชินี โดยเพิ่มขึ้น 2.79 และ 0.58 g. ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามพืชทนเค็มทั้งหมด และชั้นตัวกลางในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนสามารถกักเก็บเกลือในระบบได้ประมาณร้อยละ 14.5 ของปริมาณเกลือทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ ทำให้พืชทั้ง 3 ชนิดนั้นยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการบำบัดความเค็มจากน้ำที่ของโรงงานผักและผลไม้ดองได้

สรุปได้ว่าชะครามสามารถบำบัดซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ธาตุอาหาร และสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะความเค็มของน้ำที่จากโรงงานผักและผลไม้ดองได้ แต่อย่างไรก็ตาม ชะครามยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดความเค็มไม่เพียงพอให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ : พืชทนเค็ม, ชะคราม, รูปฤกษ์, กกราชินี, ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

Title	SELECTION OF HALOPHYTES FOR PICKLED INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT BY HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS
Author	Mr. Chindanai Aurfurphan
Degree	Master of Science in Environmental Technology
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Tapan Cheunbarn

ABSTRACT

This experiment aims to select halophytes for pickled industry wastewater treatment using horizontal subsurface flow constructed wetlands. The research was divided into two experiments: (1) selecting halophytes with salt-tolerant abilities, and (2) studying the efficiency of halophytes for pickled industry wastewater treatment using horizontal subsurface flow-constructed wetlands (HSCWs).

In experiment 1: Halophytes used in the study included *Typha angustifolia* (Cattail), *Cyperus alternifolius* (Umbrella sedge), *Vetiveria zizanioides* (Vetiver grass), and *Suaeda maritima* (Seablite). They were planted in pots with soil used for the planting material. Salinity tolerance was tested with salinity levels of 0, 12, 15, and 18 ppt, respectively, for 4 treatments with 3 replicates. Parameters analyzed included the number and height of plants, and physical characteristics. The results found that *V.zizanioides* and *T.angustifolia* can tolerate salinity of 12 and 15 ppt, respectively. *C.alternifolius* and *S.maritima* were able to tolerate a salinity concentration of 18 ppt compared to the concentration of effluent discharged from the clarifier of the pickled industry at a concentration between 14.6-16.5 ppt. Thus, *T.angustifolia*, *C.alternifolius*, and *S.maritima* are suitable for use in further experiments.

In experiment 2: study the efficiency of halophytes for pickled industry wastewater treatment by HSCWs. HSCWs were constructed by plastic tubs with a

width, length and height of 0.64 m., 0.85 m., and 0.3 m. respectively Inside the tubs, 3 types of intermediates were used: soil, chipped stone, and sand. Afterward, all halophytes, including *T.angustifolia*, *C.alternifolius*, *S.maritima*, and control (without plants) were planted in the HSCWs for 4 treatments with 3 replicates total of 12 ponds. The influent used for feeding each HSCWs was obtained from the effluent discharged from the clarifier of the pickled industry with COD, BOD, SS, Salinity, EC, TDS, Nitrate, and Phosphate average in the range 192-218 mg/l, 149.6-169.4 mg/l, 98.5-107.3 mg/l, 14.6-16.5 ppt, 24.1-26.9 mS/cm, 15,430-17,239 mg/l, 0.73-0.86 mg/l.NO₃⁻ and 3.58-3.83 mg/l.PO₄³⁻ respectively, Each system's influence was continuously fed to HSCWs with a 6 l/d flow, an area of 0.43 m², a hydraulic loading rate of 1.40 cm/d, an organic loading rate of 0.0025 kg/m²-d, and sampling was conducted every 5 days for 140 days. The results indicated that the halophyte most efficient in treating wastewater from the pickled industry was *S. maritima*, in which COD, BOD, SS, salinity, EC, TDS, nitrate, and phosphate were reduced to 33.47±2.00 mg/l, 19.68±1.25 mg/l, 12.24±0.94 mg/l, 11.40±0.13 ppt, 19.39±0.14 mS/cm, 12,412±91.84 mg/l, 0.35±0.02 mg/l NO₃⁻, and 0.69±0.02 mg/l PO₄³⁻, respectively, and the treatment efficiency of 83.2%, 87.3%, 88.6%, 24.4%, 21.7%, 21.7%, 58.3%, and 81.6%, respectively. Regarding *C.alternifolius* it is less efficient in treating wastewater than *S.maritima* and *T.angustifolia* which are unable to treat wastewater due to ion toxicity. This leads to a wastewater treatment efficiency that is comparable to a control system.

In terms of sodium content in plants, After the experiment, it was found that *S.maritima* exhibited increased sodium absorption into the plant of 25.12 g. This was followed by *T. angustifolia* and *C.alternifolius*, which showed increases of 2.79 g and 0.58 g, respectively. However, all halophytes and media in HSCWs were able to retain approximately 14.5% of the total salt entering the system. This indicates that these three plant species are still not efficient enough in treating salinity in wastewater from the pickled industry.

In summary, *S. maritima* is capable of treating COD, BOD, SS, nutrients, and it can thrive in saline wastewater from pickled industry. However, the efficiency of *S.maritima* in treating high salinity is insufficient to meet the industrial wastewater standards.

Keywords : Halophyte, Seablite, Cattail, Umbrella Sedge, Constructed wetlands



กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐปน ชื่นบาล ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิราภรณ์ ชื่นบาล และ รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวัฒน์ สาครวาสี กรรมการที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษา ความรู้ และคำแนะนำ รวมไปถึงการสนับสนุนอุปกรณ์ สารเคมีต่างๆที่ใช้ในการประกอบการทำวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของหลักสูตร เทคโนโลยีชีวภาพ และ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกคนที่คอยสนับสนุนทั้งในด้านการอบรมสั่งสอน ทุนการศึกษา และกำลังใจในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้จนลุล่วงสำเร็จไปได้ด้วยดี

ชินดนัย เอื้อเพื่อพันธุ์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
ขอบเขตงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	5
2.1 น้ำเสีย (Wastewater).....	5
น้ำเสียจากกระบวนการหมักดอง (Picking process wastewater).....	6
ความเค็มของน้ำ (Salinity).....	10
2.4 ผลกระทบของความเค็มต่อพืช.....	11
2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetlands).....	12
2.6 การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช (Phytoremediation).....	32
2.7 พืชทนเค็มและกลไกของพืชทนเค็ม (Halophyte and mechanisms).....	34
2.8 พืชที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	36
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44

บทที่3 วิธีการดำเนินการวิจัย	48
3.1 สถานที่ และระยะเวลาการทำวิจัย.....	48
3.2 อุปกรณ์การดำเนินการวิจัย.....	49
3.3 การเตรียมอุปกรณ์ก่อนการทดลอง.....	51
3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง	56
บทที่4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	63
การทดลองที่ 1 การคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม.....	63
การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน	71
4.1 พีเอช และ อุณหภูมิ	72
4.2 การบำบัดความเค็ม การนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย	73
4.3 การบำบัดซีโอดีและบีโอดี.....	76
4.4 การบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย	78
4.5 การบำบัดค่าไนเตรทและฟอสเฟต.....	79
4.6 การวิเคราะห์โซเดียมในพืชทนเค็มและในชั้นตัวกลาง.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	90
ภาคผนวก.....	93
บรรณานุกรม.....	119
ประวัติผู้วิจัย	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานหมักดอง บริษัทสันติภาพ (ฮั่วเพ็ง 1958) จำกัด.....	9
ตารางที่ 2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผักกาดเขียวปลีตอง.....	9
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของแองน้ำธรรมชาติ.....	13
ตารางที่ 4 หน้าที่ของพีชโผล่พ้นน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์.....	16
ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพีช.....	25
ตารางที่ 6 เกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดิน.....	31
ตารางที่ 7 ระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อต้นพีช.....	35
ตารางที่ 8 คุณลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง.....	52
ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด.....	57
ตารางที่ 10 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	60
ตารางที่ 11 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน.....	60
ตารางที่ 12 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างต้นพีช.....	61
ตารางที่ 13 จำนวนของต้นพีชเฉลี่ยในกระถาง ก่อน-หลัง การทดลอง.....	65
ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงความสูง/ความกว้างทรงพุ่ม ก่อน-หลัง การทดลอง.....	66
ตารางที่ 15 ตารางสรุปชนิดพีชที่สามารถทนความเค็มที่ระดับต่างๆ.....	71
ตารางที่ 16 คุณลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง.....	72
ตารางที่ 17 ตารางสรุปการเปรียบเทียบเชิงสถิติของน้ำทิ้งหลังการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน.....	81
ตารางที่ 18 ความสูงต้นพีชและน้ำหนักแห้งของต้นพีชทั้งหมดในระบบเฉลี่ย ก่อน-หลัง การทดลอง.....	84
ตารางที่ 19 ปริมาณโซเดียมในต้นพีชทั้งหมดในระบบ ก่อน-หลัง การทดลอง.....	85
ตารางที่ 20 ค่าเฉลี่ย พีเอช การนำไฟฟ้า และ ความเค็มสะสมในดิน ก่อน-หลัง การทดลอง.....	86



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตผักและผลไม้ดอง และน้ำเสียจากกระบวนการหมักดอง.....	6
ภาพที่ 2 ระบบชั้นกรองในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์.....	14
ภาพที่ 3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน	18
ภาพที่ 4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ดินในแนวนอน	19
ภาพที่ 5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวตั้ง.....	20
ภาพที่ 6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน.....	21
ภาพที่ 7 ชนิดรูปแบบการไหลของน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์	23
ภาพที่ 8 การลำเลียงออกซิเจนในต้นพืช	24
ภาพที่ 9 กลไกการกำจัดบีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์	28
ภาพที่ 10 การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช.....	33
ภาพที่ 11 รูปถ่าย.....	37
ภาพที่ 12 กราฟขี้นี้	39
ภาพที่ 13 ชะคราม.....	41
ภาพที่ 14 หล้าแฝก	43
ภาพที่ 15 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผักและผลไม้ดอง	53
ภาพที่ 16 ขั้นตอนต่างๆ ของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผักและผลไม้ดอง.....	54
ภาพที่ 17 โรงเรือนที่ใช้ในการทดลอง	55
ภาพที่ 18 แผนภาพแสดงรูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินใน แนวนอนที่ใช้ในการทดลอง	58
ภาพที่ 19 ไดอะแกรมแผนการทดลอง	62
ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของชะครามที่ได้รับความเค็มก่อนและหลังการทดลอง	67

ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของกราซินีที่ได้รับความเค็มก่อนและหลังการทดลอง	68
ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของรูปกษีที่ได้รับความเค็มก่อนและหลังการทดลอง.....	69
ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของต้นหญ้าแฝกก่อนและหลังการปรับสภาพที่ได้รับความเค็ม.	70
ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่าความเค็มของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน.....	74
ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน	75
ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน..	75
ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน	77
ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงค่าบีโอดีของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน	77
ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs.....	78
ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน.....	80
ภาพที่ 31 การเปลี่ยนแปลงค่าฟอสเฟตของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน	80
ภาพที่ 32 ลักษณะใบของชะคราม หลังการทดลอง ที่มีการอบน้ำ (Succulence).....	87
ภาพที่ 33 การแสดงอาการของ รูปกษี เมื่อได้รับสภาวะความเค็มอย่างต่อเนื่อง (Scale bar 2 ซม.)	87
ภาพที่ 34 ลักษณะต้นพืชในระบบก่อนการทดลอง	88
ภาพที่ 35 ลักษณะต้นพืชในระบบหลังการทดลอง.....	89

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตผักและผลไม้ต้องเป็นกระบวนการเพื่อถนอมอาหารโดยวิธีการดองด้วยเกลือในปริมาณที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บางชนิดที่ผลิตกรด ป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดอาหารบูดเน่าเจริญเติบโต ด้วยการเก็บรักษาผักและผลไม้ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นสูง โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตผักและผลไม้ดองในโรงงานอุตสาหกรรมมี 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ การล้าง การปอกเปลือก/ตัดแต่ง และการดอง ทำให้ในกระบวนการผลิตจึงก่อให้เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากการปนเปื้อนของเกลือในปริมาณสูง โดยน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีความเค็มอยู่นั้น ส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์ สัตว์ และพืช โดยความเค็มในน้ำทิ้งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต โดยการยับยั้งการเจริญเติบโต ลดผลผลิต และอัตราการอยู่รอด ซึ่งผลกระทบต่อเหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตทำให้เกิดการลดความหลากหลายทางสายพันธุ์ อีกทั้งผลกระทบต่อน้ำที่มีความเค็ม ยังทำให้เกิดผลกระทบอื่น ๆ อีก เช่น ผลกระทบต่อการผลิตน้ำประปา ทำให้แหล่งน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาเหลือน้อย อีกทั้งยังมีผลต่อสุขภาพจากการบริโภคน้ำที่มีความเค็ม เช่น โรคไต ความดันโลหิตสูง เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) ทำให้น้ำทิ้งที่มีความเค็มที่ปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาตินั้นจึงเป็นปัญหาที่ควรได้รับการแก้ไข

ซึ่งวิธีการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ เทคโนโลยีการให้ความร้อน เช่น การระเหย กลั่นตัว เทคโนโลยีเยื่อกรอง เช่น เยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน เยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน เยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน การใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ เช่น ระบบระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ ระบบเอสปีอาร์ เป็นต้น และ การใช้เทคโนโลยีทางเคมีกายภาพ เช่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน และเทคนิคทางด้านไฟฟ้าเคมี ทั้งนี้วิธีการเหล่านี้ส่วนใหญ่ล้วนต้องมีการใช้อุปกรณ์ที่ทันสมัยใช้ต้นทุนสูงและใช้พลังงานมากทำให้ยังไม่เหมาะต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมในหลายพื้นที่ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands: CWs) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีนำมาใช้สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งหลังจากผ่านการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากมีความคุ้มค่าและเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่มีศักยภาพ

(Stefanakis, 2019) โดยเฉพาะ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน (Horizontal subsurface flow constructed wetlands: HSCWs) โดยในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้นมีพืชหลากหลายชนิดให้เลือกใช้ในการบำบัด

สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มนั้น ได้มีพืชที่มีความจำเพาะในการบำบัด คือ พืชทนเค็ม (Halophytes) ซึ่งมีลักษณะและความสามารถในการปรับตัวในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มได้มากกว่าพืชทั่วไป โดยพืชในกลุ่มนี้สามารถฟื้นฟูพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความเค็มได้ โดยสามารถช่วยลดความเค็มและความเป็นพิษจากเกลือได้ ซึ่งมีรายงานการศึกษาพืชทนเค็มที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดโดยทั่วไปในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ ได้แก่ ธูปฤๅษี กกราชินี และหญ้าแฝก พบว่าอุตสาหกรรมที่มีน้ำเสียที่มีความเค็มที่นำเอาพืชเหล่านี้ไปใช้ในการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ เช่น โรงงานฟอกหนัง โรงงานเยื่อกระดาษ บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โรงงานสิ่งทอ เป็นต้น ซึ่งพืชเหล่านี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มได้เป็นอย่างดี (Liang et al., 2017) ในส่วนของชะคราม เป็นพืชทนเค็มได้ดีสามารถเจริญในน้ำกร่อยและป่าชายเลน (อารีย์ และคณะ, 2559) โดยงานวิจัยของ Malik and Ravindran (2018) พบว่าต้นชะครามเป็นพืชทนเค็มที่มีความสามารถปรับตัวในสภาวะที่มีความเค็มสูงและ สามารถสะสมเกลือไว้ในเนื้อเยื่อได้ ด้วยกลไก การอวบน้ำ ช่วยลดความเป็นพิษของโซเดียมในเซลล์ทำให้เกิดสมดุลของแรงดันออสโมติกในชะคราม (อรุณี และสมศรี, 2542) ทำให้พืชทนเค็มทั้ง 4 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้นมีความน่าสนใจในการนำมาทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกพืชทนเค็มที่สามารถทนต่อสภาวะความเค็มของน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง และศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อคัดเลือกพืชทนเค็มที่สามารถทนต่อสภาวะความเค็มของน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงชนิดของพืชที่จะสามารถนำไปใช้ในการบำบัดความเค็มจากน้ำทิ้งโรงงานฝักและผลไม้ดองได้
2. ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้พืชทนเค็มในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอน
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาเป็นเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

- 1.1 เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) โดยทำการศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และ ทดลองในสภาพกลางแจ้ง ณ โรงบำบัดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- 1.2 น้ำทิ้งออกจากบ่อกักน้ำของโรงงานฝักและผลไม้ดอง ภายใน จ.ลำพูน
- 1.3 พืชที่ใช้ในการศึกษาได้แก่
 - 1.3.1 ฐปฤชี (*Typha angustifolia*)
 - 1.3.2 กกราชินี (*Cyperus alternifolius*)
 - 1.3.3 หลู่ฟ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*)
 - 1.3.4 ชะคราม (*Suaeda maritima*)

1.4 ในการคัดเลือกพืชทนเค็มและศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานฝักและผลไม้ดอง โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วงการทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 การคัดเลือกพืชทนเค็มที่มีความสามารถในการทนความเค็ม

การทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินแนวนอน



บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 น้ำเสีย (Wastewater)

น้ำเสียหมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยมีแหล่งที่มาจาก คร้วเรือน อุตสาหกรรม เกษตรกรรม หรือการใช้งานประเภทอื่นๆ โดยเป็นน้ำที่มีสิ่งเจือปนที่มาจากวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จนกระทั่งกลายเป็นลักษณะ กลิ่น สี รส ที่น่ารังเกียจ ทำให้มีคุณภาพที่ต่ำและไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์อีกต่อไป ซึ่งหากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำดังกล่าวไม่สามารถนำมาอุปโภคและบริโภค และทำให้คุณภาพน้ำของธรรมชาติเสื่อมโทรมได้ โดยสิ่งปนเปื้อนสำคัญที่เกี่ยวข้องที่มักมากับน้ำเสียอันได้แก่ สารแขวนลอย (Suspended solids) สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable organics) ธาตุอาหาร (nutrients) โลหะหนัก (Heavy metal) และ สารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolved inorganics) โดยน้ำเสียแบ่งออกตามแหล่งกำเนิดได้ 3 ประเภทดังนี้

2.1.1 น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial wastewater)

เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท โดยน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากการชำระล้างอุปกรณ์และกระบวนการผลิต โดยลักษณะและคุณสมบัติของน้ำเสียนั้นจะมีความแตกต่างกันไปตามประเภทและรูปแบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมนั้นๆ ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งอาจมีการใช้สารพิษ เช่น โลหะหนัก และสารกัมมันตภาพรังสี ได้แก่ สารหนู ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม สังกะสีโครเมียม นิเกิล แมงกานีส เป็น ยูเรเนียม สตรอนเตียม ซีเซียม เป็นต้น

2.1.2 น้ำเสียจากชุมชน (Domestic wastewater)

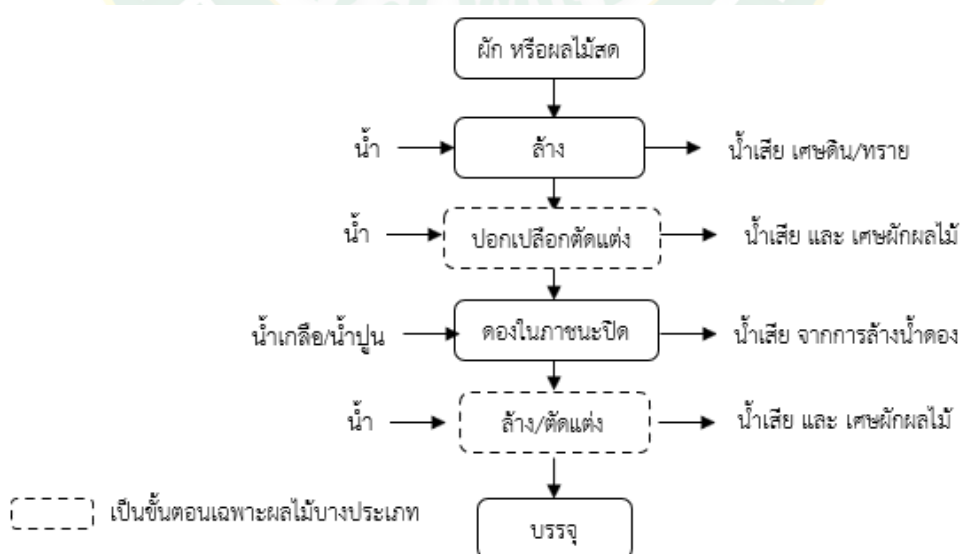
เป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของประชาชนในชุมชน อาคาร ตลาด และครัวเรือน อันได้แก่ การชำระล้าง การประกอบอาหาร การขับถ่าย เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่ น้ำเสียชุมชนมักประกอบไปด้วย สารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ แต่หากมีมากจนเกินไปอาจส่งผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำ หรือทำให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำได้

2.1.3 น้ำเสียจากการเกษตร (Agricultural wastewater)

เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมในการทำการเกษตร โดยอาจแบ่งเป็นสองประเภทได้แก่ การทำเกษตรชนิดอยู่กับที่ หรือ ทรานสเฟอร์พอยท์ (Point source) เช่น ฟาร์มปศุสัตว์ต่างๆ ได้แก่ ฟาร์มสุกร ฟาร์มโคนม-โคเนื้อ ฟาร์มไก่ และ กุ้ง เป็นต้น และอีกประเภทคือไม่ทรานสเฟอร์พอยท์ที่แน่นอน (Non-point source) เช่น การทำเกษตรและเพาะปลูกในพื้นที่ต่างๆ ซึ่งมีการใช้ปุ๋ยและสารเคมีที่เป็นมลพิษ เช่น ยากำจัดแมลง ยากำจัดวัชพืช และ ปุ๋ยเคมี ซึ่งอาจมีการชะจากฝนและปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำชุมชนหรือธรรมชาติ

น้ำเสียจากกระบวนการหมักดอง (Pickling process wastewater)

น้ำเสียจากกระบวนการหมักดองเป็นน้ำเสียประเภทหนึ่งของน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยกระบวนการในการผลิตจะใช้น้ำ ในกระบวนการเป็นปริมาณมากในกระบวนการผลิต น้ำทิ้งจากกระบวนการหมักดองก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียได้ และมีค่า ซีโอดีที่สูง เนื่องจาก ของเสียที่มาจากกระบวนการผลิตมีสารอินทรีย์ ปนเปื้อนสูง มีจุลินทรีย์ ในกระบวนการหมักสร้าง สารประกอบจำพวกกรด แอลกอฮอล์ และอื่น ๆ ขึ้น ซึ่งสารเหล่านี้มีฤทธิ์ในการยับยั้ง หรือชะลอการเจริญของจุลินทรีย์อื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุการเน่าเสีย (สุวรรณยา, 2559) โดยกระบวนการผลิตผักและผลไม้ดอง และน้ำเสียจากกระบวนการหมักดองแสดงดัง ภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตผักและผลไม้ดอง และน้ำเสียจากกระบวนการหมักดอง
ที่มา:กรมควบคุมมลพิษ (2548)

2.2.1 กระบวนการหมักดอง

การดอง (Pickling) หมายถึง การเก็บรักษาอาหารหรือถนอมอาหารในน้ำเกลือหรือน้ำส้มสายชูโดยมีจุลินทรีย์หรือไม่มีจุลินทรีย์ก็ได้ ในการเก็บรักษาผักและผลไม้ดองนั้น เชื่อว่าเกิดขึ้นในเอเชียมาเป็นระยะเวลานานมาแล้ว ตัวอย่างเช่น ในประเทศฟิลิปปินส์ ถือว่าอาหารประเภทดองนั้นเป็นอาหารที่มีคุณค่า และเป็นอุตสาหกรรมที่มีสำคัญ โดยตัวอย่างของผักดองโดยทั่วไปที่รู้จัก เช่น กะหล่ำปลีดอง (Sauerkraut) และ กิมจิ (Kimchi) เป็นต้น สำหรับในประเทศไทย ซึ่งมีผักผลไม้หลากหลายชนิด ทุกฤดูกาลตลอดทั้งปี และผักที่นิยมนำมาดอง ได้แก่ หน่อไม้ดอง ผักกาดดอง กระเทียมดอง และ ขิงดอง เป็นต้น

กระบวนการดองผักเกิดจากจุลินทรีย์ประเภทสร้างกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) ซึ่งจะมากับผักหรือผลไม้ดอง และทำการใส่เกลือปริมาณที่พอเหมาะจะทำการการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของผัก แต่ในส่วนแบคทีเรียประเภทที่สร้างกรดแลคติกนั้นจะเจริญเติบโตได้ดี โดยเกลือจะทำให้น้ำในเนื้อเยื่อของผัก น้ำตาล สารประเภทคาร์โบไฮเดรต และแร่ธาตุต่าง ๆ ละลายออกมาในน้ำ จุลินทรีย์ประเภทสร้างกรดแลคติก (Lactic acid) นี้จะใช้สารอาหารต่าง ๆ เหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิต และสร้างกรดแลคติก (Lactic acid) กรดอะซิติก (Acetic acid) คาร์บอนไดออกไซด์ และแอลกอฮอล์ ซึ่งสารเหล่านี้ โดยเฉพาะกรดแลคติกจะทำหน้าที่ถนอมอาหาร และเพิ่มกลิ่น และรสให้แก่ผักดอง (นรินทร์ และรัชณี, 2563)

กรรมวิธีการดองผักและผลไม้จะเริ่มจาก การนำผักและผลไม้สดมาทำความสะอาด ทำการตัดแต่งให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นทำการ เติมเกลือ และน้ำ เพื่อให้สารละลายมีความเข้มข้นของเกลือประมาณร้อยละ 2.25 - 2.50 โดยน้ำหนัก เมื่อคลุกเคล้าให้เข้ากันดีแล้ว จึงนำไปใส่ภาชนะที่ปิดมิดชิด โดยกระบวนการภายในนั้น น้ำเกลือจะดึงน้ำที่อยู่ในเซลล์ของผักออกมา โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการหมักจะอยู่ที่ประมาณ 21 - 29 °C ใช้ระยะเวลาหมักประมาณ 2 - 3 สัปดาห์ ระหว่างการหมักจะไม่มียีสต์ หรือเชื้อราเจริญเติบโต เนื่องจากผักหรือผลไม้ดองนั้นอยู่ในน้ำตลอดเวลา ส่วนประกอบน้ำตาลในผัก ส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวประมาณร้อยละ 85 และน้ำตาลโมเลกุลคู่ประมาณร้อยละ 15 ซึ่งน้ำตาลเหล่านี้มีผลต่อปริมาณกรดที่ได้ ถ้ามีปริมาณน้ำตาลสูง จุลินทรีย์จะสามารถผลิตกรดได้มากตามไปด้วย โดยลักษณะผักหรือผลไม้ดองที่ดีจะต้องมีสีสันทึบยังสดใส และมีความกรอบสะอาดและมีรสชาติที่เป็นกรดประมาณร้อยละ 1.7 พบว่า ผักหรือ

ผลไม้ต้องทั่วไปมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 3.6 ปริมาณกรดแลคติกร้อยละ 1.25 กรดอะซิติก ร้อยละ 0.3 และเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 0.58 (รอยพิมพ์, 2549)

2.2.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานผักและผลไม้ดอง (Characteristic of pickled industry wastewater)

ลักษณะน้ำเสียของโรงงานผักและผลไม้ดอง นั้นในกระบวนการในการผลิตจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำการผลิตในหลายขั้นตอน จึงส่งผลให้มีการใช้น้ำในปริมาณที่มาก ซึ่งลักษณะของน้ำเสียของโรงงานและผลไม้ดองนั้นจะมีค่า ซีโอดี (COD:Chemical oxygen demands) ที่สูง เนื่องจากของเสียที่มาจากกระบวนการผลิตนั้น มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่สูงมาก อีกทั้งยังมีจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก และสร้างสารประกอบจำพวกกรด แอลกอฮอล์และอื่น ๆ ขึ้นมา ซึ่งสารเหล่านี้มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุให้ผักหรือผลไม้ดองการเน่าเสีย ส่งผลให้น้ำเสียนี้มีความเป็นกรดและ ซีโอดีเพิ่มขึ้น (สุภาวดี และคณะ, 2557) นอกจากนี้ขั้นตอนการดองผักดองที่กล่าวไปข้างต้นที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียจำนวนมากแล้ว ยังมีขั้นตอนการปรับจืด และจะต้องทำการเจือจางด้วยการเติมน้ำจืดลงไปจำนวนเท่าตัว เพื่อนำไปสู่กระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศต่อไป (รอยพิมพ์, 2549) จากข้อมูลการศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียจากการแปรรูปผักและผลไม้ในประเทศไทย พบว่ามีคุณลักษณะดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานหมักดอง บริษัทสันติภาพ (ฮั่วเพ็ง 1958) จำกัด

พารามิเตอร์	คุณลักษณะน้ำโรงงานแปรรูปผักและผลไม้
พีเอช	6.7-7.0
ซีโอดี (mg/l)	1,280 2,100
บีโอดี (mg/l)	975-1,750
การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	13,000-23,667
ของแข็งละลาย (mg/l)	26,000-45,300
ไนเตรท (mg/l- NO_3^-)	27-62
ฟอสเฟต (mg/l- PO_4^{3-})	83-133

ที่มา: รอยพิมพ์ (2549)

ตารางที่ 2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานผักกาดเขียวปลีตอง

พารามิเตอร์	คุณลักษณะน้ำเสีย
พีเอช	4.5
ซีโอดี (mg/l)	5,800
บีโอดี (mg/l)	2,145
การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	85,500
ของแข็งละลาย (mg/l)	56,400

ที่มา: สุภาวดี และคณะ (2557)

ความเค็มของน้ำ (Salinity)

ความเค็มของน้ำ คือ ปริมาณของสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ โดยเฉพาะโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีหน่วยเป็น ppt หรือ กรัมต่อลิตรความเค็มของน้ำ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพของแหล่งน้ำนั้น ๆ การวัดความเค็มของน้ำนั้นจะใช้วิธีคำนวณจากพารามิเตอร์ ที่มี ความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเกลือแร่ในน้ำ ได้แก่ คลอไรด์ การนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นต้น นอกจากนี้ความเค็มยังมีผลกระทบต่อพืช จะทำให้เกิดผลกระทบต่อรากพืชไม่สามารถดูดน้ำไปเลี้ยงลำต้นได้ ใบพืชจะแห้งไหม้ และตาย โดยประเภทน้ำตามระดับความเค็มมีดังนี้ ความเค็มระหว่าง 0 – 0.5 ppt จัดว่า เป็นน้ำจืด (Fresh water) ความเค็มระหว่าง 0.5 – 30 ppt จัดว่าเป็นน้ำกร่อย (Brackish water) และความเค็มมากกว่า 30 ppt ขึ้นไปเป็นน้ำเค็ม (Sea water) (กรมชลประทาน, 2558)

2.3.1. ผลกระทบจากน้ำที่มีความเค็มสูง มีดังต่อไปนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2565)

- 1.ผลกระทบต่อการผลิตน้ำประปา ทำให้แหล่งน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาลดลงโดยองค์การอนามัยโลกได้กำหนดค่าแนะนำสำหรับน้ำบริโภคให้มีไอโอดีนไม่เกิน 200 mg/l และ คลอไรด์ไม่เกิน 250 mg/l
- 2.ผลกระทบต่อสุขภาพ โดยเฉพาะกลุ่มเสี่ยงได้แก่ เด็ก ผู้ป่วย ผู้สูงอายุ โดยองค์การอนามัยโลก กำหนดการบริโภคโซเดียมไม่เกินวันละ 2000 mg หากเกินจะก่อให้เกิดโรคหรือส่งผลกระทบต่อร่างกาย
- 3.ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำ ทำให้คุณภาพแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทั้งการเติบโต การขยายพันธุ์ อาจส่งผลให้ความหลากหลายทางชีวภาพลดลง
- 4.ผลกระทบต่อการเกษตร ทำให้การปลูกพืช ไม้ผล ไม้ยืนต้นต่างๆ มีผลผลิตลดลงเป็นโรคเช่น ใบไหม้ ใบเหลือง หรือแสดงอาการ เช่น ต้นเหี่ยวเฉา สลัดลูกร่วงทิ้ง

2.4 ผลกระทบของความเค็มต่อพืช

ดินเค็มหรือสภาพที่มีความเค็ม ความเค็มที่เกิดจากการสะสมเกลือที่ละลายง่ายในความเข้มข้นที่สูงมาก จะทำให้การเจริญเติบโตของต้นพืชนั้นลดลง เช่น การงอกเมล็ด การพัฒนาของต้น และระยะเวลาเจริญพันธุ์ โดยความเค็มของดินมีผลเสียต่อพืช 4 ข้อดังนี้ (Ganie et al., 2019)

1) ความเป็นพิษของไอออน

- โซเดียมไอออนเข้าไปก่อกวนโดยเข้าไปแทนที่ในกระบวนการทางชีวเคมีของโพแทสเซียมไอออนในเซลล์ ซึ่งต้องการโพแทสเซียมเท่านั้น
- โซเดียมและคลอไรด์ที่สูงขึ้นในเซลล์ ทำให้โครงสร้างของโปรตีนผิดเพี้ยนไป ทำให้ไม่สามารถทำงานได้

2) ขาดธาตุอาหาร

โดยเฉพาะ โพแทสเซียม ซึ่งเซลล์รากดูดได้น้อยลง ส่งผลให้พืชขาดธาตุอาหารหรับใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ที่สำคัญของโพแทสเซียมโดยตรง เช่น เป็นโคแฟกเตอร์หรือปัจจัยร่วมเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์หลายชนิด ทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ เหล่านั้นลดลง

3) ความเครียดออสโมติก (Osmotic stress)

เกิดจากการสะสมโซเดียมไอออนและ คลอไรด์ไอออนในผนังเซลล์ เป็นเหตุให้เซลล์ราก ดูดน้ำได้น้อยลง พืชทนเค็มที่รอดพ้นจากปัญหานี้ ได้เพราะสามารถปรับออสโมซิส (osmotic adjustment) โดยการสะสมไอออนทั้งสองนี้และ ไอออนอื่นในเซลล์รากโดยไม่เป็นพิษ และดูดน้ำได้โดยไม่เป็นอันตราย

4) ความเครียดจากออกซิเดชัน (Oxidation stress)

เกิดจาก เซลล์สะสมโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออน มากจนเป็นพิษ เนื่องจากทำให้สมดุลของ เมทบอลิซึมในเซลล์เสียไป เช่น ลดการตรึง คาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และมีผลกระทบต่อกระบวนการที่มีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในส่วนอื่น ๆ ของเซลล์ทำให้เกิด ROS (Reactive oxygen species) ปริมาณมากขึ้น ได้แก่ อนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

อาการและผลกระทบบของพืชเมื่อได้รับความเค็มที่แตกต่างกันไปของพืชแต่ละชนิด บางชนิดใบจะไหม้ไปเป็นสีน้ำตาล ใบจะเหี่ยวจากปลายใบ (Chlorosis) ความชื้นในใบลดลง มีการสะสมโซเดียมในใบมากขึ้น ทำให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติในการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ เกิดการไหลของน้ำออกเซลล์ (Plasmolysis) นอกจากนี้ เนื่องจากความเข้มข้นเกลือสูงขึ้น ทำให้ปากใบแคบและการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงแล้ว ยังทำให้พืชเกิดอาการขาดน้ำ เนื่องจากความเครียดออสโมติก ซึ่งแปรผันตามความเค็ม ทำให้พืชดูดน้ำได้น้อยลงทำให้เกิดอาการขาดน้ำในที่สุดอีกทั้งยังส่งผลต่อความไม่สมดุลของธาตุอาหารอื่นๆ เนื่องจากพืชมีการดูดธาตุบางชนิดมากเกินไปจนเกิดความเป็นพิษ หรือไม่สามารถดูดธาตุที่เป็นประโยชน์เข้าไปได้จึงมีอาการขาดธาตุอาหาร (อรุณี และสมศรี, 2542)

2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetlands)

พื้นที่ชุ่มน้ำหรือบึง (Wetlands) หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินในระยะเวลาานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอิมตัวด้วยน้ำไว้ได้โดยทั่วไปความลึกของน้ำในบึงจะมีระดับแตกต่างกันไป โดยปกติจะมีค่าน้อยกว่า 0.6 m. และน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในพืชที่ขึ้นกันอยู่หนาแน่น โดยพืชสวนใหญ่ที่ พบในบึงต้องเป็นพืชที่ทนต่อสภาพน้ำท่วมขังได้ เช่น กก ธูปฤๅษี หรือหญ้าแฝก เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนพลังงานและสารอาหารระหว่างดวงอาทิตย์กับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยภายในบึง อีกทั้งบึงยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีความหลากหลายทางชีวภาพและ สามารถรักษาสมดุลให้กับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วการใช้บึงในธรรมชาตินั้นการบำบัดน้ำเสียจะมีรูปแบบการไหลในแนวนอน โดยแอ่งน้ำธรรมชาติจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้โดยใช้ กระบวนการกรอง การตกตะกอน การดูดซับสารอาหารของพืชและการย่อยสลายโดย จุลินทรีย์ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบแอ่งน้ำธรรมชาติได้แสดงไว้ดัง ตารางที่ 3 (Kootatet et al., 2002)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของแ่งน้ำธรรมชาติ

พารามิเตอร์	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด
สารอินทรีย์	70-96
ของแข็งแขวนลอย	60-90
ไนโตรเจน	40-90

ที่มา: Koottatep et al. (2002)

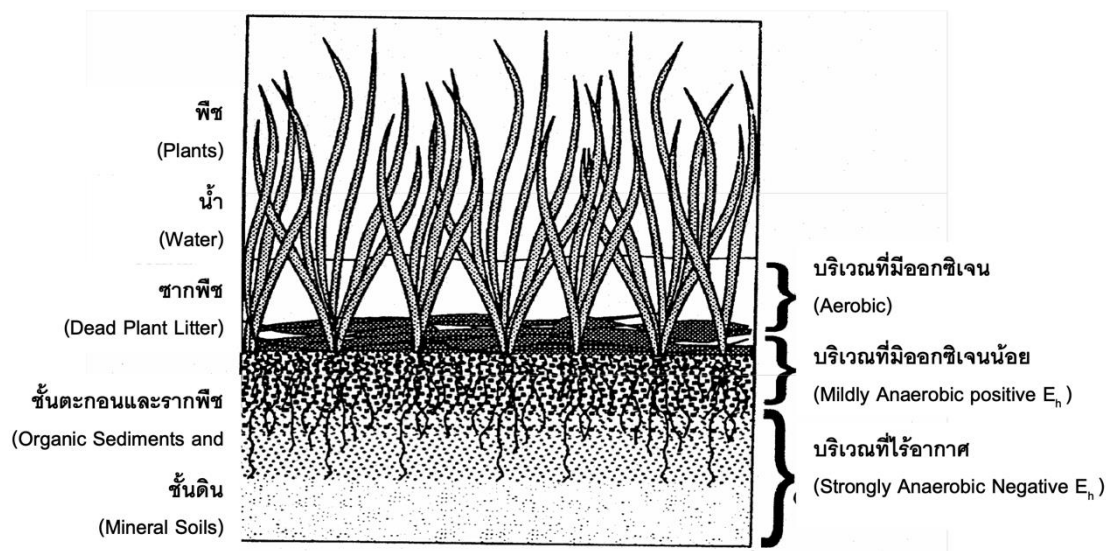
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ คือ ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะเลียนแบบกลไกการกำจัดของเสียตามธรรมชาติ โดยมีการใช้ ดิน น้ำ พืช และจุลินทรีย์ในการบำบัด ซึ่งมีการออกแบบและการใช้งานที่ไม่ยุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายที่ถูกลง ระบบมีความยืดหยุ่นสูงและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและภาระบรรทุกได้ดี (Metcalf and Eddy., 1991) เป็นพื้นที่ที่มีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินเป็นระยะเวลานานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอึดตัวของน้ำภายใต้ระดับความลึกที่แตกต่างกันและน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในบริเวณพีชขึ้นกันอยู่หนาแน่น ซึ่งในปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เป็นที่นิยมและน่าสนใจเนื่องจากเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้างการควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาระบบค่อนข้างต่ำ

การสร้างระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ จะช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดจากการใช้บึงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียได้ และนอกจากนี้ยังสามารถออกแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จะมีความแตกต่างกันกับบึงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติคือ บึงตามธรรมชาตินั้นจะมีข้อจำกัดว่าแหล่งกำเนิดน้ำเสียที่ต้องการบำบัดจะต้องตั้งอยู่ใกล้กับบึง แต่สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้นสามารถสร้างได้ในหลากหลายพื้นที่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพการทำงานได้มากกว่าบึงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากันเนื่องจากจะมีการปรับระดับดินที่พื้นบ่อและ มีการควบคุมระบบการไหลของระบบน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานต่างๆ ภายในบ่อได้ตามความต้องการ โดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบของระบบได้มากกว่าบึงธรรมชาติ (นเรศ, 2557)

โดยองค์ประกอบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland component) มีดังต่อไปนี้

1. ชั้นกรอง (Substrate)

ชั้นกรองในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติ ได้แก่ กรวด หิน และทราย ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไป ช่องว่างในชั้นกรองนั้นเป็นพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบต่างๆ และเป็นช่องทางไหลของน้ำและเป็นที่อยู่อาศัยของพืชและที่ยึดเกาะสำหรับจุลินทรีย์ อีกทั้งชั้นกรองยังเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบต่าง ๆ อีกด้วย โดยลักษณะทางกายภาพของชั้นกรองนั้นก็มีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสียด้วย อาทิ เช่น กรวดหรือทราย นิยมนำมาใช้เป็นชั้นกรอง เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่และไม่ก่อให้เกิดการอุดตันกับระบบและพืชยังสามารถยึดเกาะได้ง่ายอีกด้วย โดยชั้นกรองของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบ่งออกเป็น 3 ระดับตามปริมาณออกซิเจนในแต่ละชั้น ได้แก่ บริเวณที่มีออกซิเจน (Aerobic) บริเวณที่มีออกซิเจนปริมาณน้อย (Mildly anaerobic) และ บริเวณที่ไร้อากาศ (Strongly anaerobic) ดังภาพที่ 2 (นเรศ, 2557)



ภาพที่ 2 ระบบชั้นกรองในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์
ที่มา: นเรศ (2557)

2. จุลินทรีย์ (Microorganisms)

จุลินทรีย์ที่พบในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์มีด้วยกันหลากหลายชนิด เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย โปรโตซัว ซึ่งภายในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นี้สามารถแบ่งชนิดของจุลินทรีย์ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ จุลินทรีย์ชนิดแขวนลอย ซึ่งจะเจริญเติบโตและอาศัยอยู่บนผิวน้ำ เป็นจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศหรือออกซิเจนในการดำรงชีพ และ จุลินทรีย์ชนิดยึดเกาะติดตัวกลาง ซึ่งมักจะอยู่ในบริเวณที่จมในน้ำของพืช เช่น ราก ลำต้น ดิน ทราวย หรือเกาะตัวกลาง อีกทั้งยังพบว่ายังมีการสะสมในชั้นตะกอนด้านล่างของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์อีกด้วย โดยจุลินทรีย์พวกนี้ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวช่วยในการสร้างเซลล์ และเป็นแหล่งพลังงานหลักในการดำรงชีวิต (Stottmeister et al., 2003) นอกจากนี้ถ้าต้องการให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้เต็มที่ จะต้องจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย เช่น ประมาณออกซิเจนละลายน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น

3. พืช (Plants)

พืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จะสร้างสภาพแวดล้อมให้กับจุลินทรีย์โดยที่ใบ และ ลำต้นพืชช่วยในการชะลอความเร็วน้ำทำให้เกิดการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยรวมไปถึงเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ และในส่วนของใบลำต้นและรากพืชนั้นยังสามารถนำออกซิเจนจากอากาศลงสู่รากจึงทำให้บริเวณรอบๆรากพืชมีออกซิเจนสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายและทำให้แบคทีเรียประเภทไนตริฟายอิง (Nitrifying bacteria) มีการเจริญเติบโตดี และสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และเมื่อพืชเจริญเติบโตและตายลง จะทับถมบนดินทำให้เกิดชั้นของซากอินทรีย์วัตถุซึ่งเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์และเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับจุลินทรีย์อีกด้วย นอกจากนี้พืชยังสามารถดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพื่อไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อีกด้วย (นเรศ, 2557) โดยพืชที่นิยมใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้น ได้แก่ พืชใต้น้ำ (Submerged plant) พืชโผล่พ้นน้ำ (Emerged plant) พืชลอยน้ำ (Floating plant) และพืชชายน้ำ (Marginal Plant) โดยในปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นิยมใช้พืชโผล่พ้นน้ำ เช่น ฐฤกษ์ กก อ้อ หญ้าแฝก คล้าน้ำ เป็นต้น โดยหน้าที่ของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้น แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 หน้าที่ของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	ลดความเข้มข้นของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช ลดความเร็วลมเพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน ช่วยให้ระบบดูสวยงาม สะสมสารอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	กรองตะกอนขนาดใหญ่ เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของเมือกจุลินทรีย์ ลดความเร็วกระแสน้ำเพิ่มอัตราการตกตะกอนลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ ปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสงช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในตัวกลางใต้น้ำ	กรองตะกอนขนาดใหญ่-เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของเมือกจุลินทรีย์ ลดความเร็วกระแสน้ำเพิ่มอัตราการตกตะกอนลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ ปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสงช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน ดูดซับสารอาหาร ปล่อยสารปฏิชีวนะ

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2563)

2.5.1 ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์และกลไกการบำบัดน้ำเสียในระบบ

ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้นโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆได้แก่

1. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน (Free-water surface constructed wetland: FWSCWs)

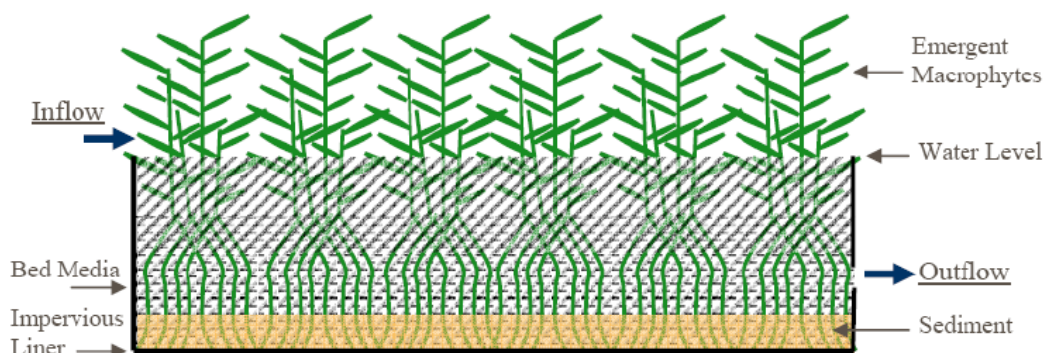
ระบบนี้ประกอบด้วยร่องยาวหรือพื้นดินมีตัวกลางเพื่อช่วยให้พืชสามารถยึดเกาะและพืชเจริญเติบโตได้ ดัง ภาพที่ 3 ตัวกลางที่ใช้อาจเป็นหินหรือหินบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-15 cm. กรวดและดิน อย่งใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน (นเรศ, 2557) น้ำเสียที่ไหลผ่านด้านข้างหรือไหลในแนวนอนของตัวกลางจะทำให้น้ำเสียถูกบำบัดในระหว่างสัมผัสกับผิวน้ำของตัวกลางและส่วนรากของพืชบริเวณใต้ชั้นกลางจะอิมตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศขึ้น แต่พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยังส่วนรากทำให้จุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ สามารถเจริญเติบโตใน ส่วนรากพืชได้ ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าการะปือติอยู่ในช่วง 5 – 100 mg/l (U.S.EPA, 2000a)

ข้อดี:

- มีค่าก่อสร้างระบบน้อยกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวน้ำชั้นกรองในแนวนอนและแนวตั้ง
- เป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย
- ไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป
- เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่าง ๆ

ข้อเสีย:

- ใช้พื้นที่มากและมีเวลาเก็บกักที่นาน
- เมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสสูง
- มีข้อจำกัดในการกำจัดฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Fecal coliform)



ภาพที่ 3 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน
ที่มา: Weber and Legge (2008)

2. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

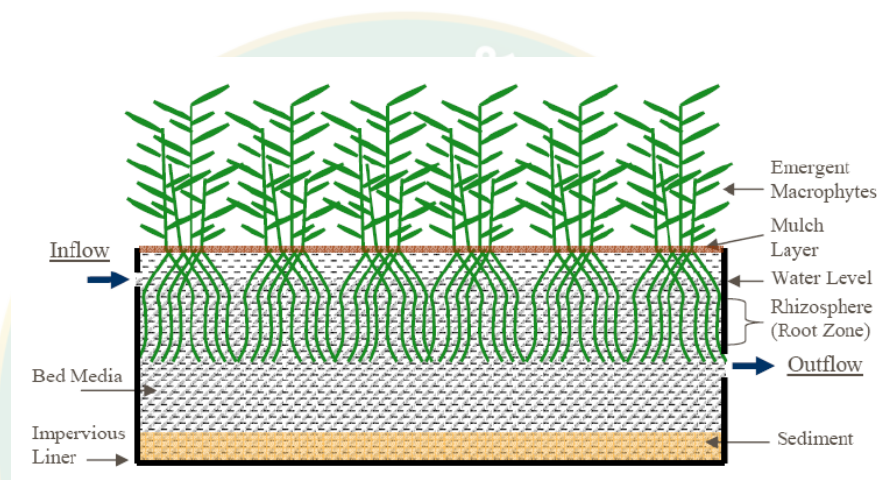
การไหลตามแนวนอน (Horizontal subsurface flow constructed wetlands: HSCWs) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบนี้จะมีการออกแบบให้ชั้นที่ปลูกพืชเป็นรูปสี่เหลี่ยม และจะปลูกเป็นแนวเพื่อเป็นผนังป้องกันการซึมผ่านกลไกการบำบัดของระบบคือจะปล่อยน้ำเสียไหลเข้าไป ซ้ำๆ ผ่านตัวกรองที่อยู่ใต้ผิวของชั้นหินจนกระทั่งถึงบริเวณทางออก ในระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่านรากพืช และชั้นหิน น้ำเสียจะสัมผัสกับบริเวณที่เป็นแอโรบิก (Aerobic) แอนอกซิก (Anoxic) และแอนแอโรบิก (Anaerobic) ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่ภาระสารอินทรีย์ปานกลาง โดยมีความเข้มข้นของบีโอดีอยู่ ในช่วง 30 – 175 mg/l โดยระบบจะมีลักษณะดังภาพที่ 4 (U.S.EPA, 2000b)

ข้อดี:

- เป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย และไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป
- สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้มากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวดิน ชั้นกรองอย่างอิสระและมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่า

ข้อเสีย:

- เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงและยุง
- นอกจากนี้ระบบยังมีค่าก่อสร้างที่สูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ
- มีข้อจำกัดในการบำบัดไนโตรเจนเพราะกระบวนการ ไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้ยากถ้าบางพื้นที่ในระบบมีสภาพไร้ออกซิเจน



ภาพที่ 4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ดินในแนวนอน
ที่มา: Weber and Legge (2008)

การไหลตามแนวตั้ง (Vertical subsurface constructed wetland, VSFCWs)

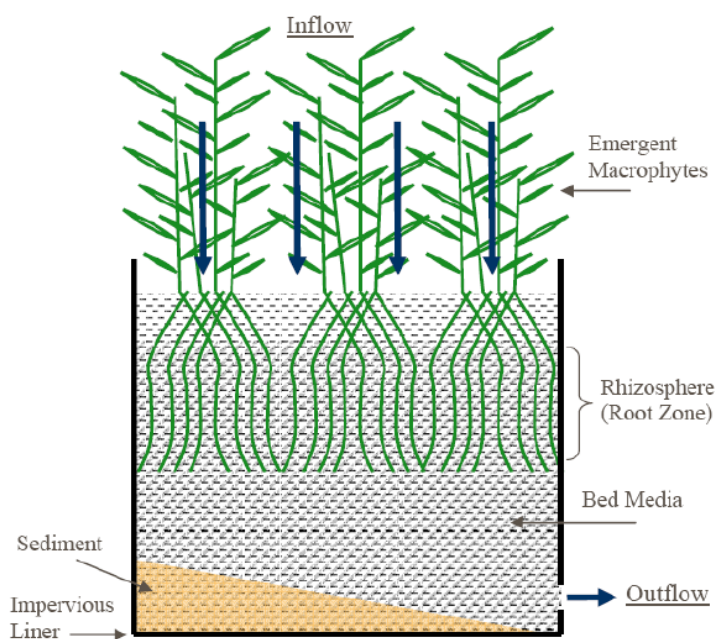
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ประกอบด้วยชั้นตัวกลางหลายชั้น ซึ่งอาจมีขนาดต่างกัน มีการกระจายน้ำเข้าทั่วบริเวณผิวหน้าชั้นตัวกลางและมีระบบที่รับน้ำออกอยู่ใต้ผิวชั้นตัวกลาง น้ำเสียจะเข้าระบบเป็นครั้งคราว (Intermittent Loading) เพื่อให้เกิดสภาพมีอากาศในช่วงหยุดเติมน้ำเสียโดยอากาศจะแพร่ผ่านเข้าไปในช่องว่างของชั้นตัวกลางจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ที่ตัวกลางและรากพืชจะทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ (นเรศ, 2557) ระบบนี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีภาระสารอินทรีย์สูงๆ เช่น สิ่งปฏิกูล ได้ โดยมีความเข้มข้นของบีโอดีที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 500 – 70,000 mg/l (U.S.EPA, 2000c) โดยการเดินระบบเป็นการทำให้เกิดสภาพมีอากาศและไม่มีอากาศสลับกัน เพื่อไปกระตุ้นให้เกิดไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การดูดซับ ฟอสฟอรัส (P-adsorption) ตามลำดับ โดยระบบจะมีลักษณะดังภาพที่ 5

ข้อดี:

- ระบบที่ง่ายต่อการควบคุมดูแลและบำรุงรักษา ระบบมีเสถียรภาพในกรณีที่มีความแปรปรวนของสภาวะแวดล้อม
- อาจเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตก่อให้เกิดความหลากหลายทางชีวภาพขึ้นได้

ข้อเสีย:

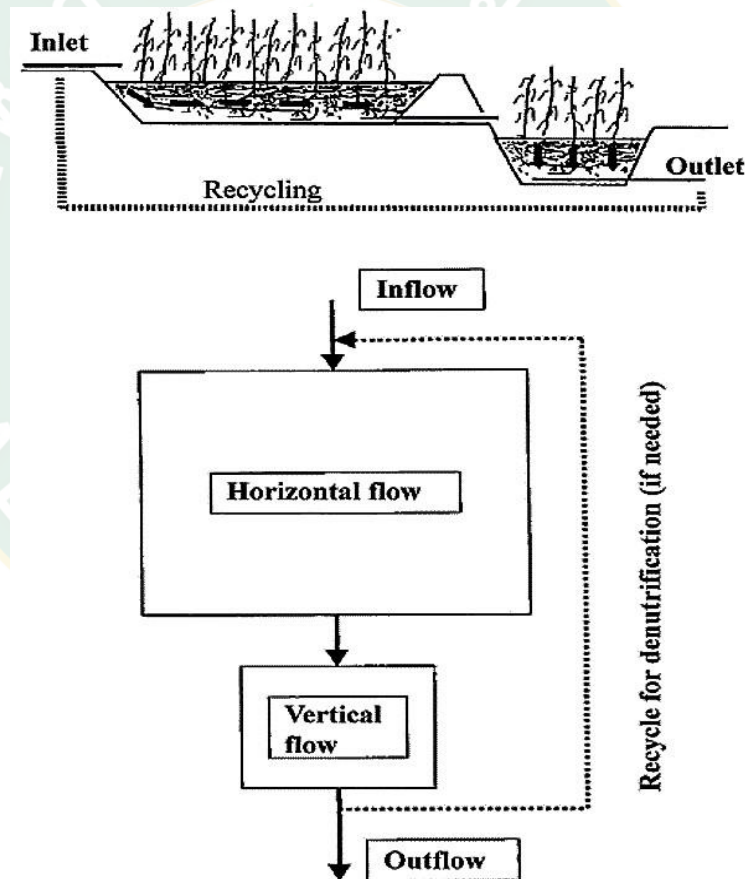
- ปัญหาการเหี่ยวและร่วงโรยของพืชในระยะเริ่มต้นของการเดินระบบในกรณีที่ใช้ระบบในการบำบัดสิ่งปฏิกูลซึ่งความเข้มข้นสูง



ภาพที่ 5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวตั้ง
ที่มา: Weber and Legge (2008)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน (Hybrid system or Combined system)

ปัจจุบันมีได้มีการนำ เาาระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่กล่าวมาข้างต้น มาใช้ร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด โดยเฉพาะการกำจัดไนโตรเจน โดยนำข้อดีของการไหลแบบแนวตั้ง และการไหลแนวราบมาใช้ร่วมกัน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเกิดไนตริฟิเคชันดีในแบบการไหลแนวตั้งและเกิดดีไนตริฟิเคชันในแบบการไหลแนวราบ จึงสามารถลดไนโตรเจนได้มากขึ้นกว่าระบบเดียว โดยระบบผสมผสานนี้ให้ค่า บีโอดี ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบผสมผสานนี้มีค่าไนโตรเจนทั้งหมดต่ำมาก (Vymazal, 2007) โดยระบบจะมีลักษณะดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน
ที่มา: Vymazal (2007)

2.5.2 รูปแบบการไหลของน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์สามารถออกแบบให้ใช้กับการไหลแบบใดแบบหนึ่งหรือหลายแบบ คือ

- การไหลแบบตามกัน (Plug Flow)
- การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบแบบเป็นขั้น (Step Feed)
- การหมุนเวียนน้ำแบบกลับไปยังจุดเริ่มต้นใหม่ (Recirculation)

1. การไหลแบบตามกัน (Plug-Flow)

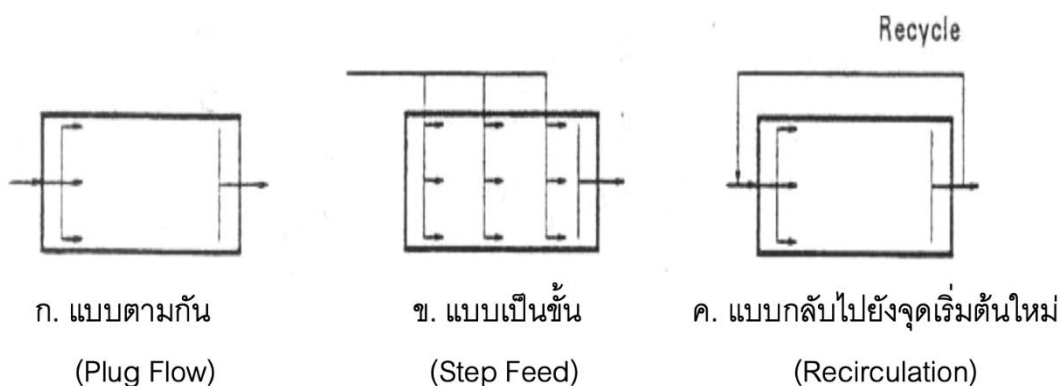
ปัจจุบันใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน การไหลแบบนี้ นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ขนาดเล็กและมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไม่มากนัก มีค่าก่อสร้าง การใช้พลังงาน และการควบคุมดูแลรักษาค่อนข้างต่ำ (ภาพที่ 7 ก)

2.การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบแบบเป็นขั้น (Step Feed)

เติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบแบบเป็นขั้น จะมีผลในการกำจัดของแข็งได้ดีกับระบบไหลแบบแนวตั้ง การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบแบบเป็นขั้นนี้สามารถทำควบคู่ไปกับการสูบน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับเข้าสู่ระบบ(Recirculation) การเติมน้ำเสียแบบนี้นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีความยาวต่อความกว้าง มากกว่า 10 : 1 น้ำเสียที่เข้าระบบมีการกระจายอย่างทั่วถึง แต่ข้อจำกัดคือ ใช้งบประมาณในการก่อสร้างสูง (ภาพที่ 7 ข)

3.การหมุนเวียนน้ำแบบกลับไปยังจุดเริ่มต้นใหม่ (Recirculation)

เป็นระบบที่มีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้าสู่ระบบใหม่ การสูบน้ำบำบัดแล้วกลับไปยังระบบอีกครั้งจะช่วยเจือจางปริมาณสารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยที่เข้ามาในระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด อีกทั้งยังสามารถช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่น เพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และมีระยะเวลาที่เก็บน้ำมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน แต่จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงในการก่อสร้าง และดูแลรักษาระบบ เพื่อควบคุมปริมาณน้ำและการพักน้ำ (ภาพที่ 7 ค)



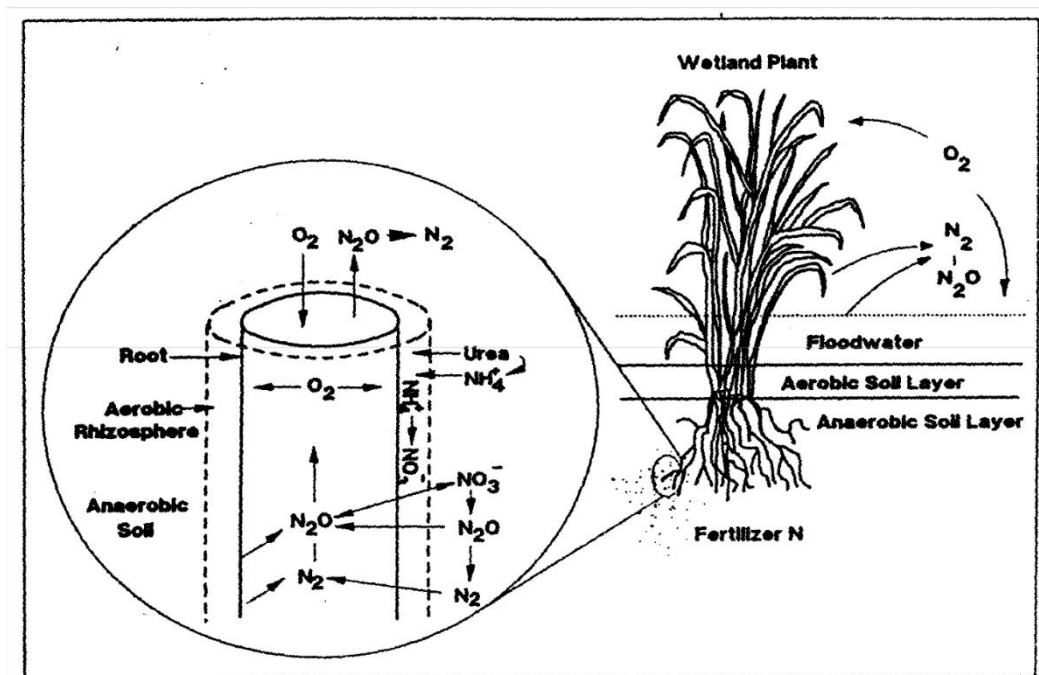
ภาพที่ 7 ชนิดรูปแบบการไหลของน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2563)

2.5.3 พืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Plants in CWs)

พืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและเห็นเด่นชัดสำหรับชนิดของพืชน้ำที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภท ได้แก่ พืชใต้น้ำ (Submerged plant) พืชโผล่พ้นน้ำ (Emergded plant) พืชลอยน้ำ (Floating plant) และ พืชชายน้ำ (Marginal plant) แต่ในปัจจุบันนี้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นิยมใช้พืชโผล่พ้นน้ำในการบำบัดน้ำเสียมากกว่าการใช้พืชลอยน้ำเนื่องจากพืชลอยน้ำไม่สามารถทนกับอากาศและศัตรูพืชได้ (นเรศ, 2557)

1.หน้าที่ของพืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

หน้าที่หลักคือ การลำเลียงออกซิเจน (ภาพที่ 8) ระบบรากพืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จะเจริญเติบโตอยู่ในชั้นดินหรือแทรกตัวเข้าไปในชั้นกรองที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิวประมาณ 50 - 150 cm. โดยออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบและลำเลียงออกซิเจนซึ่งใช้หลักการแพร่ (Diffusion) และการไหลพาของอากาศ (Convective) ลงไปยังระบบราก ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ดีกว่าการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (กรมควบคุมมลพิษ, 2563) รวมไปถึงผลทางกายภาพและอื่นๆ ดังนี้



ภาพที่ 8 การลำเลียงออกซิเจนในต้นพืช

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2563)

1.1 ทางกายภาพ (Physical)

ความหนาแน่นของต้นพืชจะช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำ ทำให้การตกตะกอนทำได้ดีขึ้น และลดอัตราการพังทลายของหน้าดิน การฟุ้งของตะกอน และเพิ่มการสัมผัสของน้ำเสียกับจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่กับพืช อีกทั้งพืชยังช่วยปกคลุม ลดความเข้มข้นของแสง และอุณหภูมิอีกด้วย

1.2 สภาพการนำทางชลศาสตร์ของดิน (Soil hydraulic conductivity)

การไหลของน้ำในบึงของระบบไหลผ่านในแนวราบจะไหลไปตามร่องที่เกิดจากการร่อนไถของราก และไหลผ่านช่องว่างระหว่างดิน เมื่อรากและลำต้นไถดินตายและเกิดการย่อยสลาย อาจเหลือลักษณะเป็นโพรงหรือร่องซึ่งเพิ่มความเสถียรของ สภาพการนำทางชลศาสตร์ของดิน (Vymazal, 2007) ลักษณะโครงสร้างของโพรงที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและสภาพของการเติบโตของพืช

1.3 เป็นพื้นที่สำหรับยึดเกาะของจุลินทรีย์

ส่วนใบหรือลำต้นของพืชที่อยู่ใต้น้ำจะเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ โดยเนื้อเยื่อของพืชจะมีสาหร่าย จุลินทรีย์ หรือโปรโตซัว เกาะอยู่หนาแน่น เช่นเดียวกับรากและลำต้นใต้ดิน นอกจากนี้ยังมีไบโอฟิล์ม (Biofilm) ที่เกาะกับซากพืชที่ตายแล้ว ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

1.4 การดูดซับสารอาหาร

พืชมีความสามารถดูดสารอาหารจำนวนมากทางราก โดยพืชนั้นจะดูดซับสารอาหารไว้และจะถูกกำจัดออกไปจากระบบโดยการเก็บเกี่ยว ซึ่งพบว่ามีประมาณ 30-150 kg-P/(m³/y) และ 200-2500 kg-N/(m³/y) (Kataki et al. 2021) อย่างไรก็ตาม พบว่าปริมาณสารอาหารที่ถูกกำจัดจากการเก็บเกี่ยวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบในน้ำเสีย ถ้าระบบไม่มีการเก็บเกี่ยวสารอาหารในพืชจะถูกปลดปล่อยออกมาในกระบวนการย่อยสลาย (ศุวกา, 2544)

การใช้สารอาหารของพืชจะถูกจำกัดโดยอัตราการเติบโตสุทธิ และความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อ โดยความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อมีค่าสูง โดยมากกว่า 25 g/kg เนื้อเยื่อ ในพืชที่มีอายุน้อย และลดลงเมื่อโตเต็มที่ (กรมควบคุมมลพิษ, 2563) ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและอัตราการนำไปใช้ของพืช

พืช	อัตราการนำไปใช้ (kg/m ³ /year)		ส่วนประกอบในเนื้อเยื่อ (g/kg)		อัตราการเติบโต (tons/m ³ /year)
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
ธูปฤๅษี	0.06 – 0.263	0.0075 – 0.0403	5-24	0.5-4	0.0008-0.0061
หญ้า	0.0125	0.0018	8-27	1-3	-
ทรงกระเทียม					
อ้อ	0.0225	0.0035	18-21	2-3	0.01-0.06

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2563)

2.5.4 กลไกการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Treatment Mechanisms of CWs)

กลไกการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้น มีทั้งทางด้าน กายภาพ เคมี และชีวภาพโดยจุลินทรีย์ กลไกเหล่านี้จะทำงานสัมพันธ์กัน ซึ่งประกอบไปด้วย การตกตะกอน (Sedimentation) การสะสมในดิน การสะสมในพืช และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) พืชในระบบกำจัดสารมลพิษ โดยตรงด้วยการออกซิโดซสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ในการสังเคราะห์แสง ซึ่งกระบวนการเหล่านี้อาจเกิดอย่างเป็นอิสระหรือเกิดมีผลต่อเนื่องกันได้ โดยกลไกการบำบัดที่สำคัญของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2563) อาทิเช่น

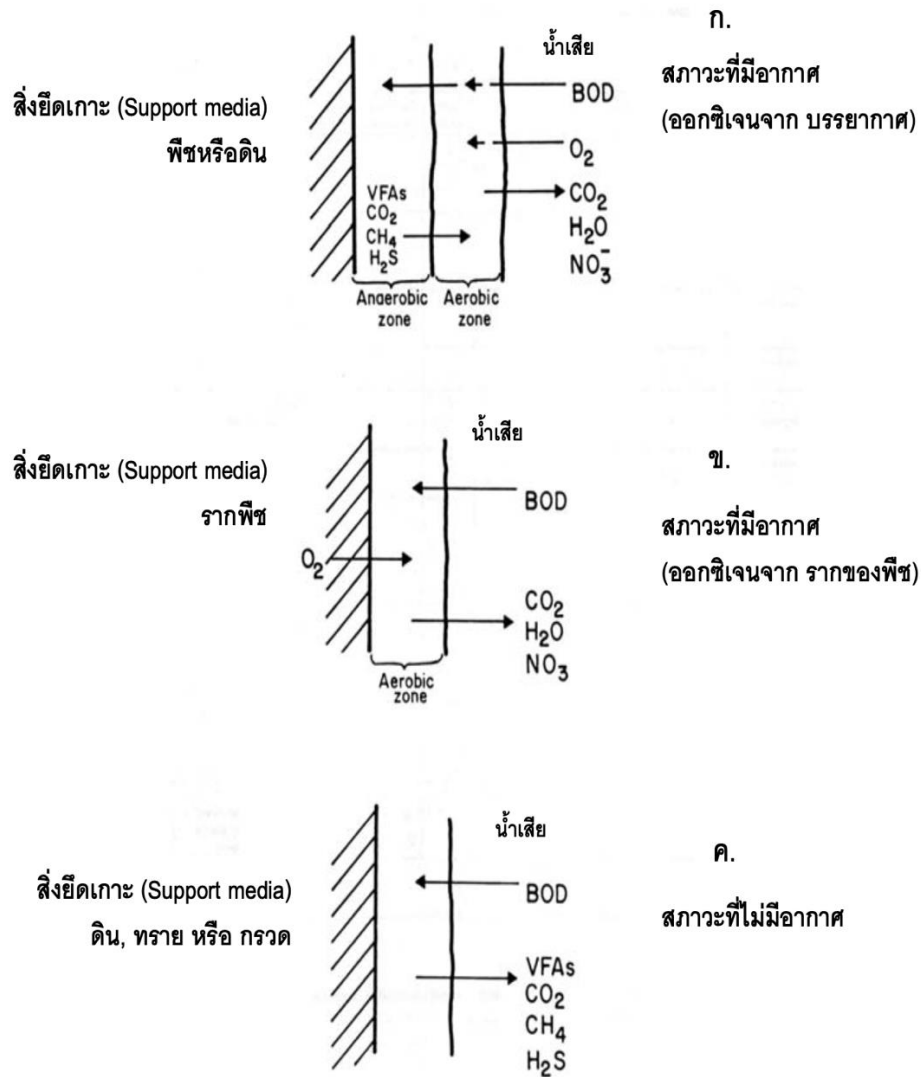
1.การกำจัดสารอินทรีย์ (Organic compounds removal)

สารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่ที่เป็นของแข็งจะตกตะกอน ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ ออกซิเจน และ ไม่ใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทตามแหล่งของคาร์บอนที่ใช้คือ จุลินทรีย์ในกลุ่มออโตโทรฟ (Autotrophs) ซึ่งใช้คาร์บอนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และ เฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ซึ่งใช้คาร์บอนในสารอินทรีย์และมีอัตราการย่อยสลายที่เร็วทำให้จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้เป็นส่วนสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย ในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) จะมีอัตราการย่อยสลายที่เร็วกว่าการย่อยสลายที่ไม่ใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายส่วนใหญ่จะเกาะอยู่กับผิวของของแข็ง ลำต้นและรากของพืช แต่ในส่วนของสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic) จะมีการสร้างมีเทน ซึ่งจะทำงานได้ดีในพีเอชช่วง 6.5-7.5 จุลินทรีย์จะรับออกซิเจนที่ส่งผ่านมาทางรากพืชและจากการแพร่ลงสู่ผิวดินดังนั้นความลึกของดินและความยาวของรากพืชจึงมีส่วนในการกำหนดลักษณะของการย่อยสลายที่จะเกิดขึ้น แต่สำหรับขบวนการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ทุกแบบ และจะขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำ

หลักในการกำจัดบีโอดีในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ ขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบและแหล่งออกซิเจนที่จะใช้ในปฏิกิริยาการกำจัดของเสียโดยจุลินทรีย์ ซึ่งได้มาส่วนหนึ่งจากการแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำ (Reaeration) และปริมาณออกซิเจนที่จะถูกลำเลียงผ่านไปยังส่วนรากของพืช โดยในภาพที่ 9 แสดงกลไกการกำจัดบีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (ภาพที่ 9 ก.) เป็นบริเวณใกล้ผิวน้ำซึ่งระบบมีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับ

บรรยากาศ เกิดขึ้นที่ส่วนของลำต้นพืชหรือชั้นกรงซึ่งเป็นบริเวณที่มีการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน โดยบีโอดีในน้ำเสียจะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนบริเวณรอบๆต้นพืชก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ต้นพืช และเกิดกระบวนการบำบัดโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (ภาพที่ 9 ข). แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณรากพืช เป็นบริเวณที่ใช้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งออกซิเจนส่วนใหญ่มาจากการแพร่กระจายจากบรรยากาศผ่านในต้นพืช และแพร่ออกทางรากของพืช และ (ภาพที่ 9 ค). แสดงกระบวนการบำบัดบริเวณชั้นกรงที่อยู่ลึกลงไปจากรากพืช เป็นบริเวณที่ใช้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสีย





ก.
สภาวะที่มีอากาศ
(ออกซิเจนจาก บรรยากาศ)

ข.
สภาวะที่มีอากาศ
(ออกซิเจนจากรากของพืช)

ค.
สภาวะที่ไม่มีอากาศ

ภาพที่ 9 กลไกการกำจัดบีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2563)

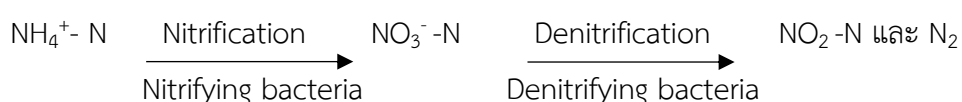
2.กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอย (Treatment mechanisms of suspended solids)

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสารแขวนลอยในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ คือสารแขวนลอยจะถูกกรองออกและตกตะกอนในช่วง 2-3 m. แรกจากทางน้ำเข้า เข้าสู่ระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับความนิ่งและความลึกของระดับน้ำ ในการควบคุมการกระจายน้ำเสียเข้าสู่ระบบ โดยพืชจะสามารถควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำให้ลดลง ได้ ซึ่งช่วยในการตกตะกอนได้เร็วขึ้น ของแข็งคอลลอยด์และของแข็งที่ไม่จมจะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ และการดูดซับกับสารอื่นๆ

3.กลไกการกำจัดไนโตรเจน (Treatment mechanisms of nitrogen)

การกำจัดไนโตรเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์มีหลายวิธี ซึ่งส่วนใหญ่จะกำจัดด้วย ปฏิกิริยานิตริฟิเคชัน (Nitrification) และ นิตริฟิเคชัน (Denitrification) ส่วนกลไกอื่นๆ เช่น การนำไปใช้ของพืช การระเหยในรูปของแอมโมเนีย เป็นต้น

ซึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ส่วนมากมักพบในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+ -N) และจะเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ในช่วงที่มีพีเอชและอุณหภูมิสูง กระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจน ไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_4^+ -N) เป็นขั้นแรก จากนั้นจะเกิดกระบวนการนิตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนไปเป็นไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) โดยมีไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_2^- -N) เป็นสารที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้ โดยแอมโมเนียไนโตรเจนจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทไนโตรเจน โดย Nitrifying bacteria ในบริเวณที่มีอากาศ และ ในบริเวณที่ไร้อากาศ กระบวนการดีนิตริฟิเคชัน (Denitrification) จะเกิดขึ้นทำให้ไนเตรทไนโตรเจนถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ไนโตรเจน และไนโตรเจนก๊าซ (N_2) และ ไนไตรท์ไนโตรเจนด้วย Denitrifying bacteria โดยสรุปได้ดังสมการต่อไปนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2563)



กลไกการกำจัดไนโตรเจน

4.กลไกการกำจัดฟอสฟอรัส (Treatment mechanisms of phosphorus)

การกำจัดฟอสฟอรัสในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้น มีไม่มากเพราะข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับดิน ทำให้กลไกหลักในการกำจัดฟอสฟอรัส คือ การดูดซึมฟอสฟอรัสเข้าไปในพืช และ ระยะเวลาที่น้ำเสียได้สัมผัสกับดิน ซึ่งในดินจะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ-ตกตะกอนโดย อะลูมิเนียม, เหล็ก, แคลเซียมและแร่ธาตุต่างๆในดิน (กรมควบคุมมลพิษ, 2563)

5.การกำจัดเชื้อโรค (Treatment mechanisms of pathogens)

เชื้อโรคส่วนใหญ่ได้แก่ หนองพยาธิ แบคทีเรีย และไวรัส โดยกลไกการกำจัดเชื้อโรคในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นั้น มีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ การกินกันและกัน การตกตะกอน การดูดซึม การตายธรรมชาติ (Natural die-off) การตกตะกอนและการกรอง การดูดซับโดยพืช การถูกทำลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดนั้นขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาที่เก็บและ อุณหภูมิ (กรมควบคุมมลพิษ, 2563)

6.การกำจัดโลหะหนัก (Treatment mechanisms of heavy metals)

โลหะหนักนั้นเป็นธาตุอาหารรองที่พืชนำไปใช้น้อยมาก ดังนั้นกลไกหลักในการกำจัดโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ คือ การตกผลึกของตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) และการดูดซับ (Absorption) ซึ่งการตกผลึกของตะกอนโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์สามารถ เกิดขึ้นได้หากมีการปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบให้มีสภาวะเป็นกลาง (กรมควบคุมมลพิษ, 2563)

2.5.5 เกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดิน

เกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินนั้นตัวแปรหลักที่สำคัญได้แก่ ระยะเวลาที่เก็บน้ำ ความลึกของน้ำ อัตราภาระ บีโอดี พื้นที่ และภาระทางศาสตร์ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดิน

พารามิเตอร์	หน่วย	แบบไหลผ่านใต้ดิน
เวลากักเก็บน้ำ	day	4-15
ความลึกของน้ำ	m.	0.10 – 0.60
อัตราภาระบีโอดี	kg./ha - d	≤67 (0.0067)
ภาระศาสตร์	m ³ /m ² .-d	0.014-0.047
พื้นที่	ha/1000 m ³ -d	2.14 – 7.16

ที่มา: Metcalf and Eddy (1991)

2.6 การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช (Phytoremediation)

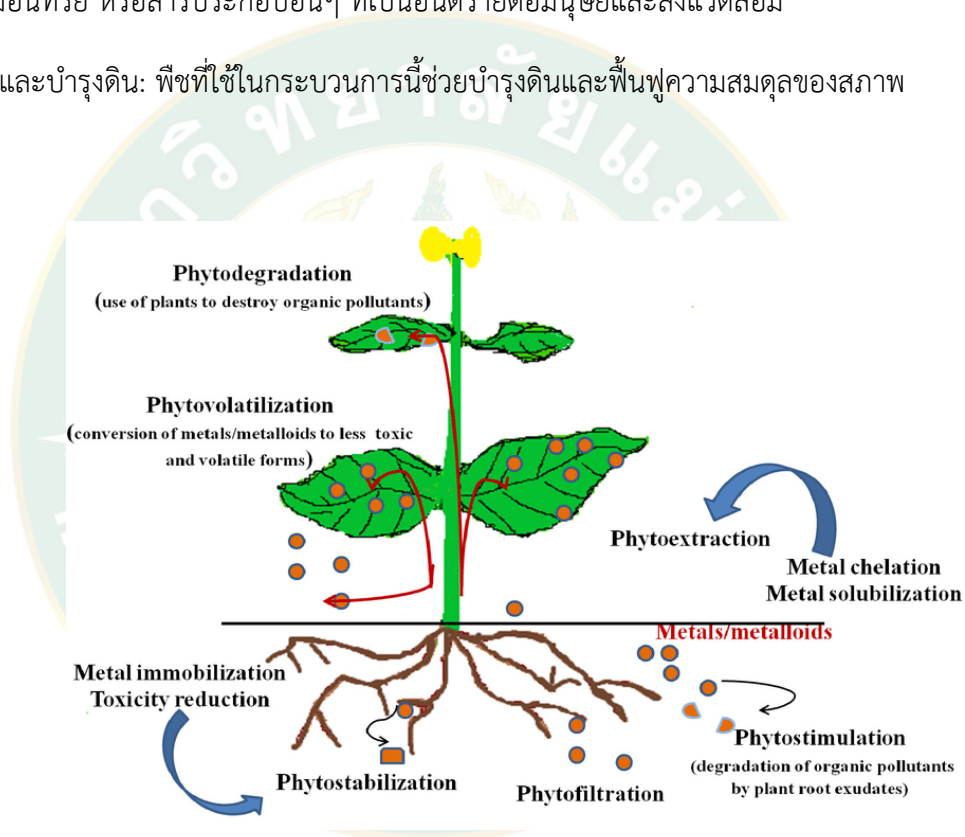
การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช คือ กระบวนการที่ใช้พืชในการบำบัดมลพิษในสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ดิน และ อากาศ ซึ่งโดยทั่วไปพืชจะมีการดูดซึมสารไปสะสมไว้ยังส่วนต่าง ๆ ของต้นพืช ได้แก่ ใบ ลำต้น และราก เป็นต้น โดยวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษที่มีต้นทุนต่ำ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย โดยพืชบำบัดสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันได้มีการจำแนกประเภทของการบำบัดออกเป็น 6 แบบ ดังภาพที่ 10 ซึ่งได้แก่

1. Phytoextraction คือ พืชทำการดูดซับสารหรือมลพิษขึ้นจากดินเข้าไปในรากของพืช จากนั้นจึงนำไปสะสมที่บริเวณยอดหรือรากพืช
2. Phytostabilization คือ พืชทำการดูดซับสารหรือมลพิษไว้ในรูปที่เคลื่อนที่ได้น้อย หรืออยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้ไม่ได้
3. Phytovolatilization คือ การทำให้ธาตุหรือสารประกอบของโลหะที่ระเหยได้ขึ้นมาจากดินด้วยวิธีคายน้ำ
4. Rhizofiltration คือ คือการใช้รากของพืชหรือมวลชีวภาพของพืชในการดูดซับสารพิษจากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน หรือที่เรียกว่าการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)
5. Phytodegradation คือ การที่พืชดูดซึมสารพิษเข้าไปในรากหรือลำต้นจากนั้นทำการย่อยสลายหรือเปลี่ยนแปลงด้วยเมตาบอลิซึม หรือเปลี่ยนเป็นสารที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้
6. Phytostimulation คือ รากของพืชได้ทำการหลั่งสารออกมาเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในดิน หรือเชื้อราบริเวณรากพืช ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารมลพิษได้ดีขึ้น

ซึ่งกระบวนการบำบัดด้วยพืชเหล่านี้เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยบำบัดและฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยธรรมชาติ (Shen et al., 2022)

สรุปได้ว่า การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช เป็นกระบวนการใช้พืชในการลดสารพิษหรือสิ่งสกปรกจากสภาพแวดล้อมให้เกิดการฟื้นตัวของสภาพแวดล้อมใหม่ โดยพืชที่ถูกใช้ในกระบวนการนี้ มักจะมีความทนทานต่อสารพิษ และสามารถสะสมและย่อยสลายสารพิษได้เอง การใช้พืชในการบำบัดสิ่งแวดล้อมมีข้อดีหลายประการ รวมถึงต้นทุนที่ต่ำกว่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่ต้องใช้กระบวนการที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก โดยประโยชน์หลักๆ มีดังนี้

1. ลดสารพิษ: พืชที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถดูดซับและสะสมสารพิษจากดินหรือน้ำ เช่น โลหะหนัก สารเคมีอินทรีย์ หรือสารประกอบอื่นๆ ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม
2. ฟื้นฟูและบำรุงดิน: พืชที่ใช้ในกระบวนการนี้ช่วยบำรุงดินและฟื้นฟูความสมดุลของสภาพ



ภาพที่ 10 การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมด้วยพืช
ที่มา: Ojuederie and Babalola (2017)

2.7 พืชทนเค็มและกลไกของพืชทนเค็ม (Halophyte and mechanisms)

พืชทนเค็ม (Halophyte) คือ พืชที่มีสามารถในการเจริญเติบโตและสามารถอยู่รอดและครบวงจรชีวิตได้ในระดับความเค็มที่สูง ประมาณ 200 mM NaCl หรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับสภาวะที่เหมาะสมในธรรมชาติ (Flowers and Colmer, 2008) และมีกลไกที่หลากหลายที่ช่วยให้ปรับตัวเข้ากับ ความเค็ม รวมถึงการควบคุมการดูดซึมของโซเดียม และการส่งถ่ายและการจัดสรรโซเดียมไปยัง ส่วนต่าง ๆ ของยอด เช่น ใบแก่ โดยการปล่อยเกลือบนผิวใบโดยใช้ต่อมเกลือ การสะสมของตัวถูกละลายอินทรีย์เพื่อลดความเครียดออสโมติก และกลไกการป้องกันสารต้านอนุมูลอิสระ โดย พืชทนเค็ม แบ่งออกเป็น 2 พวกหลักๆ คือ ไมโอฮาโลไฟต์ (Miohalophyte) ที่สามารถขึ้นได้ในความเค็มระดับน้ำกร่อย และ ยูฮาโลไฟต์ (Euhalophyte) ขึ้นได้ในความเค็มระดับน้ำทะเล พืชชนิดนี้จะทำการดูดซับเกลือเข้ามาสะสมในต้นเพื่อปรับความเข้มข้นสารละลายในเซลล์ ทำให้ สามารถดูดน้ำจากดินได้ อีกทั้งยังสามารถปลูกเพื่อเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่ดินเค็มได้ พืชทนเค็มบางชนิดเป็นพืชอวบน้ำ ซึ่งจะเป็นลักษณะที่พบโดยทั่วไปในพืชพวกพืชทนเค็ม หรือ บางชนิดมีกลไกการหลีกเลี่ยงเกลือ (Salt avoidance) ทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตในพื้นที่ดินเค็มจัดได้ โดยพืชจะไม่ยอมดูดเกลือเข้าไปหรือดูดเข้าไปแล้วพืชสามารถคายออกมาจากส่วนของรากได้ หรือ พืชสามารถขับเกลือที่ดูดเข้าไปออกมาจากต่อมเกลือ พืชบางชนิดอาจทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีเกลือความเข้มข้นสูงได้โดยไม่มี กิจกรรมเพื่อการเจริญเติบโตจนกว่าสภาพแวดล้อมจะเหมาะสม (อรุณี และสมศรี, 2539) โดยในตารางที่ 7 ได้กล่าวถึงระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อต้นพืชไว้ดังนี้

ตารางที่ 7 ระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อต้นพืช

ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	ระดับความเค็ม	การตอบสนองของพืชต่อความเค็ม
0- 2	ไม่เค็ม	ไม่มีผลกระทบต่อพืชหรือมีเล็กน้อย
2 – 4	เค็มน้อย	มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืชไม่ทนเค็ม
4 – 8	เค็มปานกลาง	มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8 – 15	เค็มมาก	พืชทนเค็มเท่านั้นจึงจะเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้
> 16	เค็มจัด	พืชทนเค็มสูงจึงจะเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้

ที่มา: de Vos et al. (2016)

2.8 พืชที่นำมาใช้ในการทดลอง

พืชทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ฐูปฤๅษี กกราชินี หญ้าแฝก และชะคราม ที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นพืชทนเค็มที่ผ่านการทดสอบจากงานวิจัยมาแล้วว่ามีแนวโน้มในการบำบัดได้ดีในสภาวะที่มีความเค็ม โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Mohammadi et al. (2019) พบว่า ต้นชะครามเป็นพืชทนเค็ม ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่มีเกลือได้ดี อีกทั้งยังทนต่อสภาพแวดล้อมที่เค็มจัดได้ดี และได้ถูกจัดอยู่ในพืชทนเค็มประเภทยูฮาโลไฟต์ โดยต้นชะครามเป็นพืชอวบน้ำ (Succulent) เกลือส่วนใหญ่ที่ดูดซับไปนั้นจะไปสะสมที่ตามลำต้นและใบและใช้น้ำเพื่อสลายความเป็นพิษของเกลือได้ (อรุณีและ สมศรี, 2539) โดย ต้นฐูปฤๅษี หญ้าแฝก และ กกราชินี นั้น Liang et al. (2017) ได้ระบุว่า เป็นพืชทนเค็มที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเค็มด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ โดยต้นฐูปฤๅษี มีความสามารถในการบำบัดไนโตรเจนได้ดี โดยงานวิจัยของ ศิริภรณ์ และคณะ (2555) ได้กล่าวว่า ต้นฐูปฤๅษีสามารถบำบัดไนโตรเจนได้สูงและทนความเค็มได้ในระดับความเค็มที่ 15 ppt หญ้าแฝกสามารถทนต่อความเครียดจากเกลือได้ระดับความเค็มที่ความเข้มข้นประมาณ 100 mM NaCl ได้รวมไปถึงหญ้าแฝกมีความสามารถสูงในการแยกโซเดียม และเก็บโพแทสเซียม ไว้ในใบได้ (Liu et al., 2016) และ กกราชินี สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 5-7.5 ส่วนอุณหภูมิ 16-26 °C และมีความสามารถทนต่อความเค็มได้สูงสุด 20 ppt (จรรยา, 2554) โดยงานวิจัยนี้จะใช้พืชดังต่อไปนี้ในการศึกษา

2.8.1 รูปฤๅษี



ภาพที่ 11 รูปฤๅษี

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Typha angustifolia* L.

ชื่อวงศ์ TYPHACEAE

ชื่อสามัญ lesser bulrush, narrowleaf cattail, lesser reedmace

ชื่ออื่นๆ กกรูป กกข้าง เพ็ญ ปรีอ หญ้าสลาบหลวง

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ต้นรูปทรงแบบไม้ล้มลุกที่พบได้ในเขตร้อนและเขตอบอุ่นทั่วไปในประเทศไทย มักพบโตเต็มต้นบริเวณหนองน้ำ โดยส่วนสูงของต้นอยู่ในช่วง 1.5-3 m. ลำต้นแข็งแรงและมีเหง้าแตกแขนงออกไปด้านข้าง ใบออกจากโคนลำต้นและมีกาบใบเรียงเวียนอยู่ในระนาบเดียวกัน ลักษณะของใบมีรูปร่างยาวประมาณ 50-120 cm. แผ่นใบเว้าตอไปยังเส้นกลางใบ ส่วนช่อดอกมีลักษณะเป็นช่อเชิงลดที่มีรูปทรงเป็นกระบอก ช่วงดอกเพศผู้มีความยาวประมาณ 8-40 cm. มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่ออยู่ระหว่าง 2-7 mm. ในช่วงดอกเพศเมียมีความยาวประมาณ 5-30 cm. และเส้นผ่านศูนย์กลางช่ออยู่ในขนาด 0.6-2 cm. ส่วนโครงสร้างของดอกประกอบด้วย 1-3 ใบประดับซึ่งร่วงระหว่างช่วงดอกเพศผู้และดอกเพศเมีย ในส่วนของเกสรเพศผู้ มักมีจำนวน 3 อันและมีขนล้อมรอบก้านชูอับเรณูโดยมีความยาวประมาณ 1.5-2 mm. ส่วนเกสรเพศเมียเป็นหลอดยาวประมาณ 1-1.5 mm. มีขนสั้น และยอดเกสรมีรูปร่างเป็นแถบ สุกทำยเมื่อผลแก่ขึ้นมาจะมีขนาดเล็กและไม่มีการติดดอกและกลีบเลี้ยง โดยมีรูปรีและห้อยลง และบนผลจะมีริ้วปรากฏออกมา(Simpson, 2008)

2.8.2 กกราชินี



ภาพที่ 12 กกราชินี

ชื่อวิทยาศาสตร์

Cyperus alternifolius L.

ชื่อวงศ์

CYPERACEAE

ชื่อสามัญ

Umbrella Plant, Umbrella Sedge

ชื่ออื่นๆ

กกร่ม กกลังกา กกริงกา กกราชินี

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ตระกูลกจัดอยู่ในกลุ่มที่อยู่ระหว่าง Euhalophyte และ Miohalophyte ซึ่งเป็นพืชที่โผล่พ้นน้ำได้ ลำต้นของกกราชินีสั้นและอยู่ใต้ดินเป็นเหง้า มีความสูงประมาณ 1.0-1.5 m. ก้านที่โผล่พ้นดินมีลักษณะกลมและมีสีเขียว จุดเด่นของกกราชินีคือใบที่เป็นเดี่ยวและเรียงอยู่เวียนสลับ กาบของใบมีลักษณะเป็นกาบกลมและเป็นร่ม ดอกของกกราชินีจะเกิดขึ้นจากโคนต้นตามซอกใบในรูปแบบของช่อดอกเล็ก ๆ ที่ซ้อนกัน ดอกมีขนาดเล็กและมีสีขาวที่อมเขียว และเมื่อต้นกกราชินีแก่จะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลอ่อน ก้านของช่อดอกมีสีเขียวอ่อนและมีใบประดับจำนวนมาก ช่อดอกย่อยของกกราชินีจะมีจำนวน 3-10 ช่อ มีรูปรีหรือรูปขอบขนาน ยาวประมาณ 3-9 mm. และมีความแบน โดยกาบของช่อดอกจะมีรูปรีหรือรูปไข่และมีสีเขียวอ่อนหรือมีแต้มสีน้ำตาล ยาวประมาณ 2 mm. ปลายของกาบจะแหลม และแกนกลางของช่อดอกจะมีรูปร่างเป็นเส้น ดอกของกกราชินีจำนวนมากและมีเกสรเพศผู้จำนวน 3 อัน และเกสรเพศเมียจำนวน 3 อัน สามารถพบกกราชินีในที่ที่มีน้ำขังริมลำคลองหรือบริเวณลุ่มชื้นแฉะทั่วไป และกกราชินีสามารถขยายพันธุ์ได้โดยใช้เมล็ดและการแตกกอ อีกทั้งกกราชินียังสามารถใช้เป็นสมุนไพรในการแก้ซำที่เกิดจากอวัยวะภายใน และใช้ในการรักษาแผลในปากได้เป็นต้น (จรียา, 2554)

2.8.3 ชะคราม



ภาพที่ 13 ชะคราม

ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Suaeda maritima</i> (L.) Dumort.
ชื่อวงศ์	CHENOPODIACEAE
ชื่อสามัญ	Sea Blite, herbaceous, seepweed
ชื่ออื่นๆ	ชั๊กคราม, ส่าคราม (สมุทรสาคร)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

สายพันธุ์นี้เป็นทั่วไปในพื้นที่น้ำเค็มในซีกโลกเหนือ และมีการเจริญเติบโตทั้งบนบกและในพื้นที่ชุ่มน้ำริมชายฝั่ง นอกจากนี้ยังมีการกระจายพันธุ์ตามพื้นที่บริเวณน้ำกร่อยและป่าชายเลน สายพันธุ์นี้มีความสำคัญทั้งในด้านพืชอาหารและสมุนไพร และมีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศป่าชายเลน สายพันธุ์นี้พบได้ในอเมริกา แอฟริกา ยุโรป และเอเชีย ในประเทศไทยพบทางภาคตะวันออกเฉียงใต้ ภาคตะวันตกเฉียงใต้ ภาคกลาง และภาคใต้ เช่น จังหวัดเพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม ชลบุรี และสุราษฎร์ธานี

สายพันธุ์นี้พบอยู่ตามชายป่าโกงกาง ที่รกร้างรอบ ๆ นาเกลือ และพบตามพื้นที่เปิดโล่ง โดยดินมีลักษณะร่วนและเค็ม อยู่หลังแนวป่าโกงกาง ส่วนใหญ่พบกลุ่มประชากรขนาดใหญ่ที่รวมกัน ลำต้นของสายพันธุ์นี้เกลี้ยงและแตกแขนงที่โคนต้น สูงประมาณ 30-100 cm. เป็นไม้ล้มลุกและมีกิ่งแตกแข็งแรง ใบมีลักษณะเรียงเวียน อวบน้ำ ส่วนใหญ่เป็นสีแดงและมีนวล รูปทรงของใบเป็นกระบอกแคบ ๆ โคนเล็กน้อย ยาว 2-5 mm. ปลายเรียวแหลม ไม่มีก้าน ดอกออกเป็นกระจุก 3-5 ดอก เรียงตามแกนช่อ บางครั้งเป็นดอกเพศเมีย ใบประดับคล้ายใบลดรูปช่วงปลายช่อ ใบประดับย่อยมีขนาดเล็ก 2-3 อัน ติดทน ดอกมีสีเขียวหรือสีแดง กลีบรวม 5 กลีบ ยาวประมาณ 2 mm. เกสรเพศผู้มีจำนวน 5 อัน รังไข่มีช่องเดียว ก้านเกสรเพศเมียแยก 2-3 อัน ยื่นออกจากกลีบรวมเล็กน้อย ผลสดมีกลีบรวมหุ้ม มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 mm. และมีเมล็ดเดี่ยว ซึ่งมีสีน้ำตาลและมันวาว (Larsen, 2000)

2.8.4 หญ้าแฝก



ภาพที่ 14 หญ้าแฝก

ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Vetiveria zizanioides</i> (L.) Nash ex Small
ชื่อวงศ์	POACEAE (GRAMINEAE)
ชื่อสามัญ	Ushira, Reshira, Sugandhimula
ชื่ออื่นๆ	แฝก แฝกหอม แฝกลุ่ม แกงหอม แคมหอม

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

พืชชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในอินเดียตอนเหนือและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หลังจากนั้นจึงแพร่กระจายไปยังประเทศต่าง ๆ ในเขตร้อนและกึ่งร้อน พืชชนิดนี้มีความสามารถในการทนต่อสภาพอากาศและดินได้ดี โดยมีลักษณะเป็นพืชล้มลุกสูง 1-16 m. และมีรากฝอยที่ยังลึกในดินได้ถึง 4 m. รากมีกลิ่นหอม ใบเดี่ยวรูปขอบขนาน กว้าง 0.4 - 1.5 cm. ยาว 30 - 75 cm. และปลายใบมีลักษณะแหลม ผิวด้านล่างเกลี้ยงและขอบใบมีขนสาก ดอกออกเป็นช่อที่กลางยอด ยาว 15 - 40 cm. โดยดอกย่อยด้านล่างมีลักษณะฝ่อและด้านบนเป็นดอกเพศสมบูรณ์ของเมล็ดสีน้ำตาลอ่อน มีรูปกระสวย ผิวเรียบและหัวท้ายมน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2557)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิจิตพล และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การปรับ ตัวของพืชภายใต้ภาวะที่มีความเค็ม ซึ่งความเค็มเป็นปัญหาสำคัญต่อการเจริญของสิ่งมีชีวิต โดยอาจจะไปลดความสามารถในการเจริญเติบโตการสร้างผลผลิตอันเนื่องจากสภาวะความเค็ม จะยับยั้ง กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ ที่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นสิ่งมีชีวิต ต้องมีการปรับตัวให้เข้าภาวะที่มีความเค็ม โดยพืชที่สามารถอาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความเค็มสูงได้ เรียกว่า พืชทนเค็ม (halophyte) สำหรับกลไกที่ใช้ในการทนต่อความ เค็มนั้น ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน และการสะสมสารบางชนิด หรือพืชบางชนิดเพิ่มความอวบของใบแก่ หรืออาจจะขับเกลือออกทางต่อมเกลือซึ่งอยู่ที่ใบ เช่น แสม และ โกงกาง

อรุณี และสมศรี (2539) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทนเค็ม โดยได้ดำเนินการ 3 การทดลองในโรงเรือน ทดลองโดยปลูกพืชในความเค็มระดับที่ต่างกัน โดยพืชที่นำมาศึกษาเช่น หญ้าดิกซี่ (*Sporobolus virginicus*), หญ้าซีบรูก (*Distichlis spicata*), หญ้าจอร์เจียร์ (*Spartina patens*), หญ้าคาลลา (*Leptochloa fusca*) ซึ่งเป็นพืชทนเค็มทั้งในและต่างประเทศ พบว่าสามารถแบ่งกลไกความทนเค็มของพืชเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะลักษณะกลไกการหลีกเลี่ยงเกลือ (Salt avoidance) เช่น การอวบน้ำ (Succulence) เพื่อรักษาสมดุลออสโมติกในพืชตั้งแต่ในระดับเซลล์ ได้แก่ ชะคราม (*Suaeda maritima*) ผักเบี้ยทะเล (*Sesuvium portulacastrum*) เป็นต้น สำหรับพืชทนเค็มบาง ชนิดเมื่อดูดเกลือปริมาณมากเข้าไปสะสมในต้นและใบเป็นพิษต่อพืชถึงตาย พืชจึงมีขบวนการหลีกเลี่ยงเกลือโดยรากจะเคลื่อนไปในทิศทางที่ดินไม่เค็มมาก หรือมีความชื้นเพียงพอที่จะเจือจางเกลือในสารละลายดิน จึงทำให้ทนเค็มได้ปานกลาง เช่น หญ้าชันอากาศ (*Panicum repens*) หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) เป็นต้น ส่วนหญ้าคาลล่าทนเค็มได้ในระดับสูง เนื่องจากการลดจำนวนและปรับขนาดของโครงสร้างภายในให้เล็กลง กลไกการกำจัดเกลือ(Salt excluded) เช่น การคายเกลือ (Excretion) ออกจากใบและกาบใบเพื่อปรับสมดุลออสโมติกในพืช พบใน หญ้าดิกซี่ หญ้าซีบรูก และ หญ้าจอร์เจียร์

อธิภัทร (2556) ศึกษาเกี่ยวกับหัวข้อ ผลของความเค็มต่อลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของพืชทนเค็มบางชนิดที่พบภายในพื้นที่นาทุ่งรัง โดยทำการสำรวจพืชในพื้นที่นาทุ่งรังทั้งสิ้น 55 ชนิด ซึ่งจากการสำรวจโดยดูค่าความถี่สัมพัทธ์สูงสุดมีพืชเด่นในพื้นที่คันนาทั้งสิ้น 10ชนิด จากนั้นจึงทำการเลือกพืชเด่นในกันบ่อมา 2 ชนิด ได้แก่ หญ้าสะกาดน้ำเค็ม (*Paspalum vaginatum*) และ กกหัวทรงกระเทียม (*Eleocharis dulcis*) มาปลูกบนอาหาร Hoagland ซึ่งมีการกำหนดความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0 50 100 200 และ 300 mM เป็นเวลา 60 วัน พบว่า

หญ้าสะกาดน้ำเค็มและกกหัวทรงกระเทียมอยู่รอดถึงความเข้มข้นที่ 200 mM และ 100 mM ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นกกหัวทรงกระเทียมและหญ้าสะกาดน้ำเค็มมีแนวโน้มที่จะสามารถบำบัดความเค็มได้ด้วยวิธีไฟโตเอ็กแทรกชัน (Phytoextraction)

ศิริภรณ์ และคณะ (2555) ได้ศึกษาชนิดของพืชน้ำทนเค็มและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่ออนุบาลลูกกุ้งก้ามกราม โดย ทำการคัดเลือกพืชน้ำในท้องถิ่น 10 ชนิด มาปลูกในสภาพน้ำจืดแล้วค่อยๆเพิ่มความเค็มด้วยน้ำเกลือสินเธาว์ขึ้นเรื่อย ๆ ทุก 3 วัน จนถึง 15 ppt พบว่ามีพืชน้ำ 4 ชนิด สามารถเจริญได้ดี คือ ฐูปฤษี (*Typha angustifolia* Li) หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* Nash) กกอีลิปต์ (*Cyperus papyrus* L.) และกกกรม (*Cyperus alternifolius* Linn) แต่กกอีลิปต์มีลำต้นที่บอบบาง หักง่าย ไม่ทนทานจึงไม่นำมาทดลองต่อ ส่วนในการทดลองที่ 2 โดย ปลูกพืชน้ำแต่ละชนิด กอละ 3 กิโลกรัม นำไปสู่มใส่บ่อที่มีน้ำทิ้งจากบ่ออนุบาลลูกกุ้งก้ามกราม 100 ลิตร/บ่อรวม 16 บ่อ ตรวจวัด อุณหภูมิ ความเค็ม pH ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) บีโอดี (BOD) คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย (TAN) และไนโตรเจนเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใส่พรรณไม้ นาน 13 วัน พบว่า ค่าอุณหภูมิ ความเค็ม ความเป็นด่าง ออกซิเจนละลาย บีโอดี และคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่มีความแตกต่างกันตลอดการทดลอง ส่วนค่าพีเอช พบว่าน้ำที่บำบัดด้วยพืชน้ำทั้ง 3 ชนิด มีค่าพีเอชลดเหลือ 8.2 ในวันที่ 4-5 ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (<0.05) เมื่อเทียบกับพีเอช 8.4 - 8.5 ของวันที่ 1-3 ก่อนที่จะยกระดับ ขึ้นเป็น 8.5 ในวันที่ 6 และคงอยู่ในระดับนี้จนสิ้นสุดการทดลอง ฐูปฤษี มีประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนได้สูงสุดคือร้อยละ 91.51-99.56 รองลงมา คือ หญ้าแฝก ร้อยละ 36.84-46.67 ส่วนกกกรมสามารถลดไนโตรเจนได้ ต่ำเพียงร้อยละ 3.59-75.94 เท่านั้น

Tuteja (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ กลไกการทนเค็มสูงในพืช โดยในบรรดาความเครียดจากสิ่งมีชีวิต ความเครียดจากความเค็มสูงเป็นความเครียดด้านสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงที่สุดในพืช ซึ่งจะบั่นทอนผลผลิตพืชผลอย่างน้อย 20% ความเค็มสูงทำให้เกิดผลกระทบด้านลบ โดยการทำลายสมดุลของไอออนิกและออสโมติกของเซลล์ ในดินเค็มโซเดียมไอออนในปริมาณสูงจะนำไปสู่การยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชและอาจทำให้พืชตายได้ ดังนั้นกลไกของการทนต่อความเค็มจึงเกี่ยวข้องกับการกักเก็บโซเดียม และคลอไรด์ในแวคิวโอลของเซลล์ การปิดกั้นไม่ให้โซเดียมเข้าสู่เซลล์ การป้องกันโซเดียม ในกระบวนการคายน้ำ และกลไกอื่นๆ ที่ช่วยในการทนต่อความเค็ม

Gao et al. (2015) ได้ทำการศึกษา เรื่องการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีความเค็ม ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ และ การศึกษาการคัดเลือกพืชและลักษณะการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้พืชโพล่พื้นน้ำทั้ง 12 ชนิด ปลูกในหน่วยทดลองและรดด้วยน้ำที่มีความเค็ม โดยสายพันธุ์ของพืชทั้งหมดถูกจำแนกออกเป็นสามกลุ่มโดยใช้การวิเคราะห์แบบคลัสเตอร์ตามค่าเฉลี่ยของอัตราการเติบโต สัมพันธ์ การดูดซึมสารอาหาร ชีวมวลของราก และกิจกรรมของเอนไซม์และจุลินทรีย์ โดยสายพันธุ์ของคลัสเตอร์ I ได้แก่ พุทธรักษา, อ้อเล็ก และ กก มีแนวโน้มศักยภาพสูงในการบำบัดชุมชนที่มีความเค็ม โดยพืชข้างต้นถูกนำมาใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีความเค็ม ที่ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.5 พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยลดลงร้อยละ 61.5–70.5 , แอมโมเนียมไนโตรเจนเฉลี่ยลดลงร้อยละ 59.3–68.4 , ไนโตรเจนรวมเฉลี่ยลดลงร้อยละ 61.9–70.4 และ ฟอสฟอรัสรวมเฉลี่ยลดลงร้อยละ 40.4–47.3 เนื่องด้วยความเค็มที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 2.0 ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมเอนไซม์ในดินในหน่วยทดลอง โดยกิจกรรมของยูรีเอส (Urease) และเซลลูเลส (Cellulase) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความเค็มเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 2.0 โดยกิจกรรมของเอนไซม์ในดินลดลงในชุดการทดลองที่ได้รับน้ำเสียที่มีความเค็มร้อยละ 2.0 ซึ่งบ่งชี้ว่าน้ำเสียชุมชนที่มีความเค็มส่งผลเสียต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์

Fountoulakis et al. (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับพืชทนเค็มร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอนสำหรับการบำบัดน้ำเสียภายในประเทศ โดยผลการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบพืชทนเค็มสามชนิดคือ *Atriplex halimus*, *Juncus acutus* และ *Sarcocornia perennis* โดยทำการทดสอบไฟโตดีซาลิเนชัน (phyto-desalination) ของน้ำเสียชุมชนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวตั้ง (VFCW) โดยเปรียบเทียบกับอ้อเล็ก (*Phragmites australis*) อัตราภาระอินทรีย์ (Organic volumetric loading rate) อยู่ที่ประมาณ 21 g COD/m²/d และอัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (Hydraulic loading rate) คือ 95 mm. / d ในทั้งสองกรณี ได้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจสำหรับ *A. halimus* ซึ่งแสดงผลผลิตชีวมวลสูงและความสามารถที่สำคัญในการสะสมเกลือโดยเฉพาะโซเดียม ในเนื้อเยื่อ ผลในเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อโรค อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำทิ้งของ VFCW ที่ปลูกด้วยฮาไลไฟต์พบว่าสูงกว่าในน้ำทิ้งของ VFCW ที่ปลูกด้วยอ้อเล็ก แต่ก็ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญในประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และฟอสฟอรัสจากการใช้พืชทนเค็มแทนอ้อเล็ก

Liu et al. (2016) ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การทนเกลือของหญ้าสายพันธุ์หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides* L.) ในตอนใต้ของจีน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทนเค็มรวมไปถึงกลไกในการทนเค็ม และการเจริญเติบโตของต้นหญ้าแฝกในอาหารสารละลายสูตรฮอกแลนด์ (Hoagland solution) โดยผลการศึกษาของแสดงให้เห็นว่าหญ้าแฝกสามารถทนต่อความเครียดจากเกลือได้ระดับความเค็มที่ความเข้มข้นประมาณ 100 mM รวมไปถึงหญ้าแฝกมีความสามารถสูงในการแยกโซเดียมและเก็บโพแทสเซียม ไว้ในใบซึ่งเป็นกลยุทธ์สำหรับการทนเค็มของต้นพืช

Klomjek and Nitorisavut (2005) ได้มีการประเมินความเป็นไปได้ของการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำบำบัดที่สร้างขึ้นเพื่อกำจัดมลพิษออกจากน้ำเสียจากน้ำเกลือ โดยใช้พืชไหล่น้ำ 8 ชนิด ได้แก่ ต้นธูปฤๅษี หญ้าน้ำ หญ้าปูเอเซีย หญ้าดอกเกลือ หญ้าคาลาร์ หญ้าแฝก และอเมซอน นำมาปลูกในแปลงทดลองและเลี้ยงด้วยน้ำเสียชุมชนที่เติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เพื่อจำลองความเข้มข้นของเกลือประมาณ 14–16 mS/cm พบว่าพืชไหล่น้ำทั้งหมดมีความทนทานภายใต้สภาวะที่ทดสอบ ยกเว้นอเมซอนและหญ้าแฝก การดูดซึมสารอาหารของสายพันธุ์ที่ทนต่อเกลืออยู่ในช่วง 0.006–0.061 และ 0.0002–0.0024 g/m²-d สำหรับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดของหน่วยที่ปลูกพบว่าเป็นร้อยละ 72.4–78.9 สำหรับ บีโอดี5 ร้อยละ 43.2–56.0 สำหรับของแข็งแขวนลอย ร้อยละ 67.4–76.5 สำหรับ แอมโมเนียไนโตรเจน และร้อยละ 28.9–44.9 สำหรับฟอสเฟตทั้งหมด ซึ่งการเจริญเติบโตของพืชที่นำพอใจที่สุดและการดูดซึมไนโตรเจนได้ดีที่สุดคือธูปฤๅษี

Vymazal (2014) กล่าวว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ดินตามแนวนอน (HFCW) ประกอบด้วยกรวดหรืออื่น ๆ ที่มีน้ำเสียไหลผ่าน ตัวกลางที่มีรูพรุนใต้พื้นผิวขนาวนอน โดยชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ ประเภทนี้มีความเข้มข้นดีโอ ต่ำ แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย (SS) ได้ดี ในส่วนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวดิ่ง (VFCW) จะมีส่วนที่เป็นแอโรบิกมากกว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ดินตามแนวนอน เนื่องจากน้ำถูกป้อนในแบตช์ขนาดใหญ่จากนั้นจะไหลผ่านตัวกลางที่มีปริมาณออกซิเจนที่มาก ทำให้มีการกำจัดบีโอดี และเกิดไนตริฟิเคชันได้ดี และสำหรับน้ำเสียจากน้ำเกลือ แนะนำให้ใช้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลบนผิวดิน (FWSCW) เพราะอัตราการระเหยที่มากขึ้นอาจทำให้ระดับความเค็มเพิ่มขึ้นในน้ำเสีย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เพื่อคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม และ การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินแนวนอน

3.1 สถานที่ และระยะเวลาการทำวิจัย

3.1.1 สถานที่

- (1) สถานที่เก็บน้ำตัวอย่าง ได้แก่ โรงงานฝักและผลไม้ดอง จังหวัดลำพูน
- (2) สถานที่ทำการทดลอง ได้แก่ โรงบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
- (3) ห้องปฏิบัติการ ได้แก่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

3.1.2 ระยะเวลาการทำวิจัย

ระยะเวลาการทำวิจัย เพื่อคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม และ การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินแนวนอน ได้เริ่มดำเนินการทดลองตั้งแต่ 1 มกราคม ถึง 4 สิงหาคม 2565

3.2 อุปกรณ์การดำเนินการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์การทำโรงเรือน

- 1) ฝ้ายางพลาสติกใส
- 2) คลิปล็อก
- 3) ลวด
- 4) ไม้ไผ่
- 5) เชือกปอ
- 6) กาว
- 7) สก็อตเทป
- 8) ตะปูคอนกรีต
- 9) สแลนกรองแสง

3.2.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) ฐปฤชี (*Typha angustifolia*)
- 2) กกราชนี (*Cyperus alternifolius*)
- 3) หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*)
- 4) ชะคราม (*Suaeda maritima*)
- 5) น้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง
- 6) น้ำประปา
- 7) ถังน้ำสำหรับเก็บน้ำเข้า
- 8) แกลลอน ขนาด 10 l. สำหรับเติมน้ำเข้า
- 9) สวิงสำหรับกรองน้ำเสีย
- 10) กรวย
- 11) กระบอกตวง
- 12) ตลับเมตร
- 13) กระถาง ขนาด 10”
- 14) ทราย
- 15) หินเกร็ด
- 16) ดินร่วนปนทราย
- 17) บ่อพลาสติก ขนาด 0.5 m².

- 18) ท่อ PVC(ท่อตรง วาล์ว เกลีสวอนอก และ เกลีสวอนใน)
- 19) ซิลิโคนกาวกันน้ำ
- 20) แผ่นยางกันซึม

3.2.3 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ 1000 ml.
- 2) ถ้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์
- 3) คีมคีบ (Forceps)
- 4) กระดาษกรองใยแก้ว GF/C ขนาด 4.7 cm.
- 5) เครื่องปั๊มสุญญากาศ พร้อมกรวยบุชเนอร์ และ ขวดกรอง
- 6) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ
- 7) โถดูดความชื้น
- 8) เครื่องชั่ง 2 และ 4 ตำแหน่ง
- 9) หลอด ซีโอดี ขนาด 20x150 mm.
- 10) ที่ใส่หลอดทดลอง (Rack)
- 11) ปิเปตขนาด 1, 5, 10 ml. พร้อมลูกยาง
- 12) ปีกเกอร์ขนาด 50, 250 ml.
- 13) ขวดรูปชมพู่ขนาด 250, 500 ml.
- 14) ขวด BOD ขนาด 300 ml.
- 15) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 20 °C
- 16) กระบอกตวงขนาด 100 ml.
- 17) หลอดหยด
- 18) บิวเรต ขนาด 50 ml.
- 19) เครื่องวัด pH
- 20) เครื่องวัดความเค็ม
- 21) เครื่องไอซีพี -โออีเอส (ICP-OES)

3.3 การเตรียมอุปกรณ์ก่อนการทดลอง

3.3.1. การเตรียมพืชสำหรับการทดลอง

นำพืจำนวน 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ ธูปฤๅษี และกกราชินี ซึ่งเป็นพืชโผล่พ้นน้ำ (Emerged plant) ต้นหญ้าแฝก และ ต้นชะคราม ซึ่งเป็นพืชริมน้ำ (Marginal Plant)มาใช้ในการทดลอง โดย ธูปฤๅษี กกราชินี และหญ้าแฝก นำมาจากธรรมชาติ ภายในเขต อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ สำหรับ ชะคราม ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานอุตสาหกรรมผักและผลไม้ดอง ในจังหวัดเชียงราย โดยนำพืชทั้งหมดมาเพาะเลี้ยงและขยายพันธุ์เพื่อให้พอเพียงต่อการทดลอง โดยทำการเลี้ยงให้มี การเติบโต และมีขนาดใกล้เคียงกัน

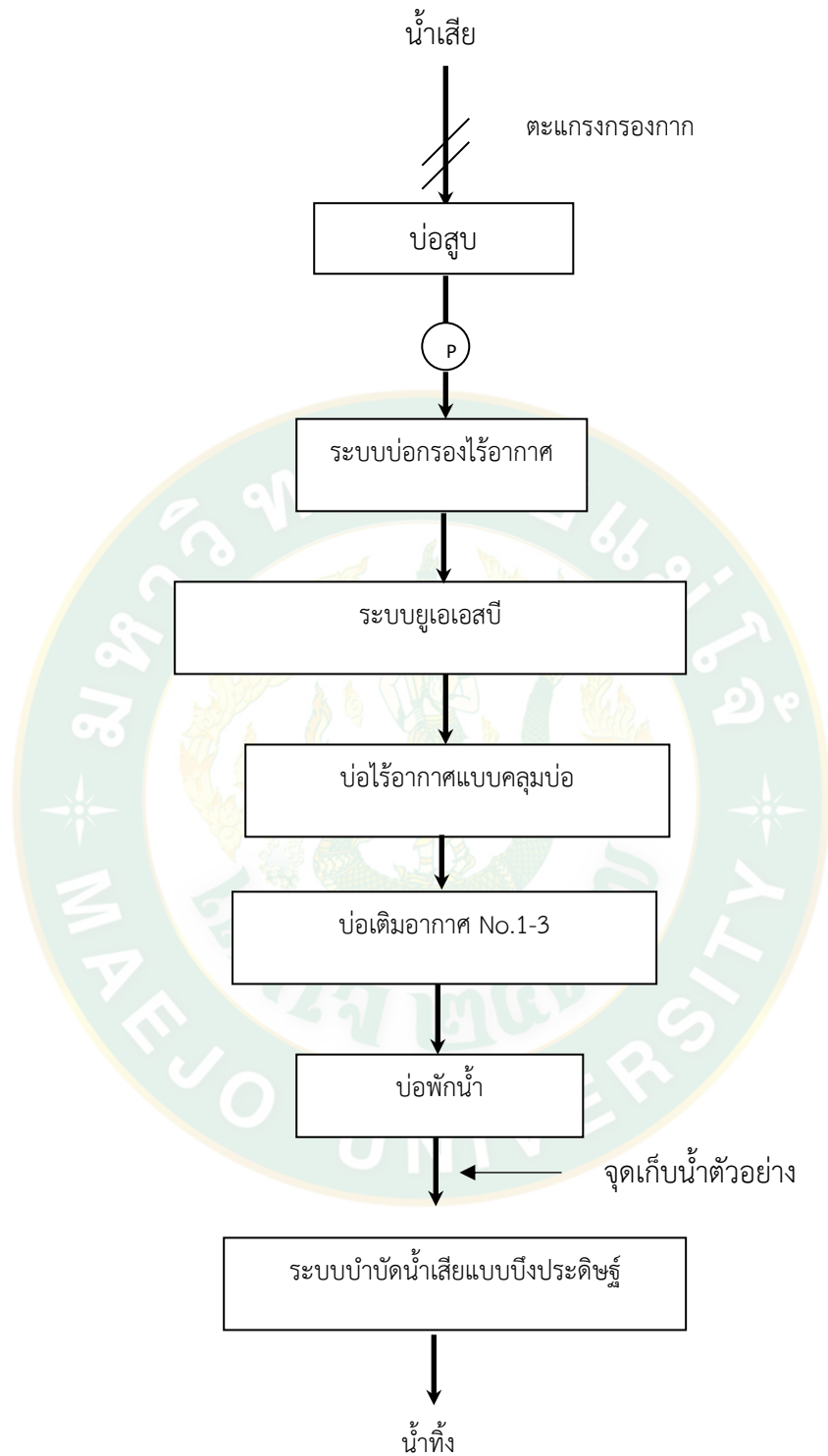
3.3.2 การเตรียมน้ำทิ้งสำหรับการทดลอง

น้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานผักและผลไม้ดอง ใน จ. ลำพูน เป็นน้ำทิ้งจากโรงงานที่ผ่านกระบวนการบำบัด ดังภาพที่ 15 และรูปของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผักและผลไม้ดองแสดงดังภาพที่ 16 ทำการเก็บน้ำทิ้งจากโรงงานทุก ๆ 2 สัปดาห์ ก่อนนำมาทำการทดลองได้นำมากรองตะกอนก่อนเติมเข้าระบบเพื่อป้องกันการอุดตัน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผักและผลไม้ดอง ซึ่งมีคุณลักษณะดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 คุณลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ช่วงค่า
พีเอช	7.4-7.6
อุณหภูมิ	26.9-27.1 °C
การนำไฟฟ้า	24.1-26.9 mS/cm
ค่าความเค็ม	14.6-16.5 ppt
ซีโอดี	192- 218 mg/l
บีโอดี	149.6-169.4 mg/l
ของแข็งละลาย	15,430-17,239 mg/l
ของแข็งแขวนลอย	98.5- 107.3 mg/l
ไนเตรท	0.73-0.86 mg/l.NO ₃ ⁻
ฟอสเฟต	3.58-3.83 mg/l .PO ₄ ³⁻





ภาพที่ 15 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผักและผลไม้ดอง



บ่อปรับเสถียร



ระบบบ่อกรองไร้อากาศ



ระบบยูเอเอสบี



บ่อไร้อากาศแบบคลุมบ่อ



บ่อเติมอากาศ



บ่อพักน้ำ



ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

ภาพที่ 16 ขั้นตอนต่างๆ ของระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผักและผลไม้ดอง

3.3.3 การเตรียมโรงเรือนสำหรับการทดลอง

โรงเรือนที่ใช้ในการทดลอง คลุมด้วยสแลนกรองแสง 50% โครงหลังคาทำด้วยไม้ไผ่ยึดกับ
โครงเหล็ก โดยจัดตั้งที่ โรงบำบัดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีขนาดโรงเรือน
กว้าง 10 m. ยาว 10 m. สูง 5 m. (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 17 โรงเรือนที่ใช้ในการทดลอง

3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง

การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้พืชทนเค็มร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนนั้นจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ การคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม และ การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน ดังนี้

การทดลองที่ 1 การคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม

การวางแผนการทดลอง

ออกแบบให้มี 4 ชุดการทดลอง (Treatments) จำนวน 3 ซ้ำ (Replications) โดยทำการกำหนดความเค็มของน้ำที่ระดับความเข้มข้น 4 ระดับ ได้แก่ 0, 12, 15, 18 ppt ตามลำดับ ดังนี้

ชุดที่ 1 ต้นชะครามที่ปลูกในระดับความเค็มที่ความเข้มข้น 0, 12, 15, 18 ppt

ชุดที่ 2 ต้นธูปฤๅษีที่ปลูกในระดับความเค็มที่ความเข้มข้น 0, 12, 15, 18 ppt

ชุดที่ 3 ต้นกกราชินีที่ปลูกในระดับความเค็มที่ความเข้มข้น 0, 12, 15, 18 ppt

ชุดที่ 4 ต้นหญ้าแฝกปลูกในระดับความเค็มที่ความเข้มข้น 0, 12, 15, 18 ppt

ทำการปลูกพืชแต่ละชนิดลงในกระถางพลาสติกขนาด 10” ที่บรรจุดิน และทำการใส่ปุ๋ยเม็ดสูตรเสมอ 16-16-16 ละลายน้ำ จำนวน 6 กรัม/กระถาง โดยมีจำนวนต้นพืชเริ่มต้นตามขนาดและการเจริญเติบโตของต้นพืชในกระถาง ดังนี้ ชะคราม 1 ต้น/กระถาง ธูปฤๅษี 3 ต้น/กระถาง กกราชินี 5 ต้น/กระถาง และ หญ้าแฝก 10 ต้น/กระถาง จากนั้นทำการเพิ่มระดับความเค็มครั้งละ 3 ppt ทุกๆ 5 วัน ในแต่ละชุดการทดลอง จนกระทั่งถึงระดับความเค็มที่ต้องการ

พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

หลังจากทำการปรับสภาพต้นพืชในกระถางด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของความเค็มของน้ำในกระถางในแต่ละ ชุดการทดลองตามที่กำหนดที่ความเข้มข้น 0, 12, 15, 18 ppt เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงทำการวัดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 9 ทุกๆ 5 วัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน และทำการสรุปผล

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัด

พารามิเตอร์	วิธีการ	ความถี่
ลักษณะทางกายภาพ	การสังเกต	ก่อน-หลังการทดลอง
จำนวนต้น	การนับ	ก่อน-หลังการทดลอง
ความสูง/ทรงพุ่ม	การวัด	ก่อน-หลังการทดลอง

หมายเหตุ: ทรงพุ่มทำการวัดเฉพาะต้นชะครามเท่านั้น

ทำการคัดเลือกชนิดของต้นพืชทนเค็มที่สามารถเจริญได้ในระดับความเค็มระหว่าง 15-18 ppt มาใช้ในการทดลองที่ 2

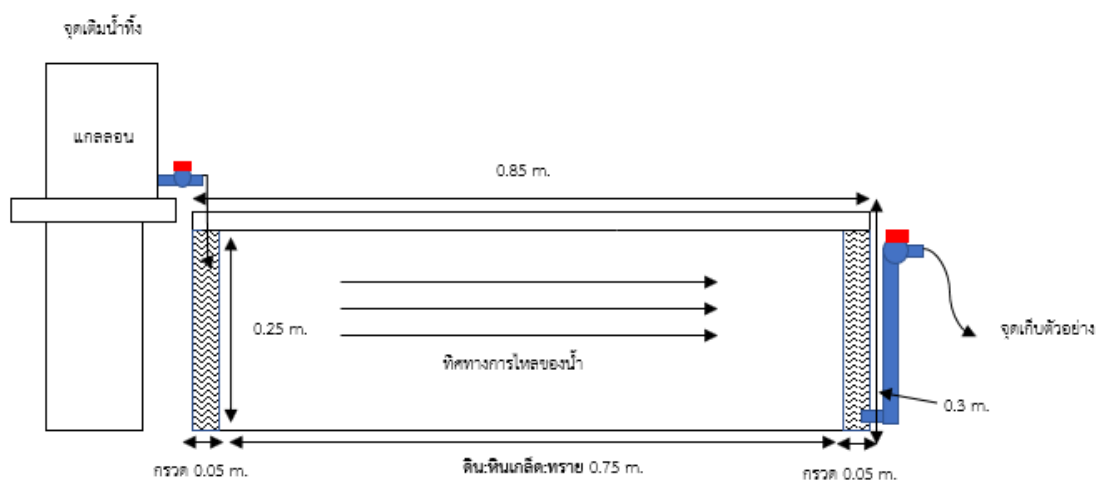
การทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

2.1) การวางแผนการทดลอง

นำพืชที่ได้รับการคัดเลือกจากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝัก และผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน ทำการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomized design : CRD) ออกแบบให้ แต่ละชุดการทดลอง (Treatment) ประกอบไปด้วย ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนที่ไม่มีต้นพืช และระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนที่มีพืชทนเค็มแต่ละชนิดที่คัดเลือกได้จากการทดลองที่ 1 จำนวนชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ (Replications)

2.2) การเตรียมระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน สร้างจากอ่างพลาสติก ขนาด กว้าง 0.64 m. ยาว 0.85 m. และสูง 0.3 m. จำนวน 12 อ่าง ภายในตัวถังมีการบรรจุวัสดุตัวกลาง ได้แก่ ดิน หินเกล็ด และทรายผสมกันที่อัตราส่วน กว้าง 0.64 m. ยาว 0.75 m. สูง 0.25 m. ประกอบด้านข้างทั้งสองด้านด้วยกรวดขนาด 3/8 inch กว้าง 0.64 m. ยาว 0.05 m. และสูง 0.25 m. ติดตั้งท่อและวาล์วน้ำออกจากระบบด้วย ท่อพีวีซี ขนาด 1/2 inch ในลักษณะคอห่านสำหรับเก็บตัวอย่าง ทำการเติมน้ำทิ้งเข้าระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) ที่อัตราการไหล 6 l/d ด้วยเกลลอน ขนาด 10 l. ที่ทำการติดตั้งท่อและวาล์ว พีวีซี ขนาด 1/2 inch (ภาพที่ 18)



ภาพที่ 18 แผนภาพแสดงรูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนที่ใช้ในการทดลอง

2.3) พืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินในแนวนอน

ทำการปลูกพืชที่ได้รับการคัดเลือกมาจากการทดลองที่ 1 ลงในระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินในที่เตรียมไว้ โดยทำการคัดเลือกต้นพืชแต่ละชนิดที่มีความสูงและอายุใกล้เคียงกันไปปลูกลงในระบบแต่ละชุดการทดลอง โดยมีระยะห่างระหว่างต้นประมาณ 20 cm. ก่อนเริ่มทำการทดลอง ทำการปรับสภาพต้นพืชและระบบด้วยน้ำทิ้งที่มีความเค็ม เพื่อให้พืชได้ปรับสภาพและขึ้นตัวกรองในระบบแพ็คตัว โดยเริ่มที่ 0 ppt จากนั้นจึงทำการเพิ่มความเค็มขึ้นครั้งละ 2.5 ppt ทุกๆ 5 วัน โดยใช้ระยะเวลาการปรับสภาพต้นพืชและระบบเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 30 วัน

2.4) การเติมน้ำเสียและการเดินระบบ

เติมน้ำทิ้งเข้าระบบทุกวันลงไปในแกลลอนขนาด 10 ลิตร โดยทำการกรองตะกอนก่อนที่จะเติมเข้าแกลลอนเพื่อป้องกันการอุดตันของท่อ ทำการปล่อยน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินในแนวนอนแบบต่อเนื่อง (Continuous) ที่อัตราการไหลของน้ำที่ 6 L/d พื้นที่รับน้ำทั้งหมด 0.43 m² อัตราการระบรทุกชลศาสตร์ที่ 1.40 cm./d ภาระบรทุกสารอินทรีย์ที่ 0.0025 kg./m²-d ซึ่งคิดจากค่า BOD และให้มีระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย (HRT) ในระบบเท่ากับ 5 วัน ตามเกณฑ์การออกแบบระบบ (Metcalf and Eddy, 1991)

2.5) การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของระบบบึงประดิษฐ์

หลังจากการปรับสภาพ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ล้นออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ทุก ๆ 5 วัน โดยในระหว่างการทดลองได้ทำการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบโดยวิเคราะห์ค่า พีเอช (pH), อุณหภูมิ (Temperature) การนำไฟฟ้า (Electro Conductivity) ความเค็ม (Salinity) ซีโอดี (COD) บีโอดี (BOD) ของแข็งละลาย (TDS) ของแข็งแขวนลอย (SS) (AWWA and WEF, 1998) ไนเตรท (Nitrate) และฟอสเฟต (Phosphate) ด้วยวิธี Spectrophotometer ดังตารางที่ 10 เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) โดยที่ค่า ซีโอดีของน้ำออกจากระบบมีค่าแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ ± 10 จากนั้นจึงนำผลคุณภาพน้ำที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของแต่ละชุดการทดลองโดยใช้สูตรคำนวณดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด (\%)} = \frac{\text{น้ำทิ้งก่อนการบำบัด} - \text{น้ำทิ้งหลังการบำบัด}}{\text{น้ำทิ้งก่อนการบำบัด}} \times 100$$

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของแต่ละชุดการทดลองด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

2.6) การวิเคราะห์โซเดียมในพืชหนัก และชั้นตัวกลาง

ทำการเก็บตัวอย่างพืช และดิน ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ ก่อน และ หลังการทดลอง โดยต้นพืชหนักทำการศึกษา ปริมาณโซเดียมทำการวัดโดยใช้เครื่อง ICP-OES น้ำหนักแห้ง (Dry weight: DW) ความสูง/ความกว้างทรงพุ่ม ในส่วนของดิน ทำการศึกษา พีเอช การนำไฟฟ้า ความเค็ม ดังตารางที่ 11 และ 12

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการวัด
พีเอช	เครื่องวัดรุ่น PCSTestr 35	ทุกๆ 5 วัน
อุณหภูมิ	เครื่องวัดรุ่น PCSTestr 35	ทุกๆ 5 วัน
การนำไฟฟ้า	เครื่องวัดรุ่น PCSTestr 35	ทุกๆ 5 วัน
ค่าความเค็ม	Salinity meter	ทุกๆ 5 วัน
ซีโอดี	Closed reflux method (AWWA and WEF, 1998)	ทุกๆ 5 วัน
บีโอดี	Azide Modifications methods (AWWA and WEF, 1998)	ทุกๆ 5 วัน
ของแข็งละลาย	เครื่องวัดรุ่น PCSTestr 35	ทุกๆ 5 วัน
ของแข็งแขวนลอย	Gravimetric method (AWWA and WEF, 1998)	ทุกๆ 5 วัน
ไนเตรท	Spectrophotometer	ทุกๆ 5 วัน
ฟอสเฟต	Spectrophotometer	ทุกๆ 5 วัน

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการวัด
พีเอช	เครื่องวัดรุ่น PCSTestr 35	ก่อน-หลังการทดลอง
การนำไฟฟ้า	เครื่องวัดรุ่น PCSTestr 35	ก่อน-หลังการทดลอง
ค่าความเค็ม	Salinity meter	ก่อน-หลังการทดลอง

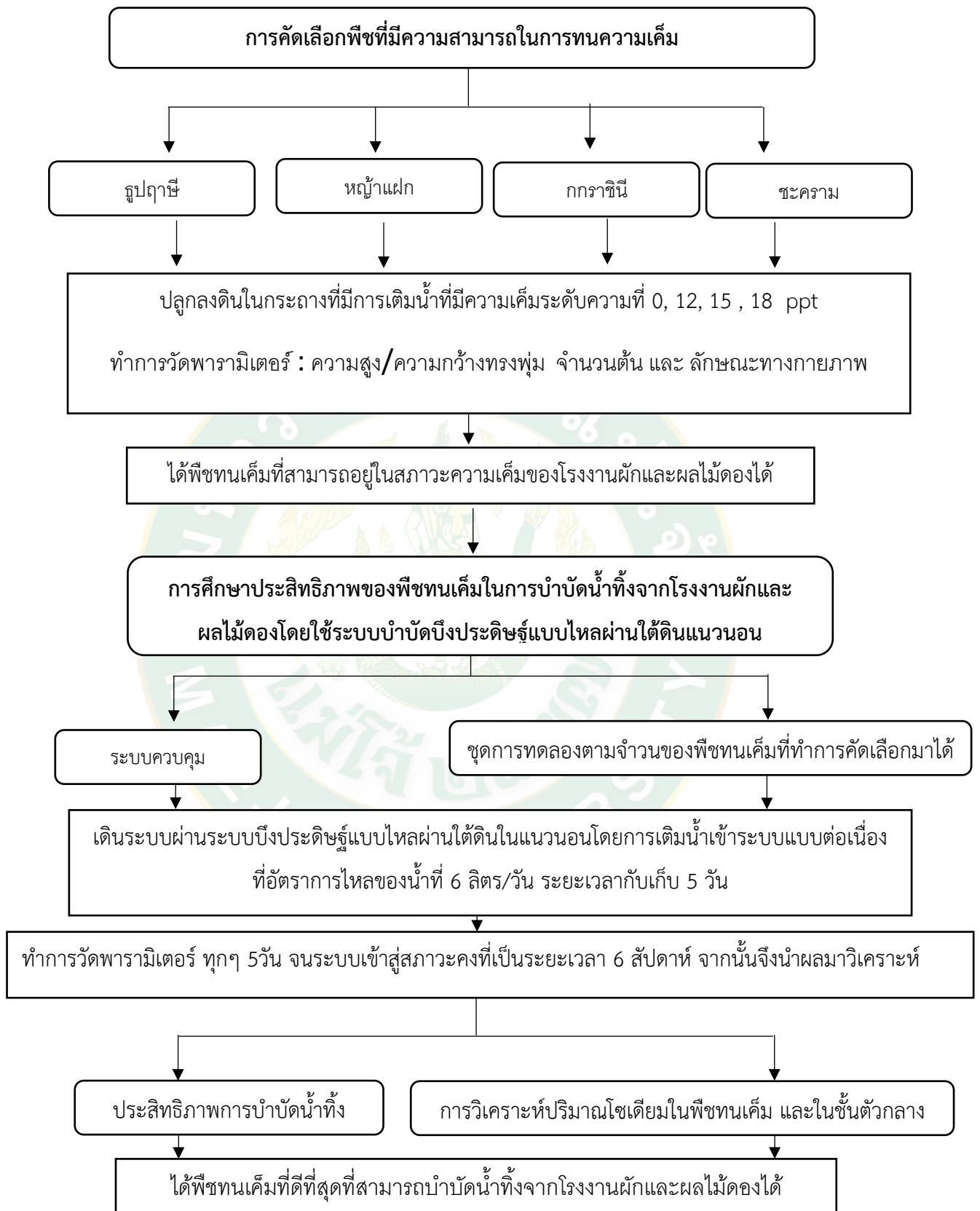
ตารางที่ 12 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างต้นพืช

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการวัด
ความสูง	measure	ก่อน-หลังการทดลอง
น้ำหนักแห้ง	Dry matter	ก่อน-หลังการทดลอง
ปริมาณ Na ⁺ รวมในต้นพืช	ICP-OES	ก่อน-หลังการทดลอง

2.7) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะนำผลที่ได้มาคำนวณร้อยละของประสิทธิภาพการบำบัดและทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One – Way Analysis of Variance, ANOVA) ของค่าดัชนีที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan’s Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS Ver. 26

ในกระบวนการทดลองการคัดเลือกพืชทนเค็มเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน โดยใช้พืชทนเค็ม มีการแบ่งเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ การคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็มในระดับความเค็มที่ต่างกัน และ การศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมผักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน โดยขั้นตอนการทดลองแสดงได้ดังแผนภาพ (ภาพที่19)



ภาพที่ 19 ไดอะแกรมแผนการทดลอง

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 การคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม

การทดลองนี้ได้ออกแบบให้มี 4 ชุดการทดลอง (Treatments) จำนวน 3 ซ้ำ (Replications) ใช้พืช 4 ชนิด ได้แก่ ฐปฤษี กกราชินี หญ้าแฝก และชะคราม ทำการกำหนดความเค็มของน้ำซึ่งมีความเค็มเท่ากับ 0, 12, 15, 18 ppt ตามลำดับ ใช้กระถางพลาสติกขนาด 10” โดยทำการปลูกพืชแต่ละชนิดลงในกระถางพลาสติกที่บรรจุดิน และทำการใส่ปุ๋ยเม็ดสูตรเสมอ 16-16-16 ละลายน้ำ จำนวน 6 กรัม/กระถาง โดยมีจำนวนต้นเริ่มต้นที่ ชะคราม 1 ต้น/กระถาง ฐปฤษี 3 ต้น/กระถาง กกราชินี 5 ต้น/กระถางและ หญ้าแฝก 10 ต้น/กระถาง ตามขนาดและการเจริญเติบโตของต้นพืชในกระถาง จากนั้นจึงทำการเพิ่มความเค็มขึ้นครั้งละ 3 ppt ทุกๆ 5 วัน เพื่อให้ต้นพืชปรับสภาพในภาชนะปลูกทุก ๆ 5 วัน จนถึงระดับความเค็มที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการบันทึกผล ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ จำนวนต้น และความสูง/ความกว้างทรงพุ่ม ก่อนและหลังการทดลอง

จากลักษณะการเจริญของต้นพืชทนเค็มที่ใช้ในการทดลองพบว่าต้นชะครามมีการเจริญเติบโตเป็นทรงพุ่มโดยแตกแขนงออกด้านข้างและสูง ในขณะที่ต้นฐปฤษี กกราชินี และหญ้าแฝก พบว่าเจริญด้วยการสูงและแตกกอเพิ่มจำนวนต้นซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

จากผลการทดลองในตารางที่ 13 และ 14 หลังจากทำการทดลองเป็นระยะเวลา 1 เดือน หลังจากการปรับสภาพ พบว่าพืชที่สามารถมีชีวิตอยู่ในความเค็มได้ถึง 18 ppt ได้ดีคือ ชะคราม มีความสูง และความกว้างทรงพุ่มเพิ่มขึ้นจาก 37.4 ± 0.87 และ 28.1 ± 0.61 เป็น 38.6 ± 0.53 และ 29.7 ± 0.50 จำนวนต้น 1 ต้นเท่ากับก่อนการทดลอง โดยทั่วไปในธรรมชาติชะครามมีความสูงอยู่ในช่วง 30-100 cm และเป็นไม้ล้มลุกและแตกแขนงที่โคนต้น (Larsen, 2000) ทำให้มีจำนวนต้นเท่ากับก่อนการทดลอง (ภาพที่ 20) ในส่วนของกกราชินี สามารถทนความเค็มได้ถึง 18 ppt เช่นเดียวกับกับชะครามโดยมีความสูงเริ่มที่ 31.2 ± 1.3 เพิ่มขึ้นเป็น 32.3 ± 1.41 และมีจำนวนต้นเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 5 ต้น จากก่อนการทดลอง 5 ต้น (ภาพที่ 21) ซึ่งโดยทั่วไปในธรรมชาติการเจริญเติบโตของกกราชินีจะเพิ่มความสูงและจำนวนต้นด้วยการแตกต้นใหม่ออกจากเหง้าทำให้มีจำนวนต้นเพิ่มขึ้นและเมื่อโตเต็มที่จะสูงประมาณ 1 -1.5 m. ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและสภาวะในการเจริญเติบโต (จรียา, 2554) ซึ่งเมื่อเทียบกับกกราชินีที่อยู่ในสภาวะความเค็มที่ต่ำกว่า 18 ppt พบว่าที่ 0-15 ppt มีความสูงและจำนวนต้นเฉลี่ยมากกว่า 18 ppt (ตารางที่ 13 และ 14) ในส่วนของฐปฤษีนั้นสามารถมีชีวิตอยู่ได้ในระดับความเค็มที่ 15 ppt พบว่า มีความสูงเริ่มที่ 53.5 ± 1.5 เพิ่มขึ้นเป็น

54.1±1.41 ดังตารางที่ 12 โดยทั่วไปในธรรมชาติรูปฤๅษีเจริญเติบโตด้วยการเพิ่มความสูงและเพิ่มจำนวนต้นด้วยการแตกลำต้นออกจากเหง้า โดยความสูงเมื่อโตเต็มที่อยู่ในช่วง 1.5 -3 m. ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและสภาวะในการเจริญเติบโต (Simpson, 2008) จากตารางที่ 14 สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มระดับความเค็มขึ้นการเจริญเติบโตของรูปฤๅษีค่อยๆลดลง และเมื่อรูปฤๅษีได้รับความเค็มเพิ่มขึ้นถึงระดับความเค็มที่ 18 ppt จำนวนต้นของรูปฤๅษีไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากก่อนการทดลอง อีกทั้งรูปฤๅษีได้มีการแสดงลักษณะไม่สามารถทนต่อสภาวะความเค็มนี้ได้อย่างชัดเจน ได้แก่ ใบไหม้ ต้นเหลือง เหง้าตายอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม และสภาวะความเค็มที่ต่ำกว่า 15 ppt (ภาพที่ 22) และหญ้าแฝกในระหว่างการปรับสภาพความเค็มได้ตายลงเมื่อเพิ่มความเค็มไปจนถึง 12 ppt ดังภาพที่ 23 ทำให้ในการทดลองนี้หญ้าแฝกนั้นจึงไม่เหมาะสมนำไปใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง



ตารางที่ 13 จำนวนของต้นพืชเฉลี่ยในกระถาง ก่อน-หลัง การทดลอง

ความเค็ม (ppt)	ชะคราม (<i>Sueda maritima</i>)		กกราชินี (<i>Cyperus alternifolius</i>)		รูปฤๅษี (<i>Typha angustifolia</i>)		หญ้าแฝก (<i>Vetiveria zizanioides</i>)	
	ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง	ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง	ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง	ก่อนการ ทดลอง	หลังการ ทดลอง
0	1	1	5	11	3	5	10	25
12	1	1	5	11	3	4	10	0
15	1	1	5	10	3	4	10	0
18	1	1	5	10	3	3	10	0

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงความสูง/ความกว้างทรงพุ่ม ก่อน-หลัง การทดลอง

ความ เค็ม (ppt)	ชะคราม				กกราชินี				หญ้าแฝก					
	ก่อนการทดลอง(ซม.)	ความกว้าง ทรงพุ่ม	ความสูง	หลังการทดลอง (ซม.)	ก่อนการ ทดลอง	ความกว้าง ทรงพุ่ม	ความสูง	หลังการ ทดลอง	ก่อนการ ทดลอง	ความสูง	หลังการ ทดลอง	ก่อนการ ทดลอง	ความสูง	หลังการ ทดลอง
0	40.9±1.78	30.0±0.50	42.6±1.55	31.6±0.43	31.2±1.36	34.1±1.53	52.9±1.53	54.3±1.33	24.6±1.02	26.3±0.57				
12	37.5±0.74	29.3±0.22	38.2±0.53	30.9±0.42	31.2±1.30	33.0±1.42	54.3±1.51	56.3±1.50	25.4±0.63	-				
15	37.2±0.43	29.1±0.32	38.2±0.54	30.4±0.30	31.0±1.28	33.1±1.45	54.7±1.48	56.3±1.52	24.7±0.80	-				
18	37.4±0.87	28.1±0.61	38.6±0.53	29.7±0.50	31.2±1.33	32.3±1.41	53.5±1.53	54.1±1.41	24.6±0.61	-				

ความ
เค็ม
(ppt)

(*Sueda maritima*)

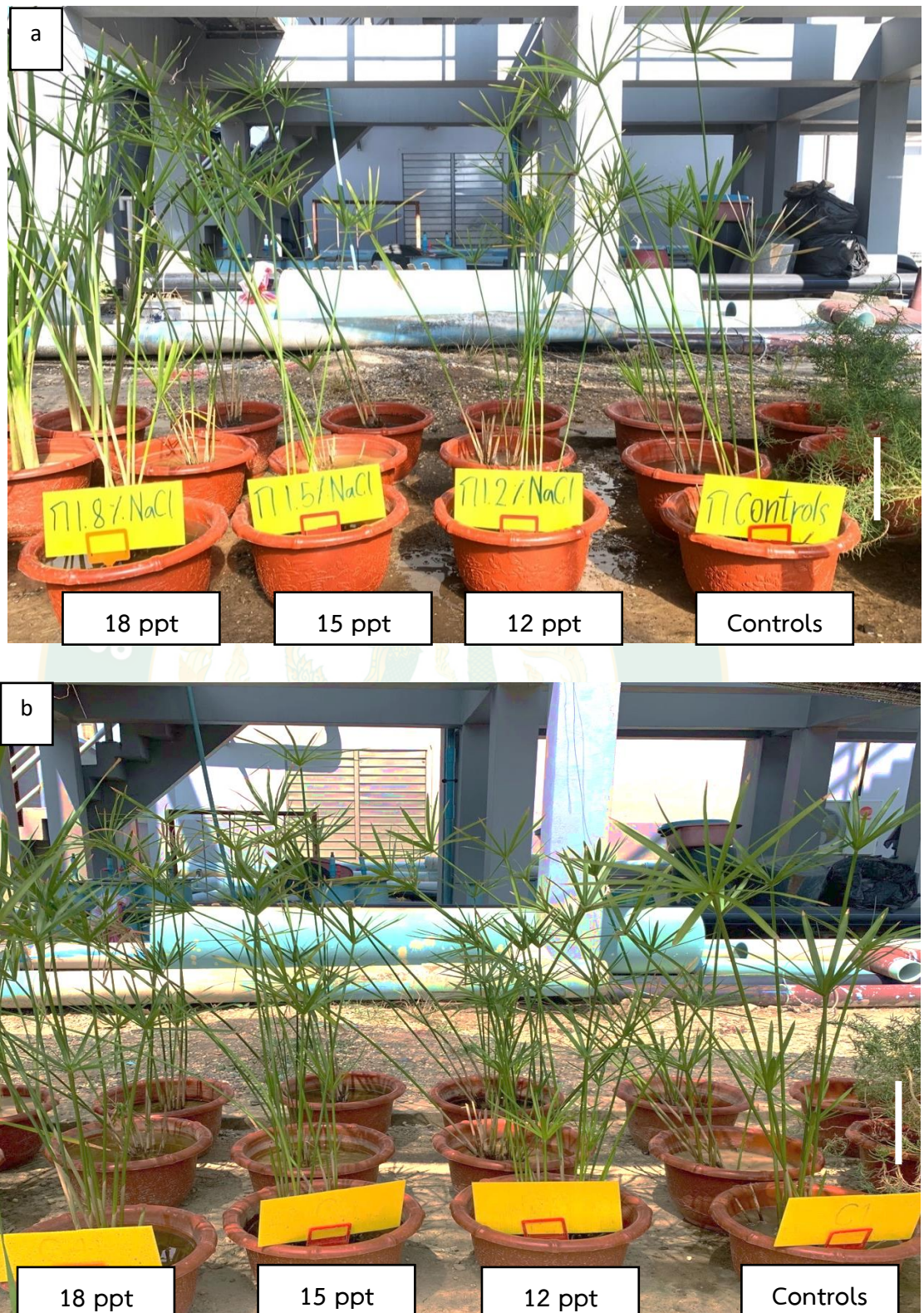
(*Cyperus alternifolius*)

(*Typha angustifolia*)

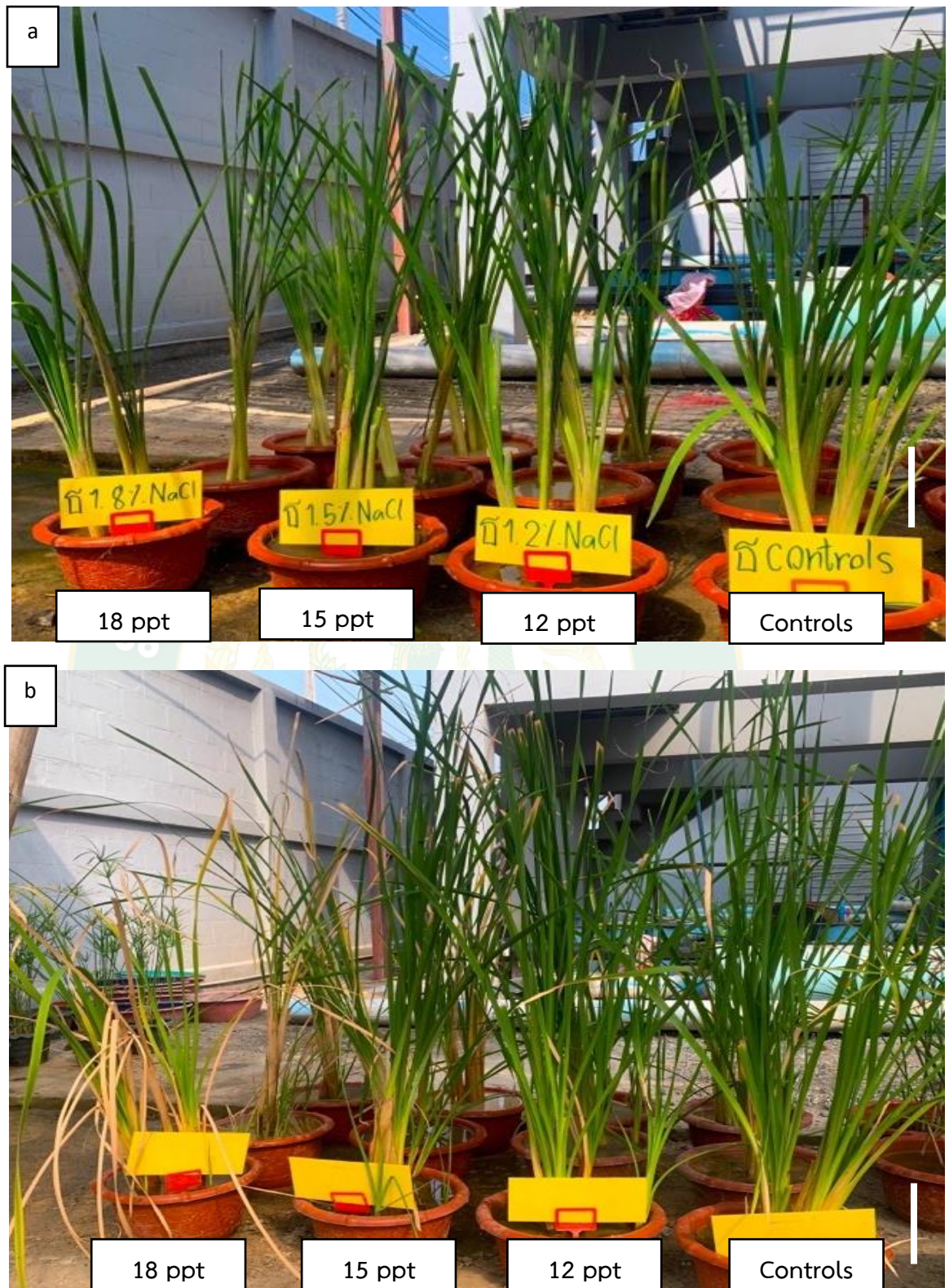
(*Vetiveria zizanioides*)



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของชะครามที่ได้รับความเค็มก่อนและหลังการทดลอง
 หมายเหตุ: a.) ก่อนการทดลอง b.) หลังการทดลอง (Scale bar 15 ซม.)



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของกิ้งก่าที่ได้รับความเค็มก่อนและหลังการทดลอง
 หมายเหตุ: a.) ก่อนการทดลอง b.) หลังการทดลอง (Scale bar 6 ซม.)



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของธูปฤๅษีที่ได้รับความเค็มก่อนและหลังการทดลอง
 หมายเหตุ: a.) ก่อนการทดลอง b.) หลังการทดลอง (Scale bar 9 ซม.)



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของต้นหญ้าแฝกก่อนและหลังการปรับสภาพที่ได้รับความเค็ม 12 ppt หลังผ่านการปรับสภาพไปเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์
หมายเหตุ: a.) ก่อนการปรับสภาพ b.) ระหว่างการปรับสภาพ
c.) หลังการปรับสภาพ (Scale bar 4 ซม.)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า พืชทนเค็มที่สามารถทนอยู่ได้ในความเค็มของน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง ได้แก่ ธูปฤๅษี กกกราชินี และ ชะคราม (ตารางที่15) จากนั้นจึงนำพืชทั้ง 3 ชนิด ที่สามารถทนอยู่ได้ในความเค็มของโรงงานฝักและผลไม้ดองได้ดีเหล่านี้ไปใช้ในการทดลองที่สองต่อไป

ตารางที่ 15 ตารางสรุปชนิดพืชที่สามารถทนความเค็มที่ระดับต่างๆ

ชนิดพืช	ระดับความเค็ม (ppt)
ธูปฤๅษี (<i>Typha angustifolia</i>)	15
กกกราชินี (<i>Cyperus alternifolius</i>)	18
หญ้าแฝก (<i>Vetiveria zizanioides</i>)	12
ชะคราม (<i>Sueda maritima</i>)	18

การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดอง โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

ทำการศึกษาผ่านระบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน (HSCWs) จำนวน 12 บ่อ โดยพืชที่ใช้ในการทดลองเป็น พืชทนเค็ม จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ กกกราชินี (*C.alternifolius*) ธูปฤๅษี (*T.angustifolia*) และชะคราม (*S.maritima*) โดยทำการคัดเลือกต้นพืชแต่ละชนิดที่มีความสูงและอายุใกล้เคียงกันนำไปปลูกลงในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ตามขนาดและการเจริญเติบโตของต้นพืช โดยมีระยะห่างระหว่างต้นประมาณ 20 เซนติเมตร ความหนาแน่นของกกกราชินีอยู่ที่ 45 ต้น/ตารางเมตร ความหนาแน่นของธูปฤๅษีอยู่ที่ 18 ต้น/ตารางเมตร และ ความหนาแน่นของชะครามอยู่ที่ ต้น/ตารางเมตร ตามขนาดและลักษณะการโตของต้น โดยความหนาแน่นของพืชอย่างน้อยควรมี 5-10 ต้น/ตารางเมตร (พัฒน์พงษ์ และคณะ, 2552) โดยน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อพักน้ำก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ของโรงงานฝักและผลไม้ดอง จ. ลำพูน โดยมีค่าคุณลักษณะน้ำทิ้ง ดังตารางที่ 16 โดยมีพื้นที่รับน้ำทั้งหมด 0.43 m² ทำการเติมน้ำเข้าระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) ที่อัตราการไหลของน้ำที่ 6 l/d และ อัตราการระบรทุกชลศาสตร์ที่ 1.40 cm./d ภาวะบรทุกสารอินทรีย์ที่ 0.0025 kg./m²-d โดยคิดจากค่าบีโอดี และให้มีระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย (HRT) ในระบบเท่ากับ 5 วัน ตามเกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Metcalf and Eddy, 1991)

ตารางที่ 16 คุณลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ช่วงค่า
พีเอช	7.4-7.6
อุณหภูมิ	26.9-27.1 °C
การนำไฟฟ้า	24.1-26.9 mS/cm
ค่าความเค็ม	14.6-16.5 ppt
ซีโอดี	192- 218 mg/l
บีโอดี	149.6-169.4 mg/l
ของแข็งละลาย	15,430-17,239 mg/l
ของแข็งแขวนลอย	98.5- 107.3 mg/l
ไนเตรท	0.73-0.86 mg/l.NO ₃ ⁻
ฟอสเฟต	3.58-3.83 mg/l .PO ₄ ³⁻

เมื่อเริ่มต้นทำการทดลองทำการเพิ่มความเข้มข้นของความเค็มที่ละ 2.5 ppt ทุกๆ 5 วัน เพื่อให้พีชได้มีระยะเวลาในการปรับตัวกับความเค็มเป็นระยะเวลา 30 วัน จากนั้นจึงได้เริ่มทำการเริ่มทำการเก็บข้อมูล โดยจะทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ ทุก ๆ 5 วัน จนถึงสภาวะคงที่ เป็นระยะเวลา 140 วัน โดยเริ่มเดินระบบตั้งแต่ 1 มีนาคม ถึง 4 สิงหาคม 2565 ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.1 พีเอช และ อุณหภูมิ

จากการทดลอง พีเอช น้ำเข้าระบบอยู่ในช่วง 7.4-7.6 พบว่า พีเอชน้ำออกของ ระบบควบคุม ฐปถษี กกราชินี และชะคราม พบว่ามีค่า 7.7 ± 0.04 , 7.7 ± 0.02 , 7.4 ± 0.01 และ 7.1 ± 0.02 ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ชะคราม และกกราชินีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 และพบว่าฐปถษีและระบบควบคุม ไม่มีความแตกต่างกัน โดยค่าพีเอชที่ออกจากทุกชุดการทดลองนั้นอยู่ในช่วงเป็นกลาง แสดงให้เห็นว่า ระบบไม่ส่งผลกระทบต่อารเปลี่ยนแปลง พีเอช และ พีเอชที่ได้มีสภาวะเป็นกลาง ซึ่งสภาวะเป็นกลางมีความเหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในระบบ เช่น การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน การดูดติด และตกตะกอนของฟอสเฟต เป็นต้น ในส่วนอุณหภูมิ น้ำเข้าและน้ำออกมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยอุณหภูมิน้ำเข้าอยู่ในช่วง 26.98 - 27.14 °C และ อุณหภูมิน้ำออกของ ระบบควบคุม ฐปถษี ก

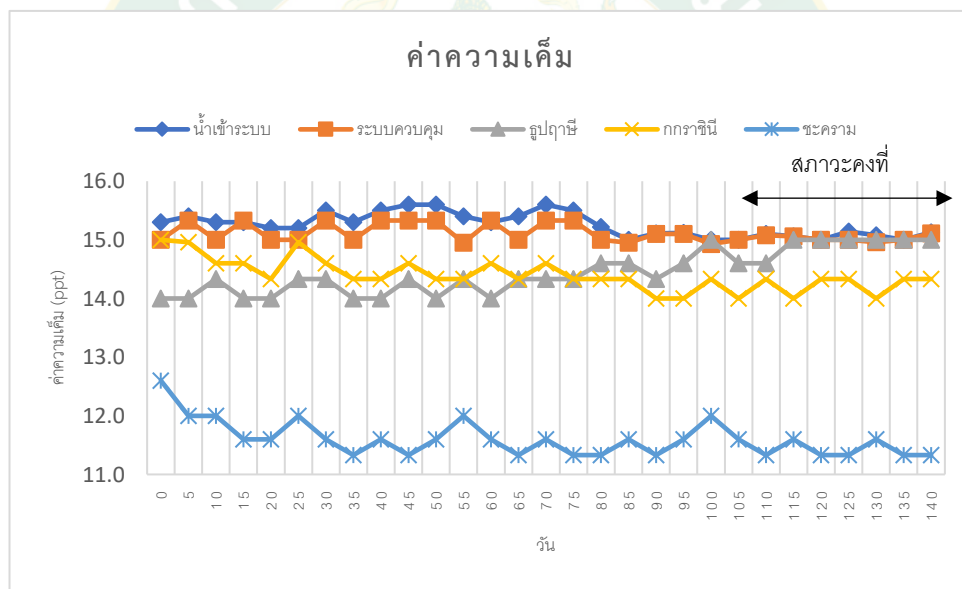
ราชนี และชะคราม เฉลี่ยใกล้เคียงกันโดยมีค่า 27.86 ± 0.02 , 27.86 ± 0.02 , 27.89 ± 0.03 และ 27.87 ± 0.03 °C ตามลำดับ (ตารางที่ 17) และเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากระบบอยู่ในสภาพที่ชุ่มน้ำ มีต้นพืชปกคลุม โดยระบบมีการคลุมพื้นผิวบ่อด้วยแสดนดำเพื่อลดการระเหยของน้ำ ลดการถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมเข้าสู่ภายในระบบ อีกทั้งยังลดการเพิ่มจำนวนของตะไคร่น้ำ

4.2 การบำบัดความเค็ม การนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย

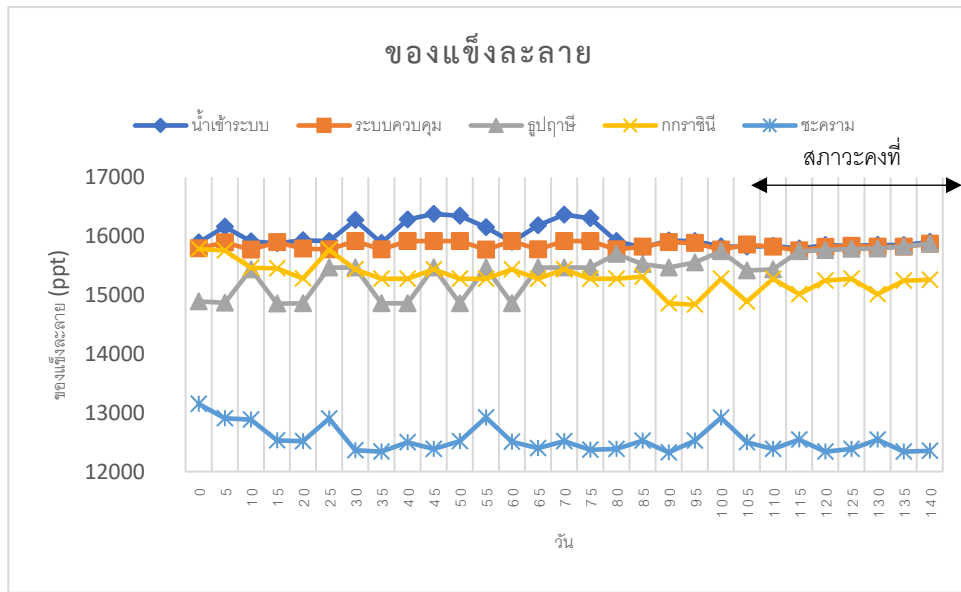
ค่าความเค็มของน้ำที่ก่อนเข้าสู่ระบบอยู่ในช่วง 14.6-16.5 ppt โดยหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 110-140 จากภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่า ความเค็มของน้ำที่ออกจากระบบที่มีชะครามสามารถลดความเค็มได้ดีที่สุด โดยมีความเค็มในน้ำที่ลดลงเหลือ 11.40 ± 0.13 ppt หรือคิดเป็นร้อยละ 24.4 ซึ่งดีที่สุดในเมื่อเทียบกับความเค็มของน้ำที่ออกจากระบบที่มี กกราชนี ฐปฤณี และ ระบบควบคุม ลดลงเหลือ 14.23 ± 0.16 14.49 ± 0.15 และ 15.03 ± 0.05 ppt ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 5.6 0.9 และ 0.3 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าความเค็มของน้ำที่ออกจากระบบที่มี ชะคราม และกกราชนีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 และพบว่าความเค็มของน้ำที่ออกจากระบบที่มี ฐปฤณีและระบบควบคุมไม่มีความแตกต่างกัน จากผลการทดลองใน ภาพที่ 24 จะสังเกตได้ว่าฐปฤณีนั้นค่อยๆเพิ่มขึ้น เทียบเท่ากับระบบควบคุม เนื่องจากความเค็มส่งผลกระทบให้เกิดความเป็นพิษของไอออนต่อฐปฤณี ส่งผลให้ฐปฤณีค่อยๆตายลงตั้งแต่วันที่ 85 เป็นต้นไป (ตารางที่ 17) ซึ่งงานวิจัยของ Zhu (2002) ได้กล่าวว่า ความเค็มที่สูงขึ้นจะขัดขวางการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืช และยังอาจนำไปสู่การเกิดความเป็นพิษของไอออน และทำให้เกิดความเครียดออสโมติกตามมา ซึ่งนำไปสู่การตายของพืช แต่อย่างไรก็ตามพืชทนเค็มแต่ละชนิดนั้นก็มีการป้องกันกันการเกิดความเป็นพิษของไอออน และปรับสมดุลออสโมติกเพื่อให้สามารถมีชีวิตอยู่ในสภาวะความเค็มนั้นๆได้ ทำให้ความสามารถในการทนเค็มของพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

นอกจากนี้ค่าความเค็มนั้นยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลาย (ภาพที่ 25, 26) พบว่า ค่าการนำไฟฟ้า และค่าของแข็งละลายของน้ำที่ก่อนเข้าสู่ระบบมีค่าอยู่ในช่วง 24.60-24.74 mS/cm และ 15,740-15,830 mg/l โดยหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า ชะครามสามารถบำบัดค่าการนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำที่ได้ดีที่สุด โดยอยู่ในช่วงค่า 19.28-19.30 mS/cm และ 12,339.20-12,544.00 mg/l เฉลี่ยลดลงเหลือ 19.39 ± 0.14 mS/cm และ $12,412 \pm 91.84$ mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 26 และ 27) เมื่อเทียบกับ กกราชนี ฐปฤณี และ

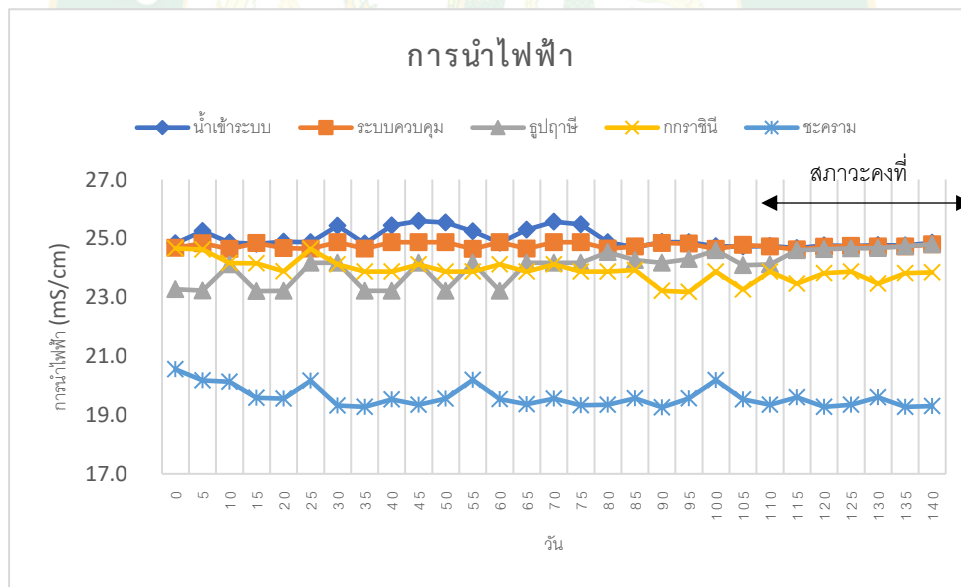
ระบบควบคุม โดยอยู่ในช่วงค่า 23.82-23.84 mS/cm 15,014.40-15,276.80 mg/l 24.73-24.80 mS/cm 15,436.80-15,872.00 mg/l และ 24.72-24.80 mS/cm 15,756.80-15872.00 mg/l ตามลำดับ เฉลี่ยลดลงเหลือ 23.73 ± 0.18 mS/cm $15,189 \pm 120.63$ mg/l 24.60 ± 0.22 mS/cm $15,744 \pm 142.32$ mg/l 24.72 ± 0.05 mS/cm และ $15,819 \pm 33.95$ mg/l ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าและของแข็งละลายที่ออกจากระบบที่มีชะคราม และกกราชินีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 และพบว่าค่าการนำไฟฟ้าและของแข็งละลายของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบที่มี ระบุฤๅษีและระบบควบคุมไม่มีความแตกต่างกัน (ตารางที่ 17) แต่อย่างไรก็ตาม ชะครามนั้นยังไม่สามารถบำบัด TDS ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษ ที่กำหนดค่า TDS ไม่เกิน 3,000 mg/l



ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่าความเค็มของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน

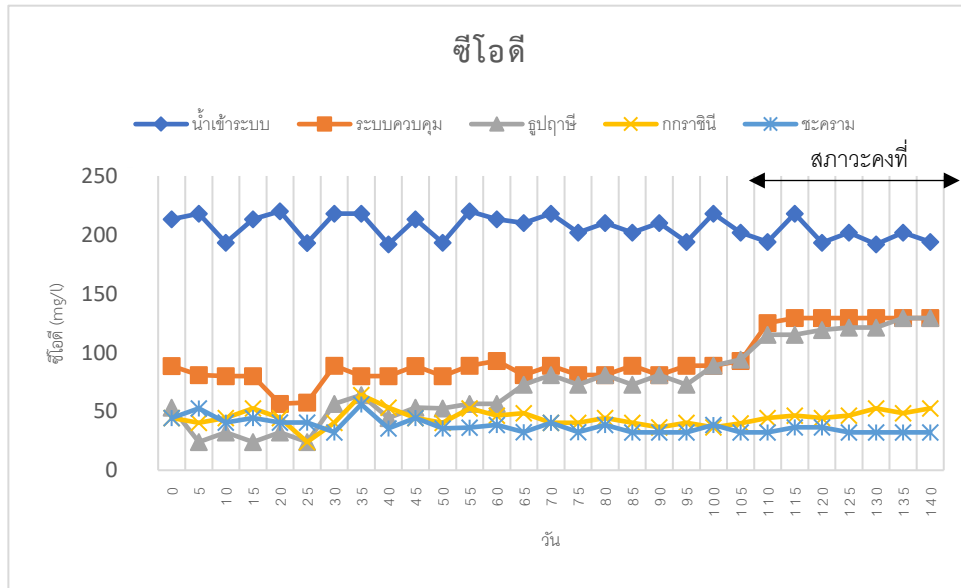


ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน

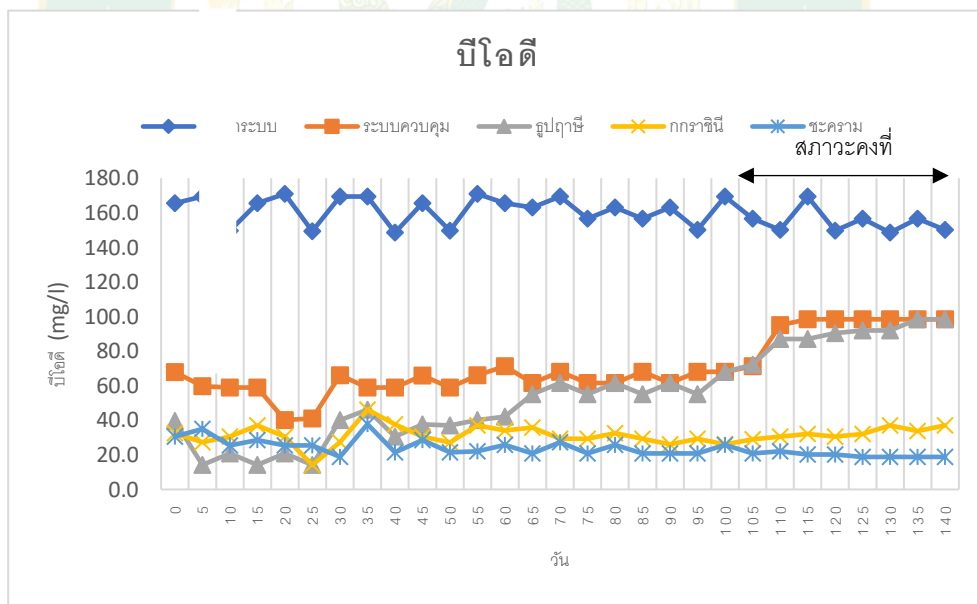
4.3 การบำบัดซีโอติและบีโอติ

ในการบำบัดซีโอติ พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน ที่มีชะครามีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติมากที่สุด โดยน้ำทิ้งที่เข้าระบบมีค่า ซีโอติ อยู่ในช่วง 192- 218 mg/l เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 110-140 ซีโอติลดลงเหลือ 33.47 ± 2.00 mg/l คิดเป็นร้อยละ 83.2 เมื่อเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนที่มี กกราชินี รูปฤๅษี และระบบควบคุม ที่ซีโอติลดลงเหลือ 47.87 ± 3.45 , 121.5 ± 5.89 และ 128.7 ± 1.58 mg/l ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 76.0, 39.0 และ 35.4 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าทุกชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (ตารางที่17) และ การบำบัด บีโอติ พบว่า ชะครามีประสิทธิภาพในการบำบัด บีโอติมากที่สุด โดยน้ำทิ้งที่เข้าระบบมีค่า บีโอติ อยู่ในช่วง 149.6-169.4 mg/l เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 110-140 บีโอติมีค่าลดลงเหลือ 19.67 ± 1.25 mg/l คิดเป็นร้อยละ 87.3 เมื่อเทียบกับ กกราชินี รูปฤๅษี และระบบควบคุม ที่บีโอติลดลงเหลือ 33.28 ± 2.77 , 92.20 ± 4.69 และ 97.92 ± 1.24 mg/l ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 78.4 40.3 และ 36.6 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่าทุกชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (ตารางที่ 17) โดยชะครามสามารถบำบัดค่าซีโอติ และ บีโอติ ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษได้ โดยมีเกณฑ์กำหนดไว้ที่ซีโอติไม่เกิน 120 mg/l และ บีโอติไม่เกิน 20 mg/l

สาเหตุที่รูปฤๅษีมีประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเนื่องจาก ในช่วงระยะเดือนแรกของการทดลองระบบยังมีรูปฤๅษีช่วยในการบำบัดซีโอติและบีโอติ แต่ความเป็นพิษของเกลือส่งผลให้รูปฤๅษีตายลง ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติและ บีโอติ นั้นลดลงมาเท่ากับระบบควบคุมที่มีเพียงกระบวนการจากกลไกทางกายภาพและจุลินทรีย์ภายในดิน เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Gao et al. (2015) ที่ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนในระบบบำบัดแบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนที่มีความเค็มที่ร้อยละ 0.5, 1, 1.5 ด้วย พุทธรักษา, อ้อเล็ก และ กก พบว่าอ้อเล็กสามารถบำบัดซีโอติได้ดีที่สุดที่ความเค็มร้อยละ 1.5 เฉลี่ยลดลงร้อยละ 61.5 โดยน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบเฉลี่ย 189.6 mg/l ซึ่งชะครามสามารถบำบัดได้ดีกว่าโดยลดลงร้อยละ 83.2 และในการทดลองของ Gao พบว่าเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของพืชนั้นลดลงตามไปด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอติ และบีโอติ แสดงดังภาพที่ 27 และ 28



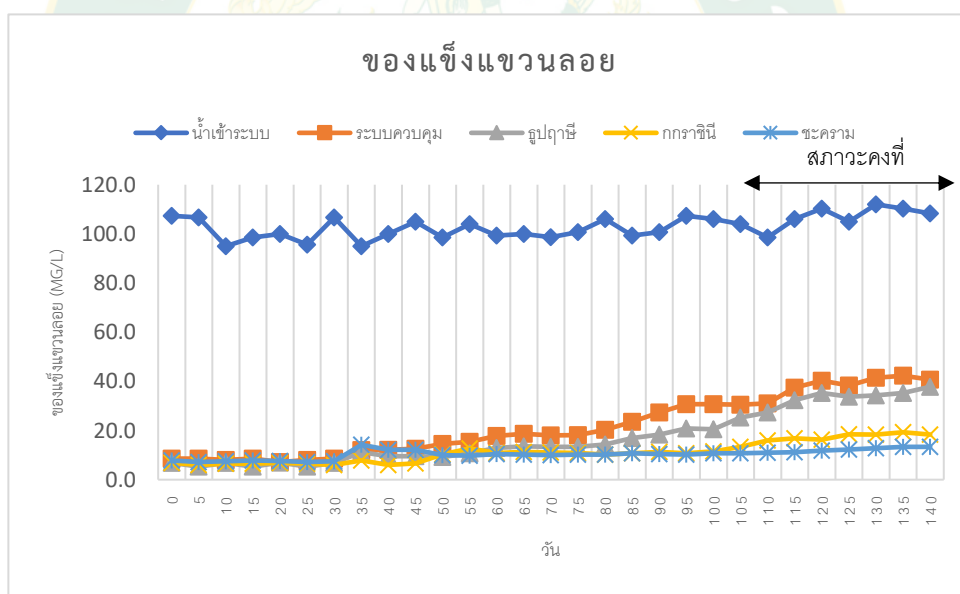
ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงค่าบีไอดีของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน

4.4 การบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอย มักถูกบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ เช่น การตกตะกอน หรือ การกรองโดยรากของพืช โดยของแข็งแขวนลอยในน้ำที่ก่อนเข้าสู่ระบบนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 98.5 - 107.3 mg/l เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 110-140 พบว่า ชะคราม สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยลดลงได้ดีที่สุด โดยลดลงเหลือ 12.24 ± 0.94 mg/l คิดเป็นร้อยละ 88.6 โดยเมื่อเทียบกับ กกราชินี รูปฤๅษี และระบบควบคุมที่ลดลงเหลือ 17.64 ± 1.26 33.74 ± 3.26 และ 38.80 ± 3.83 mg/l คิดเป็นร้อยละ 83.60 68.6 และ 63.8 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ทุกชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (ตารางที่ 17) โดยค่าของแข็งแขวนลอยของชะครามสามารถบำบัดให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน น้ำทิ้งอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 50 mg/l ได้



ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน

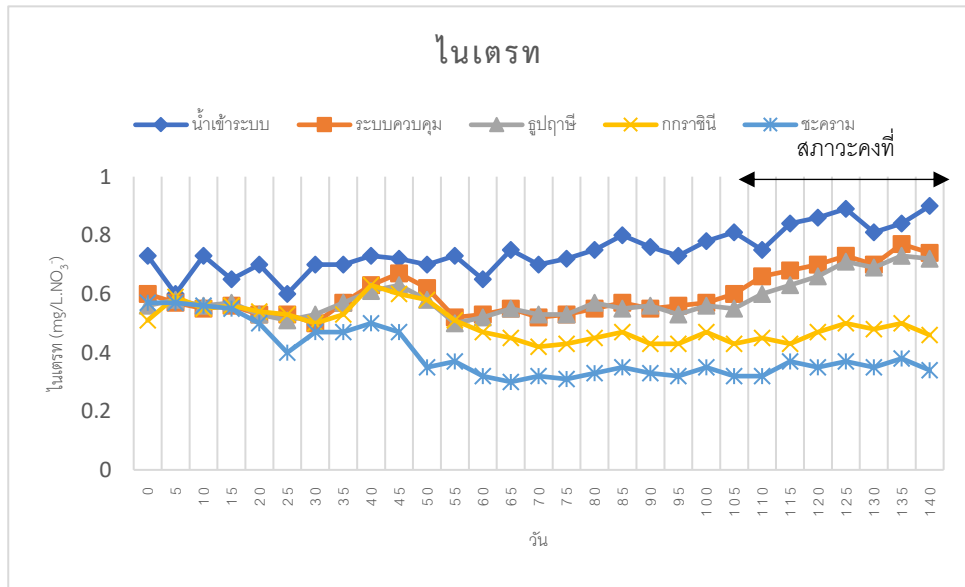
จากภาพที่ 29 การบำบัดของแข็งแขวนลอย นั้นในช่วงระยะแรกค่าของแข็งแขวนลอยจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ใกล้เคียงกับระบบควบคุม เนื่องจากในช่วงระยะแรกระบบจะใช้กลไกการตกตะกอน และการดูดซับผิวทางเคมีในส่วนของชั้นกรองในระบบ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปต้นพืชเจริญเติบโตมากขึ้น มีรากเพิ่มมากขึ้นการกระจายออกซิเจนเข้าสู่ระบบมากขึ้นทำให้มีกิจกรรมของ

จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแบบใช้อากาศเพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยมากขึ้น แต่การลดลงของรูปฤๅษีทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยลดลง เหมือนกับระบบควบคุมเนื่องจากไม่มีพืชช่วยในการเพิ่มออกซิเจนให้กับในระบบทำให้อัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศลดลงตามไปด้วย เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Klomjek and Nitorisavut (2005) ที่ทำการทดลองใช้พืช 8 ชนิด ในการบำบัดน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 14– 16 mS/cm บนระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ พบว่า รูปฤๅษี และ หญ้าขน สามารถบำบัด ของแข็งแขวนลอย ลดลงเหลือ 37.0 และ 29.8 mg/l ตามลำดับ จากน้ำเข้าที่มีค่าเฉลี่ย 97.7 และ 101.5 mg/l คิดเป็นร้อยละ 61 และ 67 ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถในการทดลองนี้บำบัดของแข็งแขวนลอยในช่วงค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าโดยอยู่ในช่วง 24.60-24.74 mS/cm และยังสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยลดลงได้ร้อยละ 88.6 ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่า

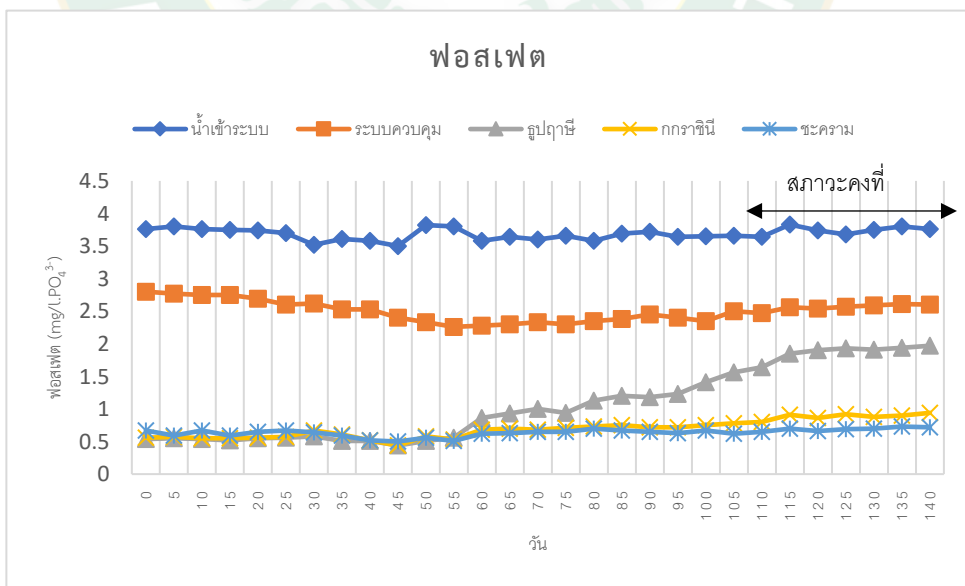
4.5 การบำบัดค่าไนเตรทและฟอสเฟต

ไนเตรท และฟอสเฟต ของน้ำทิ้งที่เข้าระบบ อยู่ในช่วงค่า 0.73-0.86 mg/L.NO₃⁻-N และ 3.58-3.83 mg/L .PO₄³⁻ เมื่อน้ำทิ้งผ่านการบำบัดเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 110-140 พบว่าจะสามารถลดไนเตรท ในน้ำทิ้งได้ดีที่สุด โดยเฉลี่ยลดลงเหลือ 0.35±0.02 mg/L. NO₃⁻-N คิดเป็นร้อยละ 58.3 เมื่อเทียบกับ กกราชินี รูปฤๅษี และระบบควบคุม โดย ไนเตรทลดลงเหลือ 0.47±0.02 0.67±0.04 และ 0.71±0.03 mg/L. NO₃⁻-N ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 44.0 20.2 และ 15.5 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ชะคราม และกกราชินีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 และพบว่ารูปฤๅษีและระบบควบคุมไม่มีความแตกต่างกัน ในส่วนของฟอสเฟต พบว่าชะครามสามารถลดฟอสเฟตในน้ำทิ้งได้ดีที่สุด โดยเฉลี่ยลดลงเหลือ 0.69±0.02 mg/L.PO₄³⁻ คิดเป็นร้อยละ 81.6 ฟอสเฟตลดลงเหลือ 0.88±0.04, 1.87±0.11 และ 2.56±0.04 mg/L.PO₄³⁻ ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 76.5, 50.0 และ 31.6 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (ตารางที่ 17) จากกราฟใน ภาพที่ 30 และ 31 พบว่า ค่าไนเตรท และฟอสเฟตของน้ำทิ้งหลังการบำบัดของรูปฤๅษี ลดลงเนื่องจากการตายของรูปฤๅษีเนื่องจากพืชเป็นหนึ่งในโลกไคที่ช่วยในการบำบัดค่าไนเตรทและฟอสเฟตให้ลดลง โดยเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Sepúlveda et al. (2020) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ กกอียิปต์ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่ระดับความเค็มที่ต่างกัน พบว่าค่าไนเตรท และ ฟอสเฟตของน้ำออกจากระบบที่มีค่าการนำไฟฟ้าตั้งแต่ 1 - 10 mS/cm โดยชุดทดลองที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่ 10 mS/cm มีค่าเฉลี่ยน้ำทิ้งหลังการบำบัดเท่ากับ 0.8 mg/L.NO₃⁻-N และ 8.8 mg/L.PO₄³⁻ คิดเป็นร้อยละอยู่ในช่วง 27.2 และ 20.0 ตามลำดับ ซึ่ง

ก่อนการทดลองไนเตรทและฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ $1.1 \text{ mg/L NO}_3\text{-N}$ และ $11.0 \text{ mg/L PO}_4^{3-}$ ซึ่ง
 กระทบในการทดลองนี้บำบัดไนเตรทและฟอสเฟตในช่วงค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าโดยอยู่ในช่วง
 $24.60\text{-}24.74 \text{ mS/cm}$ และยังสามารถบำบัดไนเตรทและฟอสเฟตลดลงได้ร้อยละ 58.33 และ 81.5
 ตามลำดับ อีกด้วย



ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน



ภาพที่ 31 การเปลี่ยนแปลงค่าฟอสเฟตของน้ำทิ้งที่ออกจาก HSCWs เป็นระยะเวลา 140 วัน

ตารางที่ 17 ตารางสรุปการเปรียบเทียบเชิงสถิติของน้ำทิ้งหลังการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินในแวนวนอน

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งหลังการบำบัด				
	คุณภาพน้ำทิ้ง	ระบบควบคุม	รูปถ่าย	กกราชินี	ชะคราม
พีเอช	ก่อนบำบัด 7.4-7.6	7.76±0.02 ^c	7.75±0.01 ^c	7.46±0.02 ^b	7.11±0.04 ^a
อุณหภูมิ (°C)	26.9-27.1	27.85±0.03 ^a	27.86±0.03 ^a	27.88±0.02 ^a	27.87±0.02 ^a
ซีไอที (mg/l)	192-218	128.7±1.58 ^d	121.5±5.89 ^c	47.87±3.45 ^b	33.47± 2.00 ^a
บีไอที (mg/l)	149.6-169.4	97.92±1.24 ^d	92.20±4.69 ^c	33.28±2.77 ^b	19.67±1.25 ^a
ความเค็ม (ppt)	14.6-16.5	15.03±0.05 ^c	14.94±0.15 ^c	14.23±0.16 ^b	11.40±0.13 ^a
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	24.1-26.9	24.71±0.05 ^c	24.60±0.22 ^c	23.73±0.18 ^b	19.39±0.14 ^a
ของแข็งละลาย (mg/l)	15,430-17,239	15,819±33.95 ^c	15744±142.31 ^c	15,189±120.63 ^b	12,412±91.84 ^a
ของแข็งแขวนลอย (mg/l)	98.5-107.3	38.8±3.83 ^d	33.74±3.26 ^c	17.64±1.26 ^b	12.24±0.94 ^a

ตารางที่ 17 ตารางสรุปการเปรียบเทียบเชิงสถิติของน้ำทิ้งหลังการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบปฏิกิริยาไหลผ่านใต้ดินในเนวมอน (ต่อ)

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำทิ้ง น้ำทิ้งหลังการบำบัด				
	ก่อนบำบัด	ระบบควบคุม	รูปถ่าย	การขี้น	ชะคราม
ไนเตรท (mg/L.NO ₃ ⁻)	0.73-0.86	0.71±0.03 ^c	0.67±0.04 ^c	0.47±0.02 ^b	0.35±0.02 ^a
ฟอสเฟต (mg/L .PO ₄ ³⁻)	3.58-3.83	2.56±0.04 ^d	1.87±0.11 ^c	0.88±0.04 ^b	0.69±0.02 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรเนวมอนที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.6 การวิเคราะห์โซเดียมในพืชทนเค็มและในชั้นตัวกลาง

หลังระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ในช่วงวันที่ 110-140 พบว่าชะคราม มีความสูงเพิ่มขึ้น 3.0 cm น้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น 267.52 g และมีโซเดียมเพิ่มขึ้น 25.12 g (ตารางที่ 18 และ 19) อีกทั้งยังสามารถปรับตัวอยู่ได้ในความเค็มระดับสูงด้วยกลไกการรวบน้ำ โดยการดูดน้ำเข้าไปสะสมในเนื้อเยื่อพืชมากขึ้น ทำให้ลดความเป็นพิษของโซเดียมในเซลล์ที่มีปริมาณมากกว่าปกติในพืช ทำให้เกิดการสมดุลย์ของแรงดันออสโมติกภายในต้น (อรุณี และสมศรี, 2542) (ภาพที่ 32) ในส่วนของกกราชินีมี มีความสูงเพิ่มขึ้น 6.5 cm มีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น 68 g และมีโซเดียมเพิ่มขึ้น 0.58 g และสุดท้ายคือรูปฤๅษี มีความสูงเพิ่มขึ้น 4.7 cm มีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น 76.92 g มีโซเดียมเพิ่มขึ้น 2.79 g (ตารางที่ 18 และ 19) ในช่วงระหว่างการทดลองหลังจากเริ่มเดินระบบการทดลองเป็นระยะเวลาประมาณ 2 เดือน ก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าต้นรูปฤๅษีมีอาการต้นเหลือง ใบไหม้ และเริ่มเปราะหักลงและตายลงเรื่อยๆ เป็นผลจากความเข้มข้นของเกลือและระยะเวลาที่ได้รับเกลือที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 33) โดยใบไหม้เกิดจากโซเดียมและคลอไรด์ เข้าไปตามระบบการคายน้ำและสะสมใน โซโตพลาซิมเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงระดับความเป็นพิษ จะทำให้เกิดการสูญเสียความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) ของเยื่อหุ้มเซลล์เกิดการไหลของน้ำออกนอกเซลล์ (Lauchli and Schubert, 1989) โดยความเป็นพิษของเกลือจะทำให้การเจริญเติบโตลดลงและแสดงอาการตอบสนองออกมา เช่น ความเครียดออสโมติก เนื่องจากการสะสมโซเดียมไอออนและ คลอไรด์ไอออนในผนังเซลล์ ทำให้เซลล์รากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง ทำให้เกิดอาการขาดธาตุอาหาร และการขาดน้ำ (Botella et al., 2005) ซึ่งการสะสมเกลือในต้นจนเกิดความเครียดออสโมติกนั้น พืชจะแสดงอาการผิดปกติออกมา เช่น ลำต้น แคร่แกร็น ใบเหี่ยว ใบแห้งตายเป็นจุด ๆ หรือขอบใบไหม้ เป็นต้น (Whiting et al., 2010) แต่ในส่วนของชะคราม และกกราชินีสามารถเจริญเติบโตในความเค็มของน้ำที่จากโรงงานฝัก และผลไม้ตอนนี้ได้ดี เนื่องจากชะครามและกกราชินีสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะความเค็มได้ด้วยกลไกหลีกเลี่ยงเกลือ (Salt avoidance) เช่น กลไกการรวบน้ำ ของชะคราม (ภาพที่ 33) เป็นต้น เพื่อลดความเป็นพิษจากเกลือ (อรุณี และสมศรี, 2542) โดยลักษณะของพืชก่อน และหลังการทดลอง แสดงดังภาพที่ 34 และ 35

ตารางที่ 18 ความสูงต้นพืชและน้ำหนักแห้งของต้นพืชทั้งหมดในระบบเฉลี่ย ก่อน-หลัง การทดลอง

ชนิดพืช	ก่อน		หลัง		ก่อน	หลัง	น้ำหนักแห้งที่ เพิ่มขึ้น (g)
	ความสูง (cm)	ความกว้าง ทรงพุ่ม (cm)	ความสูง (cm)	ความกว้าง ทรงพุ่ม (cm)			
ธูปฤๅษี	76.3±1.53	-	81.0±1.44	-	106.80±5.48	183.72±13.36	76.92
กกราชินี	73.7±1.45	-	80.2±1.48	-	98.60±2.00	166.60±17.72	68.00
ชะคราม	73.2±1.33	54.5±1.25	76.2±1.46	60.1±1.33	102.88±2.02	370.4±3.41	267.52

ตารางที่ 19 ปริมาณโซเดียมในต้นพืชทั้งหมดในระบบ ก่อน-หลัง การทดลอง

ชนิด	โซเดียม		โซเดียมที่เพิ่มขึ้น (g)
	ก่อนการทดลอง (g)	หลังการทดลอง (g)	
รูปฤๅษี	0.61	3.40	2.79
กกราชินี	0.20	0.78	0.58
ชะคราม	2.43	27.55	25.12

ในส่วนของพีเอชในดิน พบว่าก่อนการทดลองมีค่าเฉลี่ยที่ 6.7 เมื่อผ่านการทดลองจนเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า พีเอชในดิน ของ ระบบควบคุม รูปฤๅษี กกราชินี และชะคราม เฉลี่ยมีค่า 7.3, 7.4, 7.1 และ 7.3 ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยพีเอชที่ได้มีสภาวะเป็นกลาง ในส่วนของการนำไฟฟ้าในดินพบว่า การนำไฟฟ้า ก่อนการทดลองพบว่ามีอยู่เฉลี่ย 0.04 mS/cm แต่เมื่อหลังการทดลองพบว่าทุกระบบมีความการนำไฟฟ้าในดินเพิ่มขึ้นโดย ระบบควบคุม รูปฤๅษี กกราชินี และชะคราม เฉลี่ย 4.77, 4.20, 4.04 และ 3.85 mS/cm ตามลำดับ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเค็มในดิน โดยก่อนการทดลองพบว่ามีอยู่เฉลี่ย 0.02 ppt แต่เมื่อหลังการทดลองพบว่าทุกระบบมีความเค็มในดินเพิ่มขึ้นโดย ระบบควบคุม รูปฤๅษี กกราชินี และชะคราม เฉลี่ย 2.55, 2.23, 2.14 และ 2.03 ppt ตามลำดับ โดยชะครามมีความเค็มสะสมในดินน้อยที่สุด (ตารางที่ 20) แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าชะครามมีการสะสมโซเดียมมากที่สุดจากพืชทนเค็มทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมดุผลพบว่าปริมาณเกลือที่ถูกบำบัดในดินและพืชนั้นเฉลี่ยมีเพียงประมาณร้อยละ 14.5 ของปริมาณเกลือทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบที่ 13,062 g โดยเฉลี่ยเกลืออยู่ในพืชทั้ง 3 ชนิดอยู่ที่ร้อยละ 0.073 และเกลือในดินชั้นตัวกลางร้อยละ 14.4 ทำให้พืชทั้ง 3 ชนิด นั้นยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการบำบัดความเค็มจากน้ำทิ้งของโรงงานฝักและผลดองได้

ตารางที่ 20 ค่าเฉลี่ย พีเอช การนำไฟฟ้า และ ความเค็มสะสมในดิน ก่อน-หลัง การทดลอง

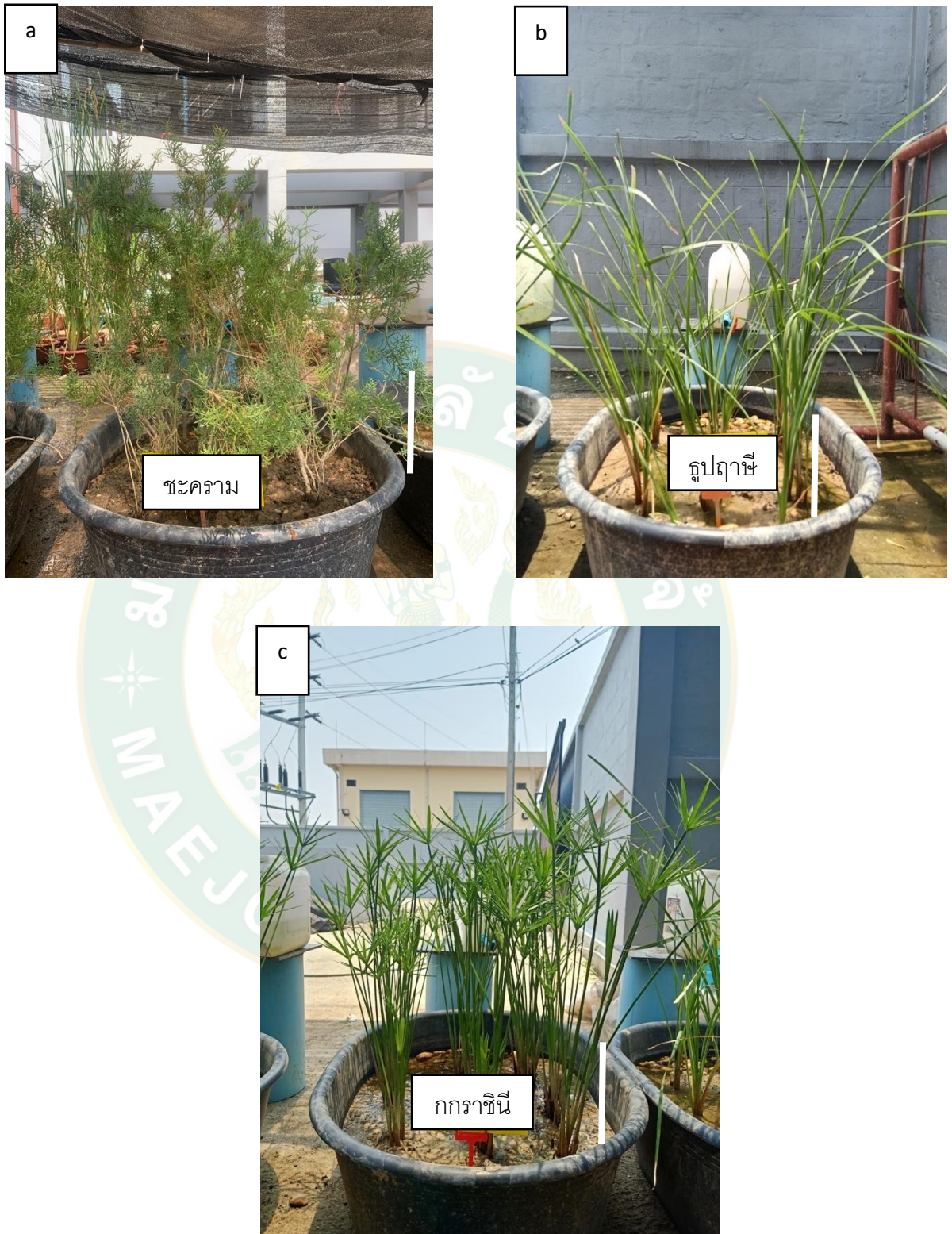
พารามิเตอร์	ดินก่อนการทดลอง	ดินหลังการทดลอง			
	ทดลอง	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
พีเอช	6.70±0.19	7.30±0.16	7.44±0.18	7.17±0.17	7.34±0.16
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	0.04±0.05	4.77±0.20	4.20±0.18	4.04±0.16	3.85±0.16
ความเค็ม (ppt)	0.02±0.05	2.55±0.12	2.23±0.16	2.14±0.13	2.03±0.15



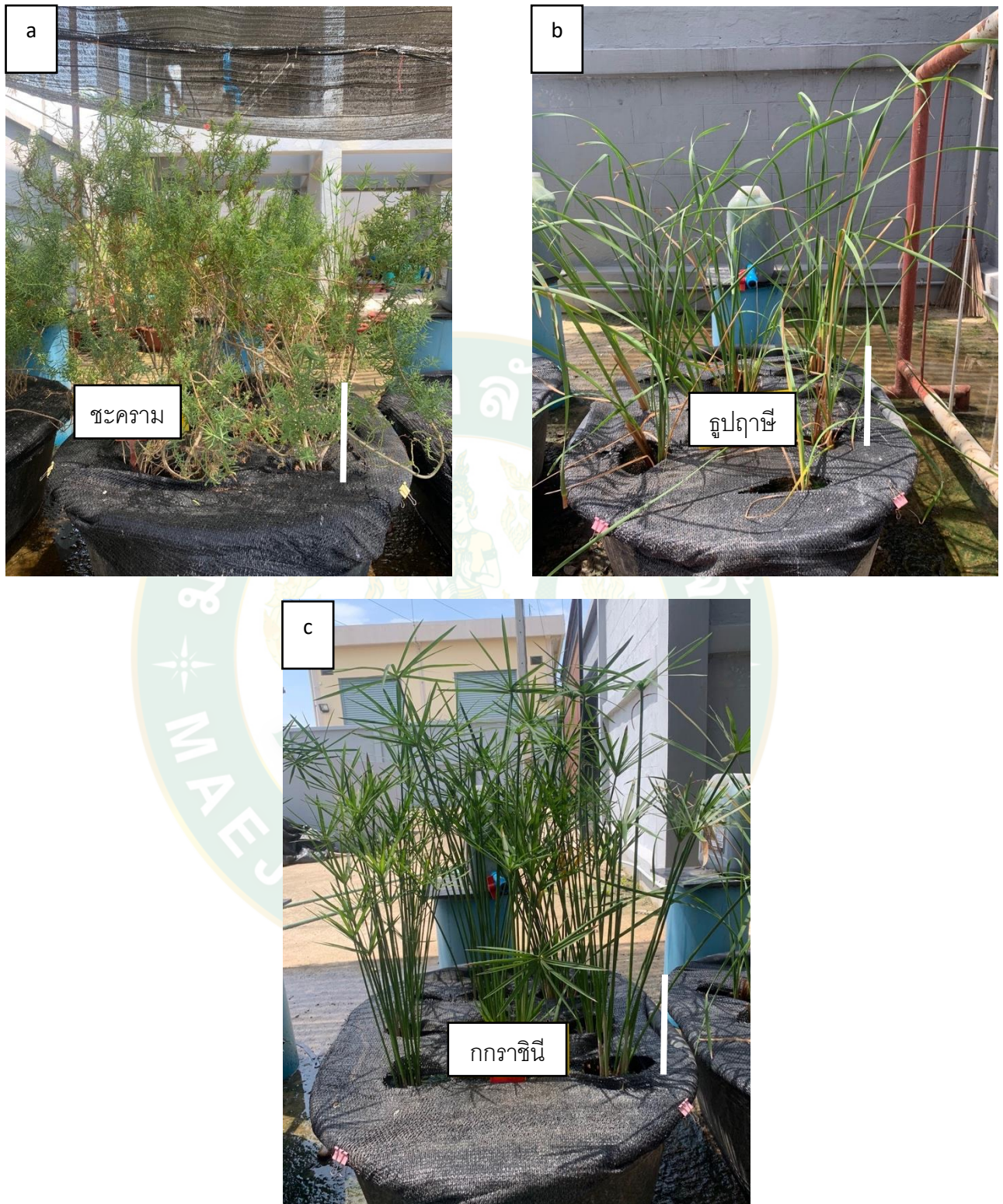
ภาพที่ 32 ลักษณะใบของชะคราม หลังการทดลอง ที่มีการอบน้ำ (Succulence)
(Scale bar 2 ซม.)



ภาพที่ 33 การแสดงอาการของ ฐปฤษี เมื่อได้รับสภาวะความเค็มอย่างต่อเนื่อง (Scale bar 2 ซม.)



ภาพที่ 34 ลักษณะต้นพืชในระบบก่อนการทดลอง
 หมายเหตุ: a.) ชะคราม (b.) ธูปฤาษี c.) กกราชีนี (Scale bar 16 ซม.)



ภาพที่ 35 ลักษณะต้นพืชในระบบหลังการทดลอง
 หมายเหตุ: a.) ชะคราม (b.) ธูปฤๅษี c.) กกราชินี (Scale bar 16 ซม.)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการคัดเลือกและศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอนสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การศึกษาการคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการทนความเค็ม

ผลการทดลองพบว่า หญ้าแฝก ฐฤกษ์ สามารถทนความเค็มได้ที่ความเข้มข้น 12 และ 15 ppt ตามลำดับ ในส่วนของ กกราชินี และชะคราม สามารถทนความเค็มได้ที่ความเข้มข้น 18 ppt เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ออกจากบ่อพักน้ำของโรงงานฝักและผลไม้ดองที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงค่า 14.6-16.5 ppt ได้ ดังนั้น จากการคัดเลือกพืชทนเค็มที่สามารถทนต่อสภาวะความเค็มของน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองได้ ได้แก่ ฐฤกษ์ กกราชินี และชะคราม

2. ศึกษาประสิทธิภาพของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

2.1 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งของพืชทนเค็มในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินแนวนอน

ชะคราม มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งได้ดีที่สุด โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของ ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความเค็ม การนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ไนเตรท และฟอสเฟต มีค่าร้อยละ 83.2 87.3 88.6 24.4 21.7 21.7 58.3 และ 81.6 ตามลำดับ ในส่วนของกกราชินีนั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดรองลงมา และฐฤกษ์ไม่สามารถบำบัดได้ เนื่องจากการตายจากสภาวะความเป็นพิษของไอออนทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดทำได้ใกล้เคียงกับระบบควบคุม

2.2 การวิเคราะห์โซเดียมในพืชหน่อกิ่ง และในชั้นตัวกลาง

ชะครามสามารถปรับตัวและเจริญในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ที่มีความเค็มของโรงงานฝักและผลไม้ดองได้ดีที่สุดจากพืชหน่อกิ่งทั้งหมด และมีโซเดียมเพิ่มขึ้นภายในต้น 25.12 g แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมมูลมวลพบว่าปริมาณเกลือที่ถูกบำบัดในดินและพืชนั้นเฉลี่ยมีเพียงประมาณร้อยละ 14.5 ของปริมาณเกลือทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบที่ 13,062 g โดยเฉลี่ยอยู่ในพืชทั้ง 3 ชนิดคิดเป็นร้อยละ 0.073 และในดินชั้นตัวกลาง ร้อยละ 14.4 ทำให้พืชทั้ง 3 ชนิดนั้นยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการบำบัดความเค็มจากน้ำทิ้งของโรงงานฝักและผลไม้ดองได้

ดังนั้นจากผลการศึกษาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของพืชหน่อกิ่งในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองโดยใช้พืชหน่อกิ่งในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอนสรุปได้ว่า ชะครามสามารถช่วยในการบำบัด ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย และธาตุอาหาร ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมได้ และยังสามารถปรับตัวในการเจริญเติบโตและทนต่อสภาวะความเค็มในระบบในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฝักและผลไม้ดองได้ แต่อย่างไรก็ตามชะครามนั้นยังไม่สามารถบำบัดความเค็มให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากผลวิจัยพบว่าการใช้ชะครามในการทดลองนี้ยังไม่สามารถบำบัดความเค็มให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษได้ โดยข้อเสนอแนะสำหรับนำไปปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องในงานวิจัยคือ

- 1.) ควรมีการศึกษาต่อเนื่องในระยะเวลาที่นานขึ้น เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งในสภาพธรรมชาติและคาบเกี่ยวกับ 3 ฤดู เพื่อทราบถึงอิทธิพลของฝนและอุณหภูมิ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้ง
- 2.) ควรศึกษาเปรียบเทียบชะครามกับต้นพืชชนิดอื่นๆ ที่มีความสามารถทนเค็มได้เท่ากัน หรือมากกว่า เพื่อหาพืชที่มีความสามารถในการบำบัดความเค็มได้ดียิ่งขึ้น หรือสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันในการศึกษา
- 3.) ควรศึกษาระบบชั้นกรอง ได้แก่ ชนิดของดินสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ลักษณะของชั้นกรอง เพื่อที่จะสามารถดูดซับปริมาณเกลือได้มากขึ้นเนื่องจากเห็นได้ว่าระบบชั้นกรองมีส่วนช่วยในการดูดซับและกรองความเค็มให้ลดลงได้
- 4.) ควรศึกษาถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อ การบำบัดความเค็มในระบบ เช่น ชนิดของสาหร่าย จุลินทรีย์ การเก็บเกี่ยว การวัดสมมูลมวลสารของเกลือที่เข้าไปในระบบว่าถูกบำบัดไปในปัจจัยใดบ้าง
- 5.) ควรศึกษาถึงกลไกของพืชทนเค็มเชิงลึกทางสรีรวิทยา เพื่อให้เข้าใจกลไกการทำงานของพืชทนเค็มมากขึ้น เช่น ปริมาณเอนไซม์ที่ส่งผลต่อความเครียด การสะสมความเค็มไว้ในส่วนใดของพืชมากที่สุด เป็นต้น



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองวิเคราะห์น้ำเสีย

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ซีโอดี

วันที่	ซีโอดี (mg/l)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปถ่าย	กกราชินี	ชะคราม
0	213.3	88.7	53.3	44.4	44.4
5	218.0	80.8	24.0	40.4	52.5
10	193.3	80.0	32.3	44.4	40.5
15	213.3	80.0	24.0	52.5	44.4
20	220.0	56.5	32.3	44.4	40.5
25	193.0	57.6	24.0	24.0	40.5
30	218.0	88.8	56.5	40.4	32.3
35	218.0	80.0	64.0	64.0	56.0
40	192.0	80.0	44.4	53.3	35.5
45	213.3	88.7	53.3	44.4	44.4
50	193.3	80.0	52.5	40.3	35.5
55	220.0	88.8	56.5	52.5	36.4
60	213.3	92.9	56.5	46.4	38.5
65	210.1	80.8	72.7	48.5	32.3
70	218.1	88.8	80.8	40.4	40.4
75	202.0	80.8	72.7	40.4	32.3
80	210.1	80.8	80.8	44.4	38.5
85	202.0	88.8	72.7	40.4	32.3
90	210.1	80.8	80.8	36.4	32.3
95	193.9	88.8	72.7	40.4	32.3
100	218.0	88.8	88.8	36.4	38.5
105	202.0	92.9	94.0	40.0	32.3
110	193.9	125.1	115.1	44.4	32.3
115	218.0	129.3	115.1	46.4	36.4
120	193.3	129.3	119.3	44.4	36.4
125	202.0	129.3	121.2	46.4	32.3
130	192.0	129.3	121.2	52.5	32.3
135	202.0	129.3	129.3	48.5	32.3
140	193.9	129.3	129.3	52.5	32.3

ตารางที่2 ผลการวิเคราะห์บีโอดี

วันที่	บีโอดี (mg/l)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปถ่าย	กกราชินี	ชะคราม
0	165.6	67.9	39.6	32.5	30.5
5	169.4	59.7	14.2	27.3	35.0
10	149.6	59.0	20.8	30.5	25.4
15	165.6	59.0	14.2	37.0	28.5
20	171.0	40.2	20.8	30.5	25.4
25	149.4	41.1	14.2	14.2	25.4
30	169.4	66.1	40.2	27.3	18.8
35	169.4	59.0	46.2	46.2	37.8
40	148.6	59.0	30.5	37.6	21.4
45	165.6	65.9	37.6	30.5	28.5
50	149.6	59.0	37.0	27.2	21.4
55	171.0	66.0	40.2	37.0	22.1
60	165.6	71.3	42.2	34.1	25.8
65	163.1	61.6	55.2	35.8	20.9
70	169.5	68.0	61.6	29.3	27.3
75	156.6	61.6	55.2	29.3	20.9
80	163.1	61.6	61.6	32.5	25.8
85	156.6	68.0	55.2	29.3	20.8
90	163.1	61.6	61.6	26.1	20.8
95	150.1	68.0	55.2	29.3	20.8
100	169.4	68.0	68.0	26.1	25.8
105	156.6	71.3	72.2	29.0	20.8
110	150.1	95.1	87.1	30.5	22.1
115	169.4	98.4	87.1	32.1	20.2
120	149.6	98.4	90.4	30.5	20.2
125	156.6	98.4	92.0	32.1	18.8
130	148.6	98.4	92.0	37.0	18.8
135	156.6	98.4	98.4	33.8	18.8
140	150.1	98.4	98.4	37.0	18.8

ตารางที่3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเค็ม

วันที่	ค่าความเค็ม (ppt)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
0	15.3	15.0	14.0	15.0	12.6
5	15.4	15.3	14.0	15.0	12.0
10	15.3	15.0	14.3	14.6	12.0
15	15.3	15.3	14.0	14.6	11.6
20	15.2	15.0	14.0	14.3	11.6
25	15.2	15.0	14.3	15.0	12.0
30	15.5	15.3	14.3	14.6	11.6
35	15.3	15.0	14.0	14.3	11.3
40	15.5	15.3	14.0	14.3	11.6
45	15.6	15.3	14.3	14.6	11.3
50	15.6	15.3	14.0	14.3	11.6
55	15.4	15.0	14.3	14.3	12.0
60	15.3	15.3	14.0	14.6	11.6
65	15.4	15.0	14.3	14.3	11.3
70	15.6	15.3	14.3	14.6	11.6
75	15.5	15.3	14.3	14.3	11.3
80	15.2	15.0	14.6	14.3	11.3
85	15.0	15.0	14.6	14.3	11.6
90	15.1	15.1	14.3	14.0	11.3
95	15.1	15.1	14.6	14.0	11.6
100	15.0	14.9	15.0	14.3	12.0
105	15.0	15.0	14.6	14.0	11.6
110	15.1	15.1	14.6	14.3	11.3
115	15.1	15.1	15.0	14.0	11.6
120	15.0	15.0	15.0	14.3	11.3
125	15.1	15.0	15.0	14.3	11.3
130	15.1	15.0	15.0	14.0	11.6
135	15.0	15.0	15.0	14.3	11.3
140	15.1	15.1	15.0	14.3	11.3

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า

วันที่	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
0	24.83	24.68	23.27	24.66	20.55
5	25.25	24.83	23.23	24.62	20.17
10	24.86	24.64	24.12	24.16	20.13
15	24.81	24.84	23.21	24.15	19.58
20	24.89	24.67	23.22	23.88	19.56
25	24.87	24.65	24.17	24.64	20.16
30	25.43	24.87	24.17	24.12	19.32
35	24.82	24.65	23.22	23.87	19.28
40	25.44	24.87	23.22	23.87	19.53
45	25.59	24.87	24.17	24.12	19.35
50	25.54	24.87	23.22	23.87	19.56
55	25.24	24.64	24.17	23.87	20.19
60	24.85	24.87	23.22	24.12	19.54
65	25.29	24.65	24.17	23.87	19.37
70	25.57	24.87	24.17	24.12	19.56
75	25.48	24.87	24.17	23.87	19.33
80	24.87	24.65	24.53	23.87	19.35
85	24.70	24.72	24.26	23.93	19.57
90	24.88	24.84	24.17	23.22	19.26
95	24.87	24.82	24.30	23.18	19.57
100	24.73	24.64	24.60	23.87	20.18
105	24.72	24.78	24.09	23.26	19.53
110	24.74	24.72	24.12	23.87	19.35
115	24.67	24.62	24.60	23.46	19.60
120	24.76	24.71	24.63	23.82	19.28
125	24.74	24.74	24.66	23.87	19.35
130	24.77	24.72	24.67	23.46	19.60
135	24.76	24.72	24.73	23.82	19.28
140	24.85	24.80	24.80	23.84	19.30

ตารางที่5 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งละลาย

วันที่	ค่าของแข็งละลาย (mg/l)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
0	15891.2	15795.2	14892.8	15782.4	13152.0
5	16160.0	15891.2	14867.2	15756.8	12908.8
10	15910.4	15769.6	15436.8	15462.4	12883.2
15	15878.4	15897.6	14854.4	15456.0	12531.2
20	15929.6	15788.8	14860.8	15283.2	12518.4
25	15916.8	15776.0	15468.8	15769.6	12902.4
30	16275.2	15916.8	15468.8	15436.8	12364.8
35	15884.8	15776.0	14860.8	15276.8	12339.2
40	16281.6	15916.8	14860.8	15276.8	12499.2
45	16377.6	15916.8	15468.8	15436.8	12384.0
50	16345.6	15916.8	14860.8	15276.8	12518.4
55	16153.6	15769.6	15468.8	15276.8	12921.6
60	15904.0	15916.8	14860.8	15436.8	12505.6
65	16185.6	15776.0	15468.8	15276.8	12396.8
70	16364.8	15916.8	15468.8	15436.8	12518.4
75	16307.2	15916.8	15468.8	15276.8	12371.2
80	15916.8	15776.0	15699.2	15276.8	12384.0
85	15808.0	15820.8	15526.4	15315.2	12524.8
90	15923.2	15897.6	15468.8	14860.8	12326.4
95	15916.8	15884.8	15552.0	14835.2	12524.8
100	15827.2	15769.6	15744.0	15276.8	12915.2
105	15820.8	15859.2	15417.6	14886.4	12499.2
110	15833.6	15820.8	15436.8	15276.8	12384.0
115	15788.8	15756.8	15744.0	15014.4	12544.0
120	15846.4	15814.4	15763.2	15244.8	12339.2
125	15833.6	15833.6	15782.4	15276.8	12384.0
130	15852.8	15820.8	15788.8	15014.4	12544.0
135	15846.4	15820.8	15827.2	15244.8	12339.2
140	15904.0	15872.0	15872.0	15257.6	12352.0

ตารางที่6 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย

วันที่	ค่าของแข็งแขวนลอย (mg/L)					ชะคราม
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี		
0	107.3	8.6	6.8	6.8	6.8	7.8
5	106.7	8.6	5.3	6.0	6.0	7.2
10	95.0	8.0	6.8	6.5	6.5	7.5
15	98.5	8.6	5.3	6.5	6.5	7.8
20	100.0	7.2	6.9	6.8	6.8	7.6
25	95.7	8.0	5.3	6.5	6.5	7.2
30	106.7	8.6	6.8	6.0	6.0	7.5
35	95.0	12.0	11.2	7.8	7.8	14.2
40	100.0	12.2	9.6	6.0	6.0	12.1
45	105.0	12.6	9.6	6.6	6.6	12.2
50	98.5	14.5	9.2	10.3	10.3	10.0
55	104.0	15.4	10.7	12.7	12.7	9.8
60	99.3	17.8	12.9	10.9	10.9	10.4
65	100.0	18.7	13.6	11.3	11.3	10.2
70	98.7	18.0	13.3	11.1	11.1	10.0
75	100.7	18.1	13.3	10.9	10.9	10.2
80	106.0	20.3	14.3	10.2	10.2	10.2
85	99.3	23.6	16.9	10.7	10.7	10.7
90	100.7	27.4	18.3	11.3	11.3	10.4
95	107.3	30.7	20.8	10.7	10.7	10.2
100	106.0	30.7	20.5	11.5	11.5	10.7
105	104.0	30.5	25.3	13.3	13.3	10.8
110	98.5	31.0	27.4	16.0	16.0	11.0
115	106.0	37.5	32.3	16.8	16.8	11.2
120	110.3	40.3	35.3	16.3	16.3	11.8
125	105.0	38.3	33.8	18.5	18.5	12.3
130	112.0	41.5	34.3	18.3	18.3	12.8
135	110.3	42.3	35.3	19.3	19.3	13.3
140	108.3	40.7	37.8	18.3	18.3	13.3

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ค่าไนเตรท

วันที่	ค่าไนเตรท (mg/l- NO ₃)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
0	0.73	0.60	0.56	0.51	0.57
5	0.6	0.57	0.58	0.59	0.57
10	0.73	0.55	0.56	0.55	0.56
15	0.65	0.56	0.57	0.56	0.55
20	0.7	0.53	0.53	0.54	0.5
25	0.6	0.53	0.51	0.53	0.40
30	0.7	0.50	0.53	0.50	0.47
35	0.7	0.57	0.57	0.53	0.47
40	0.73	0.63	0.61	0.63	0.50
45	0.72	0.67	0.63	0.60	0.47
50	0.7	0.62	0.58	0.58	0.35
55	0.73	0.52	0.50	0.51	0.37
60	0.65	0.53	0.52	0.47	0.32
65	0.75	0.55	0.55	0.45	0.30
70	0.7	0.52	0.53	0.42	0.32
75	0.72	0.53	0.53	0.43	0.31
80	0.75	0.55	0.57	0.45	0.33
85	0.80	0.57	0.55	0.47	0.35
90	0.76	0.55	0.56	0.43	0.33
95	0.73	0.56	0.53	0.43	0.32
100	0.78	0.57	0.56	0.47	0.35
105	0.81	0.60	0.55	0.43	0.32
110	0.75	0.66	0.60	0.45	0.32
115	0.84	0.68	0.63	0.43	0.37
120	0.86	0.70	0.66	0.47	0.35
125	0.89	0.73	0.71	0.50	0.37
130	0.81	0.70	0.69	0.48	0.35
135	0.84	0.77	0.73	0.50	0.38
140	0.90	0.74	0.72	0.46	0.34

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสเฟต

วันที่	ค่าฟอสเฟต (mg/l-PO ₄ ³⁻)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
0	3.76	2.80	0.54	0.56	0.67
5	3.80	2.77	0.55	0.57	0.59
10	3.76	2.75	0.54	0.55	0.67
15	3.75	2.75	0.52	0.55	0.59
20	3.74	2.69	0.55	0.56	0.65
25	3.70	2.60	0.56	0.57	0.67
30	3.52	2.62	0.58	0.67	0.64
35	3.61	2.53	0.51	0.61	0.59
40	3.58	2.53	0.51	0.52	0.52
45	3.50	2.40	0.44	0.44	0.50
50	3.82	2.33	0.51	0.58	0.56
55	3.80	2.26	0.56	0.53	0.51
60	3.58	2.28	0.86	0.68	0.62
65	3.64	2.30	0.93	0.70	0.63
70	3.60	2.33	1.00	0.68	0.65
75	3.66	2.30	0.94	0.71	0.65
80	3.58	2.35	1.13	0.73	0.70
85	3.69	2.38	1.20	0.75	0.67
90	3.72	2.45	1.18	0.72	0.65
95	3.64	2.40	1.23	0.72	0.63
100	3.65	2.35	1.41	0.75	0.67
105	3.66	2.50	1.56	0.78	0.62
110	3.64	2.47	1.64	0.80	0.65
115	3.83	2.56	1.85	0.91	0.70
120	3.74	2.54	1.90	0.86	0.66
125	3.68	2.57	1.93	0.92	0.69
130	3.75	2.59	1.91	0.88	0.70
135	3.80	2.61	1.94	0.90	0.73
140	3.76	2.60	1.97	0.94	0.72

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช

วันที่	ค่าพีเอช				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
0	7.6	7.6	7.8	7.4	7.0
5	7.5	7.6	7.8	7.4	7.0
10	7.6	7.7	7.7	7.5	7.0
15	7.5	7.7	7.7	7.5	7.0
20	7.6	7.6	7.8	7.5	7.1
25	7.5	7.7	7.7	7.5	7.1
30	7.5	7.7	7.8	7.5	7.1
35	7.6	7.6	7.7	7.4	7.1
40	7.6	7.6	7.7	7.4	7.0
45	7.7	7.7	7.7	7.4	6.9
50	7.6	7.8	7.8	7.4	7.0
55	7.5	7.8	7.8	7.4	7.0
60	7.5	7.7	7.7	7.4	7.0
65	7.7	7.8	7.7	7.4	7.0
70	7.6	7.7	7.7	7.4	7.0
75	7.6	7.8	7.7	7.4	7.0
80	7.5	7.8	7.8	7.4	7.0
85	7.5	7.8	7.8	7.4	7.0
90	7.6	7.8	7.8	7.5	6.9
95	7.6	7.7	7.7	7.4	7.0
100	7.6	7.8	7.8	7.4	7.1
105	7.6	7.7	7.7	7.5	7.0
110	7.4	7.8	7.7	7.4	7.0
115	7.5	7.8	7.8	7.4	7.1
120	7.6	7.7	7.8	7.5	7.1
125	7.6	7.8	7.7	7.4	7.1
130	7.6	7.7	7.8	7.5	7.2
135	7.5	7.8	7.7	7.5	7.2
140	7.5	7.8	7.8	7.5	7.1

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิ

วันที่	ค่าอุณหภูมิ (°C)				
	น้ำเข้าระบบ	ระบบควบคุม	รูปฤๅษี	กกราชินี	ชะคราม
0	27.4	28.4	28.2	28.3	28.2
5	27.2	28.3	28.2	28.3	28.2
10	27.3	28.2	28.4	28.3	28.2
15	27.2	28.2	28.3	28.3	28.1
20	27.2	28.3	28.2	28.2	28.2
25	27.4	28.4	28.4	28.4	28.2
30	27.4	28.3	28.2	28.3	28.2
35	27.4	28.2	28.2	28.2	28.2
40	27.2	28.2	28.3	28.3	28.1
45	27.3	28.2	28.4	28.3	28.1
50	27.2	28.3	28.2	28.3	28.2
55	27.3	28.2	28.2	28.2	28.2
60	27.3	28.2	28.3	28.3	28.1
65	27.2	28.3	28.2	28.2	28.2
70	27.3	28.2	28.4	28.3	28.1
75	27.3	28.3	28.2	28.3	28.2
80	27.4	28.2	28.2	28.2	28.2
85	27.1	28.2	28.3	28.3	28.1
90	27.2	28.3	28.2	28.2	28.2
95	27.3	28.2	28.2	28.3	28.3
100	27.2	28.0	28.0	27.9	28.1
105	27.2	27.9	28.0	27.9	28.0
110	27.2	27.9	27.9	27.9	27.9
115	27.0	27.9	27.9	27.9	27.9
120	27.1	27.8	27.9	27.9	27.9
125	27.3	27.8	27.8	27.9	27.9
130	27.2	27.9	27.9	27.9	27.9
135	27.1	27.8	27.8	27.9	27.9
140	27.2	27.8	27.9	27.9	27.8



ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าซีไอดี

Descriptives

COD

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	128.7000	1.58745	.60000	127.2319	130.1681
T.angustifolia	7	121.5000	5.89661	2.22871	116.0465	126.9535
C.alternifolius	7	47.8714	3.45626	1.30634	44.6749	51.0679
S.maritima	7	33.4714	2.00060	.75615	31.6212	35.3217
Total	28	82.8857	43.51412	8.22339	66.0127	99.7587

Homogeneous Subsets

COD

		N	Subset for alpha = 0.05			
			1	2	3	4
Duncan ^a	S.maritima	7	33.4714			
	C.alternifolius	7		47.8714		
	T.angustifolia	7			121.5000	
	Control	7				128.7000
	Sig.			1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.



ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าบีโอดี

Descriptives

BOD

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	97.9286	1.24728	.47143	96.7750	99.0821
T.angustifolia	7	92.2000	4.69432	1.77429	87.8585	96.5415
C.alternifolius	7	33.2857	2.77454	1.04868	30.7197	35.8517
S.maritima	7	19.6714	1.25793	.47545	18.5080	20.8348
Total	28	60.7714	35.42797	6.69526	47.0339	74.5090

Homogeneous Subsets

BOD

		N	Subset for alpha = 0.05			
			1	2	3	4
Duncan ^a	S.maritima	7	19.6714			
	C.alternifolius	7		33.2857		
	T.angustifolia	7			92.2000	
	Control	7				97.9286
	Sig.			1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าความเค็ม

Descriptives

salinity						
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	15.0300	.05385	.02035	14.9802	15.0798
T.angustifolia	7	14.9429	.15119	.05714	14.8030	15.0827
C.alternifolius	7	14.2357	.16102	.06086	14.0868	14.3846
S.maritima	7	11.4071	.13175	.04980	11.2853	11.5290
Total	28	13.9039	1.50621	.28465	13.3199	14.4880

Homogeneous Subsets

salinity					
		N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Duncan ^a	S.maritima	7	11.4071		
	C.alternifolius	7		14.2357	
	T.angustifolia	7			14.9429
	Control	7			15.0300
	Sig.			1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าการนำไฟฟ้า

Descriptives						
Ec						
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	24.7186	.05305	.02005	24.6695	24.7676
T.angustifolia	7	24.6014	.22237	.08405	24.3958	24.8071
C.alternifolius	7	23.7343	.18849	.07124	23.5600	23.9086
S.maritima	7	19.3943	.14351	.05424	19.2616	19.5270
Total	28	23.1121	2.22533	.42055	22.2492	23.9750

Homogeneous Subsets

Ec					
		N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Duncan ^a	S.maritima	7	19.3943		
	C.alternifolius	7		23.7343	
	T.angustifolia	7			24.6014
	Control	7			24.7186
	Sig.		1.000	1.000	.196

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าของแข็งละลาย

Descriptives

TDS

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	15819.8857	33.95190	12.83261	15788.4854	15851.2860
T.angustifolia	7	15744.9143	142.31565	53.79026	15613.2943	15876.5343
C.alternifolius	7	15189.9429	120.63376	45.59527	15078.3752	15301.5105
S.maritima	7	12412.3429	91.84666	34.71478	12327.3989	12497.2869
Total	28	14791.7714	1424.21410	269.15117	14239.5189	15344.0240

Homogeneous Subsets

TDS

		N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Duncan ^a	S.maritima	7	12412.3429		
	C.alternifolius	7		15189.9429	
	T.angustifolia	7			15744.9143
	Control	7			15819.8857
	Sig.			1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าของแข็งแขวนลอย

Descriptives

SS

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	38.8000	3.83362	1.44897	35.2545	42.3455
T.angustifolia	7	33.7429	3.26438	1.23382	30.7238	36.7619
C.alternifolius	7	17.6429	1.26208	.47702	16.4756	18.8101
S.maritima	7	12.2429	.94667	.35781	11.3673	13.1184
Total	28	25.6071	11.45519	2.16483	21.1653	30.0490

Homogeneous Subsets

SS

	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
Duncan ^a S.maritima	7	12.2429			
C.alternifolius	7		17.6429		
T.angustifolia	7			33.7429	
Control	7				38.8000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าไนเตรท

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	.7114	.03761	.01421	.6766	.7462
T.angustifolia	7	.6771	.04889	.01848	.6319	.7224
C.alternifolius	7	.4700	.02582	.00976	.4461	.4939
S.maritima	7	.3543	.02070	.00782	.3351	.3734
Total	28	.5532	.15367	.02904	.4936	.6128

Homogeneous Subsets

		N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Duncan ^a	S.maritima	7	.3543		
	C.alternifolius	7		.4700	
	T.angustifolia	7			.6771
	Control	7			.7114
	Sig.		1.000	1.000	.079

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์สถิติของค่าฟอสเฟต

Descriptives

phosphate

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	2.5629	.04751	.01796	2.5189	2.6068
T.angustifolia	7	1.8771	.11101	.04196	1.7745	1.9798
C.alternifolius	7	.8871	.04645	.01755	.8442	.9301
S.maritima	7	.6929	.02928	.01107	.6658	.7199
Total	28	1.5050	.77454	.14637	1.2047	1.8053

Homogeneous Subsets

phosphate

		N	Subset for alpha = 0.05			
			1	2	3	4
Duncan ^a	S.maritima	7	.6929			
	C.alternifolius	7		.8871		
	T.angustifolia	7			1.8771	
	Control	7				2.5629
	Sig.			1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์สถิติของพีเอช

Descriptives

pH

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	7.7614	.02035	.00769	7.7426	7.7803
T.angustifolia	7	7.7571	.01799	.00680	7.7405	7.7738
C.alternifolius	7	7.4614	.02545	.00962	7.4379	7.4850
S.maritima	7	7.1114	.04845	.01831	7.0666	7.1562
Total	28	7.5229	.27328	.05164	7.4169	7.6288

Homogeneous Subsets

pH

		N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Duncan ^a	S.maritima	7	7.1114		
	C.alternifolius	7		7.4614	
	T.angustifolia	7			7.7571
	Control	7			7.7614
	Sig.			1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์สถิติของอุณหภูมิ

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
Control	7	27.8586	.03805	.01438	27.8234	27.8938
T.angustifolia	7	27.8629	.03251	.01229	27.8328	27.8929
C.alternifolius	7	27.8871	.02812	.01063	27.8611	27.9131
S.maritima	7	27.8729	.02430	.00918	27.8504	27.8953
Total	28	27.8704	.03144	.00594	27.8582	27.8826

Homogeneous Subsets

		Temp	
		N	Subset for alpha = 0.05
			1
Duncan ^a	Control	7	27.8586
	T.angustifolia	7	27.8629
	S.maritima	7	27.8729
	C.alternifolius	7	27.8871
	Sig.		.129

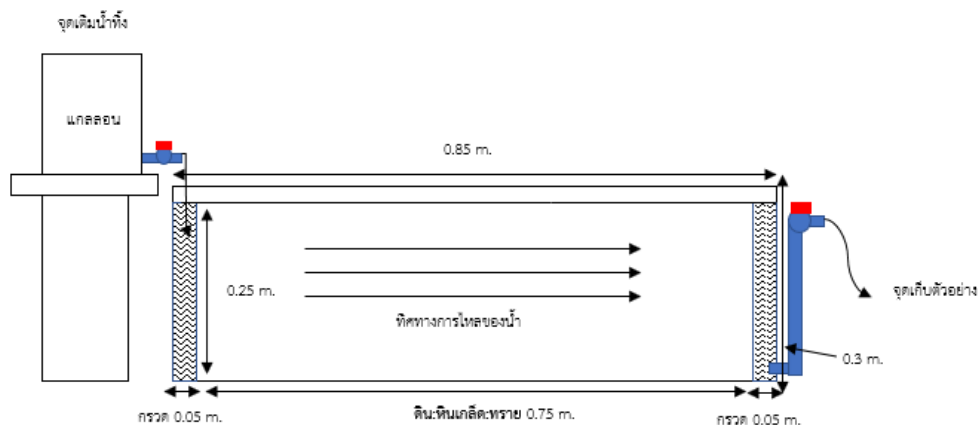
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 7.000.

ภาคผนวก ค

การคำนวณพื้นที่รับน้ำ อัตราการไหล ภาวะชลศาสตร์ และภาวะบรรทุกสารอินทรีย์
ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านไต้ดินในแนวนอน





ภาพที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านใต้ดินในแนวนอน

การคำนวณพื้นที่รับน้ำ

$$\text{ซึ่งคำนวณจากสูตร } \pi * R1 * R2 = 3.14 \times 0.32 \times 0.425 = 0.43 \text{ m}^2$$

เมื่อ

$$\pi = 3.14$$

R1 = รัศมีความกว้าง

R2 = รัศมีความยาว

การคำนวณอัตราการไหล

กำหนด HRT = 5 วัน

อัตราการไหลคำนวณจากสูตร อัตราการไหล = ปริมาณน้ำในชั้นกรอง/ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (HRT) l/d

$$\text{อัตราการไหล} = \frac{30 \text{ l}}{5 \text{ d}}$$

$$= 6 \text{ l/d}$$

$$\text{อัตราการไหล} = 6 \text{ l/d}$$

ภาวะชลศาสตร์

การคำนวณภาวะชลศาสตร์

ภาวะชลศาสตร์ = อัตราการไหล/พื้นที่รับน้ำ

$$\text{ภาวะชลศาสตร์} = \frac{6000 \text{ ml/d}}{4300 \text{ cm}^2}$$

$$= 1.395 \text{ ml/cm}^2 \text{ d}$$

ภาวะชลศาสตร์ = 1.40 cm./d

ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์

การคำนวณภาวะบรรทุกสารอินทรีย์
รับน้ำ

ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์= บีโอดี x อัตราการไหล / พื้นที่

ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์= $\frac{0.00018 \text{ mg/L} \times 6 \text{ L/d}}{0.43 \text{ m}^2}$

ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์= 0.0025 kg./ha-d



บรรณานุกรม

- APHA; AWWA; WEF . 1998 .**Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th Edition, American Public Health Association, Washington DC.
- Botella, M. A., Rosado, A., Bressan, R. A. & Hasegawa, P. M. 2005. Plant adaptive responses to salinity stress. **Plant abiotic stress**, 21(38-70).
- de Vos, A., Bruning, B., van Straten, G., Oosterbaan, R., Rozema, J. & van Bodegom, P. 2016 . **Crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on trials conducted at Salt Farm Texel**: Salt Farm Texel. Document Number)
- Flowers, T. J. & Colmer, T. D. 2008. Salinity tolerance in halophytes. **New Phytologist**, 945-963.
- Fountoulakis, M., Sabathianakis, G., Kritsotakis, I., Kabourakis, E. & Manios, T. 2017. Halophytes as vertical-flow constructed wetland vegetation for domestic wastewater treatment. **Science of the total Environment**, 583(432-439).
- Gao, F., Yang, Z.-H., Li, C. & Jin, W.-H. 2015. Saline domestic sewage treatment in constructed wetlands: study of plant selection and treatment characteristics. **Desalination and water treatment**, 53(3), 593-602.
- Ganie, S. A., Molla, K. A., Henry, R. J., Bhat, K. V., & Mondal, T. K. 2019. Advances in understanding salt tolerance in rice. **Theoretical and Applied Genetics**, 132, 851-870.
- Kataki, S., Chatterjee, S., Vairale, M. G., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. 2021. Constructed wetland, and eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). **Journal of Environmental Management**, 283, 111986.
- Klomjek, P. & Nitorisavut, S. 2005. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions. **Chemosphere**, 58(5), 585-593.
- Koottatep, T., Polprasert, C., Oanh, N. T. K., Surinkul, N., Montangero, A. & Strauss, M. 2002. Constructed Wetlands for Septage Treatment.
- Larsen K. 2000. **Chenopodiaceae in Flora of Thailand**.
- Lauchli, A. & Schubert, S. 1989. The role of calcium in the regulation of membrane and cellular growth processes under salt stress. In **Environmental stress in plants** (pp. 131-138): Springer.
- Liang, Y., Zhu, H., Banuelos, G., Yan, B., Zhou, Q., Yu, X. & Cheng, X. 2017. Constructed wetlands for saline wastewater treatment: A review. **Ecological Engineering**, 98(275-285).
- Liu, W. G., Liu, J. X., Yao, M. L. & Ma, Q. F. 2016. Salt tolerance of a wild ecotype of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides* L.) in southern China. **Bot Stud**, 57(1), 27.

- Malik, Z. H., & Ravindran, K. C. 2018. Biochemical tolerance of *Suaeda maritima* L.(Dumort) as a potential species for phytoextracting heavy metal and salt in paper mill effluent contaminated soil. **Journal of Drug Delivery and Therapeutics**, 8(6-s), 241-245.
- Metcalf and Eddy, Inc. 1991 . **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse**. 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Mohammadi Jahromi, N. S., Jonoubi, P., Majd, A. & Dehghani, M. 2019. Root structural changes of two mediator plants as the first defective barrier against industrial pollution, and their hyperaccumulation ability. **Environ Monit Assess**, 191(3), 148.
- Ojuederie, O. B. & Babalola, O. O. 2017. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review. **International journal of environmental research and public health**, 14(12), 1504.
- Puchlik, M., & Struk-Sokołowska, J. 2017. Comparison of the composition of wastewater from fruit and vegetables as well as dairy industry. In **E3S Web of Conferences (Vol. 17, p. 00077)**. EDP Sciences.
- Sepúlveda, R., Leiva, A. M. & Vidal, G. 2020. Performance of *Cyperus papyrus* in constructed wetland mesocosms under different levels of salinity. **Ecological engineering**, 151(105820).
- Stefanakis, A. I. 2019. The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. **Sustainability**, 11(24), 6981.
- Shen, X., Dai, M., Yang, J., Sun, L., Tan, X., Peng, C., & Naz, I. 2022. A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges. **Chemosphere**, 291, 132979.
- Simpson, D. A. 2008. **Typhaceae**. In **Flora of Thailand**.
- Smirnoff, N. 1993. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. **New phytologist**, 125(1), 27-58.
- Stefanakis, A. I. 2019. The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. **Sustainability**, 11(24), 6981.
- Stottmeister, U., Wießner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R. & Moormann, H. 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. **Biotechnology advances**, 22(1-2), 93-117.
- Tuteja, N. 2007. Mechanisms of high salinity tolerance in plants. **Methods in enzymology**, 428(419-438).
- U.S. EPA., 2000a . **Wastewater Technology Fact Sheet, Wetland: Free Water Surface**.EPA/832/F-00/024.

- U.S. EPA., 2000b. **Wastewater Technology Fact Sheet, Wetland: Subsurface Flow.** EPA/832/F-00/023.
- U.S. EPA., 2000c . **Onsite Wastewater Treatment Systems Manual.** EPA/625/R- 00/008.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Science of the total environment**, 380(1-3), 48-65.
- Vymazal, J. 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. **Ecological Engineering**, 73(724-751).
- Weber, K. P. & Legge, R. L. 2008. Pathogen removal in constructed wetlands. **Wetlands: Ecology, Conservation and Restoration**, 176-211.
- Whiting, D., Card, A., Wilson, C. & Reeder, J. 2010. **Saline soils, Colorado Master Gardener Program, Colorado State University Extension.**
- Zhu, J.-K. 2002. Salt and drought stress signal transduction in plants. **Annual review of plant biology**, 53(1), 247-273.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. คู่มือการป้องกันมลพิษผลิตภัณฑ์ประเภทผลไม้ดองและผลไม้ดองปรุงรส.
[Online].Available https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-05-25_07-02-22_113761.pdf. (20 พฤษภาคม 2566)
- กรมควบคุมมลพิษ. 2563. ระบบบำบัดน้ำเสีย.[Online].Available <https://www.pcd.go.th/waters/ระบบบำบัดน้ำเสีย>. (20 พฤษภาคม 2566)
- กรมควบคุมมลพิษ. 2565 .ผลกระทบจากน้ำที่มีความเค็มสูง.
[Online].Available <https://www.pcd.go.th/waters/ผลกระทบจากน้ำที่มีความเค็มสูง>.
(20 พฤษภาคม 2566)
- กรมควบคุมมลพิษ. 2563 .โครงการพัฒนาแนวทางด้านเทคนิคและสาริต ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์.
[Online].Available <https://www.pcd.go.th/publication/4399>. (20 พฤษภาคม 2566)
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2557 .หญ้าแฝกพืชกันอนุรักษ์ดิน น้ำ ฟันฟูดิน และรักษาสภาพแวดล้อม.[Online].Available <http://r01.ldd.go.th/spb/Document%2059/Vetiver.pdf>. (20 พฤษภาคม 2566)
- กรมชลประทาน. 2558. รายงานคุณภาพน้ำชลประทาน สุรินทร์: โครงการชลประทานสุรินทร์ สำนักงานชลประทานที่ 8.
- จรียา ยิมรัตน์บวร. 2554. การบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดเล็กโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์แบบผสม.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นเรศ เชื้อสุวรรณ. 2557. สภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
(คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์) ควบคู่กับการพัฒนา ประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์เพื่อ
บำบัดน้ำเสียชุมชน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี:นครราชสีมา.
- นรินทร์ เจริญพันธ์ และรัชณี ออพุทธา. 2563 . สูตรที่เหมาะสมของการผลิตแกล่นตะวันดองและกิมจิจากแกล่น ตะวัน.
Thai Science and Technology Journal, 1202-1215.

- พัฒน์พงษ์ ฟองเพชร, จิตาวลัย วิบูลย์อุทัย และเชาวยุท พรพิมลเทพ. 2552 . **ประสิทธิภาพของ
พุทธรักษาในการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวในแนวตั้ง.วารสารการ
จัดการสิ่งแวดล้อม.ปีที่5.หน้า 88-89.**
- รอยพิมพ์ อินตะยศ. 2549 .**การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการหมักดองผักโดยสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina
platensis*)** ม.ป.ท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- วิจิตพล มีแก้ว, ณัฐพล ชันธปราบ และ สุรศักดิ์ ละลอกน้ำ. 2553. การปรับตัวของพืชภายใต้ ภาวะที่มีความเค็ม. ก้าว
ทันโลกวิทยาศาสตร์ ปีที่ 10: หน้า 28-37.
- ศิริภรณ์ โคตะมี, เพ็ญพรรณ ศรีสกุลเตียว และ สมสมร แก้วบริสุท. 2555. **ชนิดของพืชน้ำทนเค็มและ
ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่ออนุบาลลูกกุ้งก้ามกราม.** การประชุมวิชาการ การพัฒนาชนบทที่
ยั่งยืน.
- ศุวศา กานตวนิชกูร .2544. **การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ Combined Constructed Wetland ในเขตอากาศ
ร้อน : รายงานฉบับสมบูรณ์.** เชียงใหม่.
- สวรรณยา สมพงษ์. 2559. สมรรถนะของการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมหมักดองด้วยกระบวนการ
อเล็กโทรไลซิส.เชียงใหม่ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุภาวดี เจริญรูป, คณิตา ตังคณานุรักษ์ และ นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. 2557. **การบำบัดน้ำเสียโรงงานฝักกาดองด้วย
วิธีการสร้างตะกอนร่วม ร่วมกับระบบหล้ากรองน้ำเสียแลพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ที่มีตัวดูดซับถ่าน
กะลามะพร้าวเป็นวัสดุเพาะปลูก.** วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อธิภัทร เงินหมื่น. 2556. **ผลของความเค็มต่อลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของพืชทนเค็มบางชนิดที่พบภายใน
พื้นที่น้ำกึ่งทิ้งร้าง.** วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรุณี ยูวณิยม และ สมศรี อรุณินท์ .2542. **การวิจัยพืชทนเค็มและพืชทนเค็มบางชนิดในดินเค็มจัดภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ.** เอกสารคู่มือเจ้าหน้าที่ของรัฐเรื่องดินเค็ม, 278-283.
- อรุณี ยูวณิยม และ สมศรี อรุณินท์. .2539. **การวิจัยพืชทนเค็มและพืชทนเค็มบางชนิดในพื้นที่ดินเค็ม
จัด.**กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์: เอกสารคู่มือเจ้าหน้าที่ของรัฐ เรื่องดินเค็ม.
- อารีย์ ทองภักดี ศรีัญญา น้อยพิทักษ์ โชคพิศิษฐ์ เทพสิทธิธา และ กรกช ชันจิริกุล .2559. **การเจริญของ
เขตรามในพื้นที่ดินเค็ม.** สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นาย ชินดนัย เอื้อเพื่อพันธุ์
เกิดเมื่อ 28 พฤษภาคม 2538
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ สำนักวิชา
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง เชียงราย

