

การใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดเสียแอมโมเนียจากน้ำเสียฟอกย้อม

นางสาวศิริพรรณ คำแน่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**THE USE OF CONSTRUCTED WETLAND
FOR TREATING AZO DYE FROM
TEXTILE WASTEWATER**

Siripan Cumnan

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดเสียจากน้ำเสียฟอกย้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เนตรนภิส ต้นเต็มทรัพย์)

กรรมการ

(ดร.สมชาย คารรัตน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิริพรรณ คำแน่น : การใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดสีย้อมเอโซจากน้ำเสีย
ฟลอกซ์อม (THE USE OF CONSTRUCTED WETLAND FOR TREATING
AZO DYE FROM TEXTILE WASTEWATER) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จริยา ยิ้มรัตนบวร, 242 หน้า.

น้ำเสียจากโรงงานฟลอกซ์อมก่อให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่รุนแรง เนื่องจากประกอบด้วยส่วนผสมของสารเคมีและสีย้อมจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีความต้องการหาทางเลือก ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย คุณได้ง่าย ราคาไม่แพง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบที่ง่ายต่อการใช้งาน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคา ค่าก่อสร้างและการเดินระบบต่ำ และมีประสิทธิภาพเพียงพอในการบำบัดน้ำเสียฟลอกซ์อม วัตถุประสงค์ในการศึกษารั้งนี้ คือ การรวมระบบ FWS และ SF เพื่อใช้ในการบำบัดสีย้อมเอโซ และสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ผ่านระบบเอเอส และหาค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์และสีย้อมที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบเอเอสโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทำการสร้างระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 3 ชุด ที่เหมือนกัน เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งฟลอกซ์อมที่มีค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์และสีย้อมแตกต่างกัน 3 ค่า โดยระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 1 ชุด ประกอบไปด้วย ระบบ FWS-SF (P) ที่มีพืช (*Phragmites australis*), ระบบ FWS-SF (C) ไม่มีพืช, ระบบ SF-FWS (P) ที่มีพืช และระบบ SF-FWS (C) ไม่มีพืช และทำการตรวจวัดประสิทธิภาพการกำจัด ผลการศึกษาพบว่าระบบ SF-FWS (P) สามารถนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมเอโซ และฟอสฟอรัส โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเอโซ ซีไอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งฟลอกซ์อมสังเคราะห์อยู่ในช่วงร้อยละ 95.22-98.58, 79.16-90.76, 72.30-81.69, 68.62-79.56 และ 88.48-92.53 ตามลำดับ และระบบ FWS-SF (P) สามารถนำมาใช้ในการบำบัดซีไอดี ทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเอโซ ซีไอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งฟลอกซ์อมสังเคราะห์อยู่ในช่วงร้อยละ 90.50-97.06, 87.04-98.04, 82.66-84.14, 73.17-82.48 และ 86.14-89.93 ตามลำดับ และพบว่าค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมจากน้ำทิ้งฟลอกซ์อมเท่ากับ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) ผลการศึกษาแสดงว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF-FWS สามารถนำไปใช้ในการบำบัดสีย้อมจากน้ำทิ้งฟลอกซ์อมจากระบบเอเอส

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2554

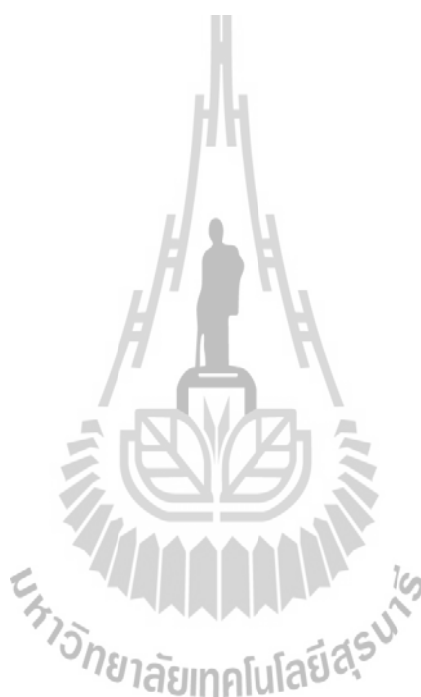
ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SIRIPAN CUMNAN : THE USE OF CONSTRUCTED WETLAND FOR
TREATING AZO DYE FROM TEXTILE WASTEWATER. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D.,
242 PP.

CONSTRUCTED WETLAND/ AZO DYE/ TEXTILE WASTEWATER

Textile effluents represent severe environmental problems as they contain a variety of dyes and associated chemicals. Hence, there is a need to find an alternative treatment method, which is efficient, simple to use, inexpensive and environmentally friendly. Constructed wetland (CW) is an example of such system that is also simple to use, environmentally friendly, with low construction and operational cost, and efficient enough to treat textile wastewater. The objective of the present study is to combine the Free Water Surface (FWS) and Subsurface Flow (SF) constructed wetlands in order to treat azo dyes and organic matter from synthetic textile effluent of activated sludge system (AS). Finding the optimum organic and azo dye loading rate is suitable for treating synthetic textile effluent of AS by CW. Three parallel laboratory-scale combined CWs were prepared to treat with three varieties of organic and azo dye loading rate of synthetic textile effluent. One laboratory-scale combined CW contained 4 reactors: FWS-SF (P) with plant (*Phragmites australis*), FWS-SF (C) without plant, SF-FWS (P) with plant and SF-FWS (C) without plant. Their removal efficiency was examined. The result indicated the applicability of the SF-FWS (P) to the treatment of azo dye and TP containing synthetic wastewater. The removals of azo dye, COD, TKN, NH₄ and TP were in the range of 95.22-98.58%, 79.16-90.76%, 72.30-81.69%, 68.62-79.56% and 88.48-92.53%. In addition, the FWS-SF (P) was applicable to the treatment of COD TKN and NH₄ containing synthetic wastewater. The removals of azo dye, COD, TKN, NH₄ and TP were

in the range of 90.50-97.06%, 87.04-98.04%, 82.66-84.14%, 73.17-82.48% and 86.14-89.93%. Moreover, the optimum organic loading rate for treating azo dye from textile effluent was 386.82-477.38 kg.COD/(ha.d). This result showed that SF-FWS could be used to treat azo dye from the textile effluent of AS.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินการวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา ยิ้มรัตนนवर อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภิส ต้นเต็มทรัพย์ และดร.สมชาย คารรัตน์ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกให้ใช้ห้องปฏิบัติการในระหว่างทำการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ที่อนุเคราะห์หินดินดาน และบริษัทไคสตาร์ไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์ผงซีเมนต์

ขอขอบคุณโครงการทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณอภิชาติ ศุภจรรยาภิรักษ์ ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนช่วยเหลือในงานวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณทิพย์สุภินทร์ หินซุข ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์งานช่างต่าง ๆ และให้คำแนะนำในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด จนการทดลองเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัวที่แสนอบอุ่น ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ให้กำลังใจ และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ศิริพรรณ คำแน่น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ค
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ป

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตในการศึกษา.....	4
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	6
2.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation).....	6
2.1.2 การย้อม หรือการให้สี (Textile Dyeing).....	7
2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Finishing).....	8
2.2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	9
2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	11
2.3.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	11
2.3.2 ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	สีย้อม	13
2.4.1	องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม	13
2.4.1.1	หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye chromophore group).....	13
2.4.1.2	หมู่ฟังก์ชันนัลของสีย้อม (Dye functional group) หรือที่เรียกว่า ออกโซโครม (Auxochrome).....	14
2.4.2	การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างเคมี.....	15
2.4.3	สีย้อมเอโซ	16
2.5	กระบวนการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม	18
2.5.1	การบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment)	18
2.5.1.1	Extended aeration	19
2.5.1.2	ระบบเอสบีอาร์	19
2.5.2	การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic treatment).....	19
2.5.3	การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation)	20
2.5.4	การออกซิเดชัน (Oxidation method).....	21
2.5.5	การดูดซับ (Adsorption)	23
2.5.6	เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane technology).....	24
2.6	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	29
2.6.1	องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	30
2.6.1.1	พืช.....	31
2.6.1.2	ตัวกลาง	32
2.6.1.3	จุลินทรีย์.....	34
2.6.2	กลไกการกำจัดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	34
2.6.2.1	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	34
2.6.2.2	กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	35
2.6.2.3	กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	36
2.6.2.4	กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.2.5	กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	38
2.6.3	ชนิดและประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	39
2.6.3.1	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง (Free Water Surface Flow Constructed Wetland, FWS)	39
2.6.3.2	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland, SF)	41
2.6.4	เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	44
2.6.4.1	ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT)	44
2.6.4.2	อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)	44
2.6.4.3	ความลึกของน้ำ	44
2.6.4.4	ความพรุนของดักกลาง	44
2.6.4.5	ความลึกของดักกลาง	44
2.7	หินดินดาน	45
2.7.1	การใช้ประโยชน์ของหินดินดาน	46
2.7.2	การดูดซับของหินดินดาน	48
2.8	ต้นอ้อ	49
2.8.1	การใช้ประโยชน์ของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	49
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	51
2.9.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีข้อมและสารอินทรีย์ ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	51
2.9.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในการ กำจัดสีข้อมและสารอินทรีย์จากน้ำเสียฟอกย้อม	52
2.9.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้หินดินดานในการบำบัดสีข้อมเอโซ	53
2.9.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ต้นอ้อในการบำบัดสีข้อมเอโซ ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	54
2.10	สรุป	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	58
3.1	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย.....	58
3.2	ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย.....	58
3.3	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	58
3.3.1	การเตรียมตัวกลาง.....	58
3.3.2	การออกแบบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	60
3.3.3	ขั้นตอนการเดินระบบ.....	65
3.3.3.1	เตรียมพีช.....	65
3.3.3.2	การเริ่มเดินระบบ.....	65
3.3.3.3	การวิเคราะห์การกระจายตัว และการเคลื่อนที่ของสารภายในระบบโดยใช้วิธีการศึกษาสารติดตาม (Tracer study).....	65
3.3.3.4	การเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อม.....	67
3.3.3.5	การเดินระบบด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อม.....	68
3.3.4	การเก็บตัวอย่าง.....	71
3.3.4.1	การเก็บตัวอย่างน้ำ.....	71
3.3.4.2	สภาวะภายในระบบ.....	72
3.3.4.3	การเก็บตัวอย่างพีช.....	72
3.3.5	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	76
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	79
4.1	ผลการศึกษาสารติดตาม.....	79
4.2	ลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	81
4.3	สภาวะแวดล้อมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	84
4.4	การบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดี.....	85
4.4.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS.....	85

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.1.1	ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)	85
4.4.1.2	ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)	92
4.4.1.3	ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)	97
4.4.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกันของแต่ละระบบ	103
4.4.3	สรุปผลการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดี	105
4.5	การบำบัดสีข้อม.....	105
4.5.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของระบบจำลอง แบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS	106
4.5.1.1	ที่ความเข้มข้นสีข้อม 56.48-63.65 Pt Co.....	106
4.5.1.2	ที่ความเข้มข้นสีข้อม 118.61-130.55 Pt Co.....	112
4.5.1.3	ที่ความเข้มข้นสีข้อม 239.28-258.39 Pt Co.....	117
4.5.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม ที่ความเข้มข้นสีข้อมแตกต่างกันของแต่ละระบบ	122
4.5.3	สรุปผลการบำบัดสีข้อม.....	123
4.6	การบำบัดฟอสฟอรัส.....	124
4.6.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ของระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS.....	124
4.6.1.1	ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)	124
4.6.1.2	ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)	130

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.1.3	ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน).....	135
4.6.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัสแตกต่างกันของแต่ละระบบ.....	140
4.6.3	สรุปผลการบำบัดฟอสฟอรัส.....	141
4.7	การบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจน	142
4.7.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน ของระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS.....	142
4.7.1.1	ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน).....	142
4.7.1.2	ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน).....	150
4.7.1.3	ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน).....	157
4.7.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนีย ในโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนแตกต่างกันของแต่ละระบบ.....	163
4.7.3	สรุปผลการบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจน	165
4.8	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพืช.....	166
4.9	การพิจารณาเลือกระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ในการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม	171
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	177
5.1	สรุปผลการศึกษา.....	177
5.2	ข้อเสนอแนะ	178
	รายการอ้างอิง	179
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การคำนวณอัตราการใช้และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์.....	196

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. การคำนวณการศึกษาศาสตร์ติดตาม.....	199
ภาคผนวก ค. ผลการทดสอบทางสถิติประสิทธิภาพการบำบัดสารต่าง ๆ ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	212
ภาคผนวก ง. การหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมและการแปลงหน่วยความเข้มข้นสีข้อม.....	218
ภาคผนวก จ. ค่าความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ของหินดินดาน.....	221
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้การตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	231
ประวัติผู้เขียน.....	242



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต9
2.2	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดเอเอส 11
2.3	สรุปข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการบำบัดสีย้อม25
2.4	บทบาทส่วนต่าง ๆ ของพืชไหล่พื้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....31
2.5	ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์33
2.6	ข้อดี-ข้อเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล่ผ่านพื้นผิวตัวกลาง และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล่ใต้ผิวตัวกลาง43
2.7	เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล่ผ่านพื้นผิวตัวกลาง และแบบไหล่ใต้ผิวตัวกลาง45
2.8	ส่วนประกอบทางเคมีของหินดินดาน46
2.9	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 55
3.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดานที่ใช้เป็นตัวกลางสำหรับชุดการทดลอง59
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน59
3.3	ค่าการออกแบบระบบแบบ FWS และแบบ SF ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย65
3.4	ค่าการกระจายของการไหล่.....67
3.5	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบบำบัดเอเอส68
3.6	องค์ประกอบของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้.....68
3.7	รายละเอียดความเข้มข้น และอัตรากระสารต่าง ๆ69
3.8	วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์ 72
3.9	จำนวนตัวอย่างน้ำ 73
3.10	จำนวนตัวอย่างพืช 74
4.1	ผลการศึกษาดูตาม81
4.2	ความเข้มข้นของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อม (Min-Max)82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3	ลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย (Min-Max).....83
4.4	สถานะแวดล้อมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์85
4.5	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน87
4.6	ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดีระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์ แบบ SF ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)89
4.7	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 72 วัน93
4.8	ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดีระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์ แบบ SF ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)94
4.9	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 100 วัน99
4.10	ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดีระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์ แบบ SF ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)101
4.11	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดชีโอดีที่ความเข้มข้นของชีโอดี 56.48-63.65 Pt Co ระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน108
4.12	ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่ความเข้มข้นชีโอดี 56.48-63.65 Pt Co109
4.13	สมมูลมวลของชีโอดีที่ความเข้มข้นชีโอดี 56.48-63.65 Pt Co.....111
4.14	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดชีโอดีที่ความเข้มข้นของชีโอดี 118.61-130.55 Pt Co ระยะเวลาการเดินระบบ 72 วัน113
4.15	ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่ความเข้มข้นชีโอดี 118.61-130.55 Pt Co115
4.16	สมมูลมวลของชีโอดีที่ความเข้มข้นชีโอดี 118.61-130.55 Pt Co.....116
4.17	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดชีโอดีที่ความเข้มข้นชีโอดี 239.28-258.39 Pt Co ระยะเวลาการเดินระบบ 100 วัน118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่ความเข้มข้นสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co.....	120
4.19 สมดุลมวลของสีย้อมที่ความเข้มข้นสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co.....	121
4.20 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลา การเดินระบบ 40 วัน.....	126
4.21 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน).....	127
4.22 สมดุลมวลของฟอสฟอรัสที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน).....	129
4.23 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 72 วัน.....	130
4.24 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน).....	132
4.25 สมดุลมวลของฟอสฟอรัสที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน).....	134
4.26 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 100 วัน.....	136
4.27 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน).....	138
4.28 สมดุลมวลของฟอสฟอรัสที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน).....	140
4.29 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดทีเคเอ็น และแอม โมเนีย ที่อัตราการระบรทุก ไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน.....	144

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.30 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนระหว่างคอดัมน์แบบ FWS และคอดัมน์แบบ SF ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)	145
4.31 สมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)	148
4.32 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 72 วัน	151
4.33 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนระหว่างคอดัมน์แบบ FWS และคอดัมน์แบบ SF ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)	152
4.34 สมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)	155
4.35 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 100 วัน	158
4.36 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนระหว่างคอดัมน์แบบ FWS และคอดัมน์แบบ SF ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)	160
4.37 สมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)	163
4.38 ปริมาณคลอโรฟิล์ เอ และบีในใบต้นอ้อ	168
4.39 น้ำหนักแห้งของต้นอ้อ.....	170
4.40 คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และกรมควบคุมมลพิษ	171

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.41	เปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจต่าง ๆ 173
4.42	คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน 173
4.43	เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม 174
4.44	เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ 174
4.45	เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน..... 174
4.46	เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส 174
4.47	ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดสีย้อม)..... 175
4.48	ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดสารอินทรีย์)..... 175
4.49	ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดไนโตรเจน) 175
4.50	ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดฟอสฟอรัส)..... 175
4.51	ระดับความสำคัญ..... 176



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....8
2.2	ลักษณะน้ำเสียในแต่ละจุดกำเนิดจากกระบวนการฟอกย้อม 10
2.3	ผลกระทบของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม..... 12
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid red B 14
2.5	โครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมเอโซ..... 16
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid orange 7..... 16
2.7	กระบวนการลดรูปของสารประกอบเอโซ..... 17
2.8	กระบวนการบำบัดสีย้อมเอโซและอะโรมาติกเอมีนแบบไม่ใช้และใช้ออกซิเจน.....20
2.9	องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 30
2.10	ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 33
2.11	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 35
2.12	กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 36
2.13	กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 37
2.14	กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 39
2.15	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง..... 40
2.16	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง..... 42
2.17	ลักษณะรากและลำต้นของต้นอ้อ..... 50
2.18	กลไกของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัดสีย้อมเอโซเอซิค..... 51
3.1	การบรรจุหินดินดานลงในคอลัมน์แบบ SF และคอลัมน์แบบ FWS..... 60
3.2	ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)..... 62
3.3	ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ก) แพนผังจำลอง (ข) ระบบที่สร้างขึ้นจริง..... 63
3.4	สรุปการเดินระบบของแต่ละชุดการทดลองภายในระยะเวลาการศึกษาทั้งหมด 212 วัน (ก) ชุดการทดลองที่1 (ข) ชุดการทดลองที่2 (ค) ชุดการทดลองที่3..... 70
3.5	จุดเก็บตัวอย่างน้ำของระบบแบบ FWS-SF (ก) และระบบแบบ SF-FWS (ข) 71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การเก็บตัวอย่างพืช.....	75
4.1 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS (ก) และแบบ SF (ข) ของชุดทดลองที่ 1.....	80
4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ภายในระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน).....	87
4.3 อัตราการกำจัดชีโอดีของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	90
4.4 อัตราการกำจัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 18.52-19.74 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	90
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน	91
4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 18.52-19.74 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน	91
4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ภายในระยะเวลาเดินระบบ 72 วัน ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน).....	93
4.8 อัตราการกำจัดชีโอดีของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	95
4.9 อัตราการกำจัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 35.08-44.24 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	95
4.10 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 35.08-44.24 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน	97
4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน).....	99
4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน	100
4.14 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 69.78-78.33 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน	100
4.15 อัตราการกำจัดชีโอดีของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	102
4.16 อัตราการกำจัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 69.78-78.33 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข).....	102
4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ แตกต่างกันของระบบแบบ FWS-SF (P)	104
4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ แตกต่างกันของระบบแบบ SF-FWS (P)	104
4.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม ภายในระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน ที่ความเข้มข้นสีข้อม 56.48-63.65 Pt Co	108
4.20 ประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นของสีข้อม 56.48-63.65 Pt Co ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน	112
4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม ภายในระยะเวลาเดินระบบ 72 วัน ที่ความเข้มข้นของสีข้อม 118.61-130.55 Pt Co	114
4.22 ประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของชุดการทดลองที่ 2 ที่ความเข้มข้นสีข้อม 118.61-130.55 Pt Co ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co	118
4.24 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของชุดการทดลองที่ 3 ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน	119
4.25 ประสิทธิภาพการบำบัดย้อม ที่ความเข้มข้นสีย้อมแตกต่างกัน ของระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS	123
4.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ภายในระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)	126
4.27 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	128
4.28 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระบรทุก ฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน	129
4.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ภายในระยะเวลาเดินระบบ 72 วัน ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)	131
4.30 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	133
4.31 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุก ฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน	135
4.32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)	136

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33	ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน 137
4.34	อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข) 139
4.35	ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัสแตกต่างกัน ของระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS 141
4.36	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ภายในระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) 144
4.37	อัตราการกำจัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข) 146
4.38	อัตราการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 43.30-50.86 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข) 146
4.39	ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน 149
4.40	ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 43.30-50.86 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน 149
4.41	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ภายในระยะเวลาเดินระบบ 72 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) 151

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 อัตราการกำจัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	153
4.43 อัตราการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 94.26-101.30 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	153
4.44 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน	156
4.45 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 94.26-101.30 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน	156
4.46 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)	158
4.47 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน	159
4.48 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 192.02-198.86 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน	159
4.49 อัตราการกำจัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบายทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)	161

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.50 อัตราการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตรากระบรทุก ไนโตรเจน 192.02-198.86 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข).....	161
4.51 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตรากระบรทุก ไนโตรเจนแตกต่างกันของระบบแบบ FWS-SF (P).....	164
4.52 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตรากระบรทุก ไนโตรเจนแตกต่างกันของระบบแบบ SF-FWS (P).....	164
4.53 แผนภูมิลำดับชั้น.....	172



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ADMI	=	American Dye Manufacturers Institute
d	=	ค่ากระจายการไหล
FWS	=	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง
FWS-SF (C)	=	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง ต่อด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และไม่ปลูกต้นอ้อ
FWS-SF (P)	=	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง ต่อด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และปลูกต้นอ้อ
n	=	ค่าความพรุนของดักกลาง
OLR	=	Organic loading rate
POD	=	เอนไซม์ Peroxidase
SF	=	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง
SF-FWS (C)	=	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ต่อด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง และไม่ปลูกต้นอ้อ
SF-FWS (P)	=	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ต่อด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง และปลูกต้นอ้อ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่สามารถทำรายได้เข้าสู่ประเทศจำนวนมาก กระบวนการผลิตหลักของอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบไปด้วย การทอ การฟอก การย้อมสี และการตกแต่งสำเร็จ ในแต่ละขั้นตอนการผลิตต้องมีการใช้น้ำในปริมาณมาก ทำให้ปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นมาก และลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นยากต่อการกำจัด เนื่องจากมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5-13 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีต่อซีโอดี อยู่ในช่วง 0.1-0.4 และความเข้มข้นของสีอยู่ในช่วง 153-4,750 ADMI (Manu and Chaudhari, 2002) และเมื่อน้ำเสียปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้กระบวนการฟอกตัวเอง (Natural self purification) ของแหล่งน้ำเสียไปขัดขวางการส่องผ่านของแสง มีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายลงสู่แหล่งน้ำลดลง (Banat et al., 1996) นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากสารประกอบในสีมีสารโลหะหนักซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต (Gottlieb et al., 2003) สีย้อมเอโซเป็นกลุ่มสีที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมสิ่งทอถึงร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Zee et al., 2003) สาเหตุที่สีย้อมเอโซเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากมีสีให้เลือกครบทุกเฉดสี และมีกลุ่มสีให้เลือกหลากหลายชนิด (Yang and Xu, 1996) นอกจากนี้สีเอโซมีทั้งสีที่สามารถละลายน้ำได้ และไม่ละลายน้ำ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาแล้วนั้นมีผลทำให้สีย้อมเอโซนั้นบำบัดได้ยากโดยกระบวนการทางชีวภาพ และทางเคมี และสีย้อมเอโซมีโครงสร้างอะโรมาติกที่ซับซ้อน ทำให้มีความคงตัวค่อนข้างสูง สามารถทนต่อการย่อยสลายตามธรรมชาติได้ดี (Ong et al., 2009)

ปัจจุบันมีวิธีการกำจัดสีย้อมอยู่หลายวิธี เช่น การกำจัดสีโดยวิธีการดูดซับ (Adsorption) สารดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดี แต่ราคาของถ่านกัมมันต์แพง และต้นทุนในการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ของถ่านกัมมันต์สูง (อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์, 2538) กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซน (Ozonation) สามารถใช้กับน้ำทิ้งที่มีปริมาณมาก และสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำทิ้งได้ แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยสารไนโตรเจน (Nitrogen) คลอรีน (Chlorine) หรือซัลเฟอร์ (Sulphur) จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารตั้งต้นเดิม และมีราคาค่าก่อสร้างของระบบสูง

(วรราชวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546) วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะมีค่าใช้จ่ายและพลังงานสูง และมีตะกอนที่ต้องนำไปกำจัดต่อไป ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยจำนวนมาก เพื่อทำการศึกษาวาดวิธีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพ ง่ายต่อการดูแล มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed wetland) เป็นทางเลือกหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถสร้างสภาวะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ให้เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแต่ละประเภทได้ (Scholz and Xu, 2002) ข้อดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ เป็นระบบที่ง่ายต่อการใช้งาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีตะกอนเกิดขึ้น มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการเดินระบบต่ำ และมีประสิทธิภาพเพียงพอในการบำบัดน้ำเสียชนิดต่าง ๆ ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน มีข้อดี คือ สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้ แต่มีข้อเสีย คือ กำจัดสีเอโซ และสารอาหารได้ค่อนข้างต่ำ (Tunay et al., 1996) ส่วนกระบวนการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน มีข้อดี คือ สามารถทำลายพันธะเอโซ ทำให้ความเข้มข้นของสีลดลง (Gingell and Walker, 1971) แต่มีข้อเสีย คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีในน้ำเสียต่ำ นอกจากนี้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลาย มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (Basibuyuk and Forster, 1997; Ong et al., 2005a) จากข้อดี และข้อเสียของการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม ทำให้มีความพยายามในการรวมการย่อยสลายทั้ง 2 แบบ เข้าอยู่ในระบบเดียวกัน เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งสีและสารอินทรีย์ได้ในเวลาเดียวกัน (Fu et al., 2001)

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มี 2 แบบ ได้แก่ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland, SF) และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านผิวดักกลาง (Free Water Surface Flow Constructed Wetland, FWS) โดยระบบแบบ FWS มีลักษณะเด่นในเรื่องของการรับออกซิเจนโดยตรงจากบรรยากาศ นอกจากนี้พืชยังทำหน้าที่ในการลำเลียงออกซิเจนสู่ส่วนที่ลึกของดักกลาง กระบวนการส่วนใหญ่ยังคงเป็นแบบใช้ออกซิเจน ส่วนระบบแบบ SF จะมีบริเวณใต้ชั้นดักกลางซึ่งอิมตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลา ทำให้มีโอกาสในการเกิดสภาวะไม่มีออกซิเจน นอกจากนี้พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยังส่วนราก ทำให้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนสามารถเจริญเติบโตได้ (กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทั้งระบบแบบ FWS และระบบแบบ SF สามารถเกิดกระบวนการบำบัดทั้งแบบใช้ และไม่ใช้ออกซิเจนภายในระบบเดียวกัน นอกจากนี้มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม (Ojstršek, Fakin, and

Vrhovsek, 2007; Davies et al., 2005; Ong et al., 2009) จากการศึกษาของ Davies et al. (2005) พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถกำจัดสีย้อมได้ โดยเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่าง จุลินทรีย์ และเอนไซม์จากพืช โดยพืชจะทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์สังเคราะห์ ซึ่งจุลินทรีย์ ไม่สามารถกำจัดได้ (Xenobiotic) หรือที่เรียกว่า การใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษ (Phytoremediation) โดยอาศัยกระบวนการทำงานของพืช เช่น การดูดซับโดยตรง การดูดซึม สารมลพิษแล้วย่อยสลายด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช เพื่อเคลื่อนย้าย เก็บหรือทำให้ สารมลพิษอยู่ในรูปที่เป็นอันตรายน้อยลง (Schwitzguébel and Vaneck, 2003) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ ต้นอ้อเป็นพืช เนื่องจากต้นอ้อมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ใน น้ำเสียฟอกย้อมได้ นอกจากนี้เอนไซม์ Peroxidase (POD) ที่มีอยู่ในต้นอ้อนั้น ยังมีความสำคัญใน การกำจัดสารที่เป็นองค์ประกอบของสีย้อมได้ (Azevedo et al., 2003; Veitch, 2004)

โดยทั่วไปแล้วระบบบำบัดน้ำเสียที่โรงงานฟอกย้อมนิยมใช้ในปัจจุบันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ระบบเอเอส (Activated sludge system) (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) แต่เนื่องจากลักษณะสมบัติน้ำเสียฟอกย้อมซึ่งบำบัดได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และ จากการทบทวนงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับวิธีการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ ว่ายังไม่มีวิธีการใดที่สามารถบำบัดทั้งสารอินทรีย์ และสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย ระบบเอเอสที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมนั้นพบว่ามีปัญหาน้ำทิ้งหลังผ่านระบบเอเอส ยังคงมี ความเข้มข้นของสีย้อม และสารอินทรีย์หลงเหลือในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านออกจากระบบไม่ได้ มาตรฐาน และก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่าง ๆ ต่อแหล่งรับน้ำสาธารณะ จากการสำรวจโรงงาน ฟอกย้อมจำนวน 100 โรงงาน โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่า มีโรงงานจำนวน 32 โรงงาน (คิดเป็นร้อยละ 32) มีปัญหาที่ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามค่ามาตรฐานที่กรมโรงงาน อุตสาหกรรมกำหนด ก่อนระบายสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยไม่สามารถกำจัดซีโอดี บีโอดี และสี ให้ได้ตามมาตรฐาน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำระบบพื้นที่ ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มาบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบบำบัดแบบเอเอส โดยจะนำระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบมาใช้ร่วมกัน เพื่อสามารถกำจัดสารอินทรีย์ และสีย้อมเอ โช จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม ที่ผ่านระบบบำบัดเอเอส และหาค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และสี ย้อมที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พร้อมทั้งศึกษาลำดับการใช้พื้นที่ ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF โดยมีหินดินดานเป็นตัวกลาง และต้นอ้อเป็นพืชในระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์กับโรงงานฟอกย้อมในการพิจารณานำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีอยู่เดิมแล้ว เพื่อ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานให้ได้มาตรฐาน และลดปัญหาการเกิดผล กระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ และสีข้อมเอโซจากน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง และแบบไหลใต้ผิวดักกลาง

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ และสีข้อมเอโซที่เหมาะสมจากน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1.3 ขอบเขตในการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยโดยนำระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อม ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์ และสีข้อมเอโซ ที่อัตราการบำบัดสารอินทรีย์แตกต่างกัน โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 การเตรียมตัวกลาง

1.3.1.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของหินดินดาน ได้แก่ จำแนกขนาด (Sieve analysis) สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of permeability) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ความพรุน (Porosity) เพื่อนำมาเลือกใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และการบรรจุตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1.3.2 การออกแบบชุดการทดลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง และแต่ละชุดการทดลองจะมี ถังรวบรวมน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าระบบ โดยแต่ละชุดการทดลองจะประกอบไปด้วย ระบบแบบ FWS-SF 2 เซ็ต และระบบแบบ SF-FWS 2 เซ็ต รวมทั้งหมด 12 เซ็ต

1.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม ที่อัตราการบำบัดสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR) และสีข้อมแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ (97.36-127.31 203.50-252.34 และ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน))

1.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ และสีข้อมเอโซ เพื่อศึกษาลำดับการจัดเรียงก่อน-หลังระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งฟอกย้อมจากระบบเอเอส

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

การศึกษาดูประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์ของโรงงานฟอกย้อมที่ OLR และสีข้อมแตกต่างกัน 3 ค่า และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ และสีข้อมระหว่าง

ระบบแบบ SF-FWS และระบบแบบ FWS-SF โดยตั้งสมมติฐานงานวิจัย คือ การนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF มาใช้รวมกันทั้ง 2 ระบบ สามารถบำบัดสารอินทรีย์และสีย้อมจากน้ำทิ้งฟอกย้อมสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถเกิดสภาวะการย่อยสลายทั้งแบบมีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจนได้ โดยมีตัวกลาง คือ หินดินดาน และพืช คือ ต้นอ้อ ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อเป็นประโยชน์กับโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมในการพิจารณาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไปใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำทิ้งทางชีวภาพที่มีอยู่แล้ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อม

1.5.2 เพื่อทราบค่า OLR ที่เหมาะสมในการเดินระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการฟอกย้อมมีความสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงผ้า และเส้นด้ายให้มีสีสันสวยงาม สามารถนำไปจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภค น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่มีสีย้อมที่หลงเหลือจากกระบวนการย้อม เมื่อสีย้อมปนเปื้อนไปในแหล่งน้ำ ขัดขวางการส่องผ่านของแสง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายลงสู่แหล่งน้ำลดลง ก่อให้เกิดความไม่น่ามอง ทำลายทัศนียภาพ และนอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อีกด้วย ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม โดยได้ทำการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นอุตสาหกรรมหลักในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทย มีการส่งออกเครื่องนุ่งห่ม สามารถนำเงินตราเข้าประเทศอย่างต่อเนื่อง กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมผ้า เป็นการนำเส้นด้าย หรือผ้าดิบออกจากโรงปั่นหรือทอผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเตรียมเส้นด้าย หรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสี หรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายที่สำคัญของขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอ เพื่อขจัดสิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใยเพื่อทำให้เส้นใยมีความขาวสะอาด และมีการดูดติดสีย้อม และสารเคมีต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมสิ่งทอ ที่สำคัญมีดังนี้ คือ

- การเผาขน (Singeing)

เป็นการกำจัดเส้นใยสั้น ๆ ที่โผล่ออกมาบนผิวหน้าของผ้า มีผลทำให้ผ้าติดสีไม่สม่ำเสมอ และสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเผาขน หรือการเผาขนมี 3 วิธี ได้แก่ การใช้เปลวก๊าซ แผ่นโลหะความร้อน และไฟฟ้า (เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ, 2541)

- การลอกแป้ง (Desizing)

ในขั้นตอนการเตรียมผ้าจำเป็นต้องมีการลงแป้งเพื่อให้ด้ายแข็ง และทอได้ง่ายขึ้น นอกจากจะใช้แป้งแล้วยังมีการใช้สารสังเคราะห์ซึ่งเรียกว่าสารไซซิง (Sizing agent) เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxyl methyl cellulose, CMC) โพลีอะคริลิก (Polyacrylic) เป็นต้น แป้ง หรือสารไซซิงข้างต้น จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดก่อนเพื่อทำให้การทำความสะดวกเส้นใยในขั้นตอนต่อไปได้ผลดี การลอกแป้งอาจทำโดยนำผ้าไปแช่น้ำร้อนให้เส้นใยพองตัว เพื่อทำให้สารช่วยย่อย (เอนไซม์) เข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้งบนเส้นใยได้ง่าย ทำให้แป้งหลุดออกจากเส้นใยและไปอยู่ในน้ำทิ้งของกระบวนการการผลิต

- การกำจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

การกำจัดไขมัน และสารปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น สารประกอบพวกเกลือ ทั้งอินทรีย์ และอนินทรีย์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จำเป็นต้องขจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสี และสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ กระบวนการขจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดมีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณ และชนิดของสิ่งสกปรกในเส้นใยแต่ละชนิด

- การฟอกขาว (Bleaching)

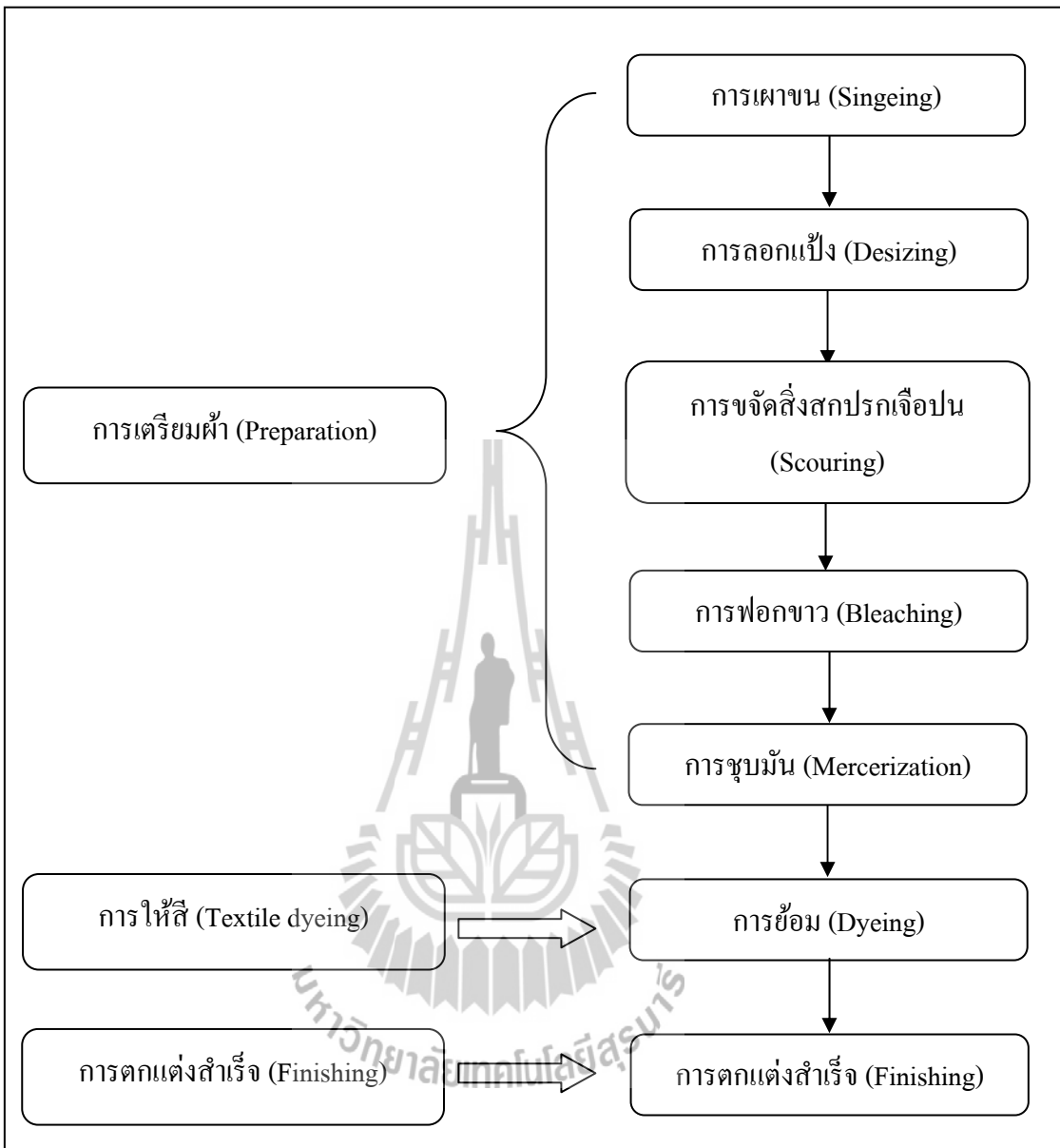
เป็นขั้นตอนของการขจัดสีที่มีอยู่บนเส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่ติดมาตามธรรมชาติ หรือจากการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปั่น หรือการทอ หลังจากทำความสะอาดแล้วจะยังคงมีสี และวัสดุเจือปนอื่น ๆ เหลืออยู่ในผ้า การฟอกขาวจะทำให้สิ่งเหล่านั้นสลายตัวหรือลด สารฟอกขาวที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรด์ (Sodium hypochlorite, NaOCl) และโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chlorite, $NaClO_2$) เป็นต้น

- การชุบมัน (Mercerization)

การชุบมัน หรือเมอร์เซอไรซ์เป็นการเพิ่มความเงา ความเหนียวให้กับเส้นด้ายเส้นใยพองตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีการหดตัวตามยาว การดูดซึมน้ำดีขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของเส้นใย

2.1.2 การย้อม หรือการให้สี (Textile Dyeing)

หลักการย้อมสี คือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลาย หรือกระจายอยู่ในสารละลายไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อม เช่น เส้นใย ผ้า ฝ้าย ฯลฯ แล้วทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอดบนผิวรอบภาคตัดขวางของวัสดุที่จะย้อมด้วย เนื่องจากลักษณะของวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน จึงต้องเลือกชนิดสีย้อมให้เหมาะสมกับชนิดของเส้นใยผ้า



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อการเตรียม และการให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลง ปรับปรุง หรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ เช่น คุณสมบัติการทนต่อการยับย่น ความนุ่ม ทำให้ผ้ามีคุณสมบัติกันน้ำ และความสามารถในการทนไฟ เป็นต้น

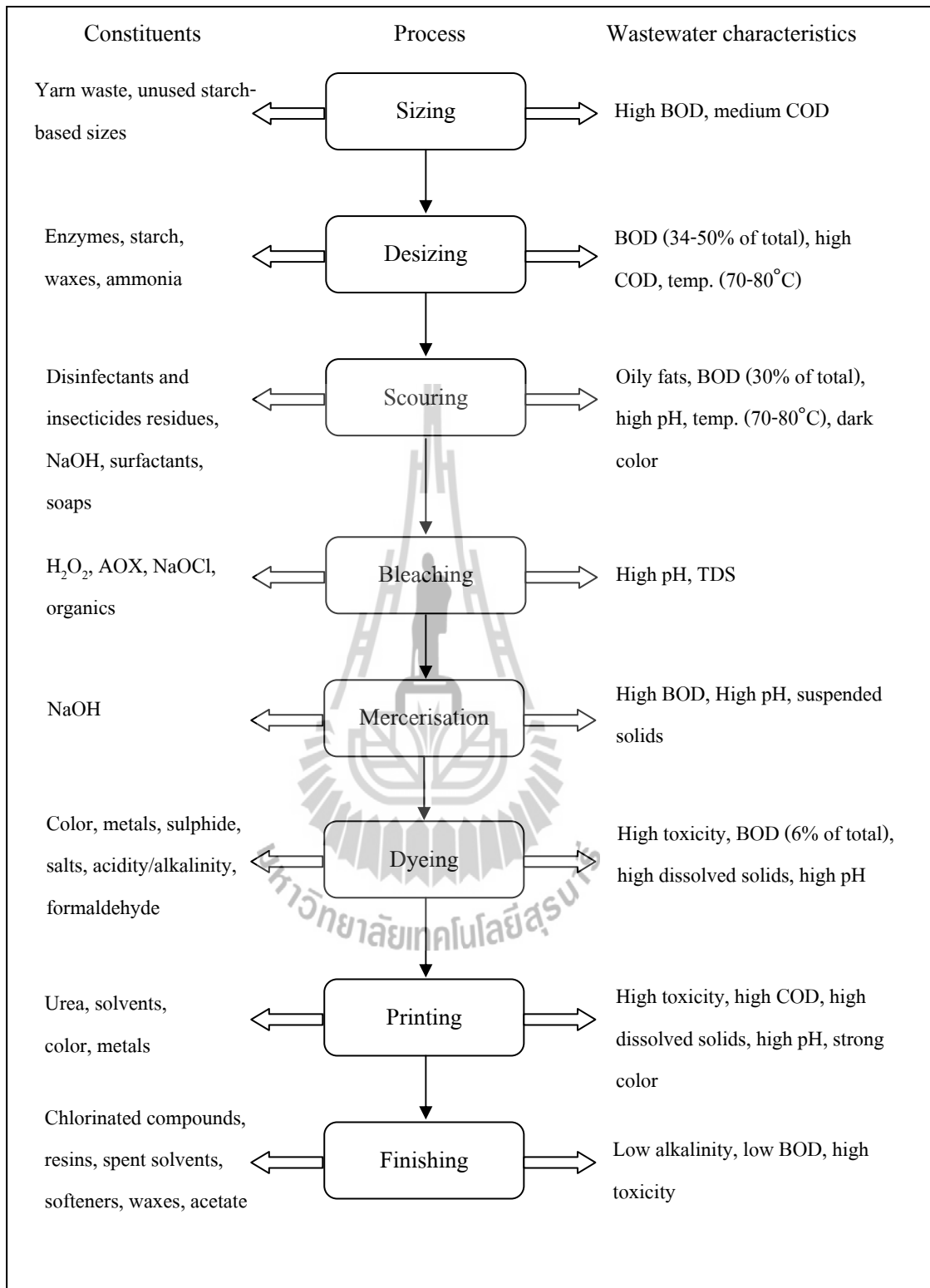
2.2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียซึ่งมาจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อม ได้มีการรวบรวมจากการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่ามีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5-13 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี อยู่ในช่วง 1,100-13,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีไอดี อยู่ในช่วง 10-5,200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสีอยู่ในช่วง 153-4,750 ADMI จะเห็นได้ว่าลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และค่าสีสูง เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการใช้สารเคมีหลากหลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เช่น ในกระบวนการลอกแป้ง ซึ่งเป็นการเอาแป้งออกจากเนื้อผ้า และการกำจัดสิ่งสกปรกก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าปริมาณสารอินทรีย์สูง และกระบวนการย้อมซึ่งเป็นกระบวนการหลักที่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสีสูง เนื่องจากในการย้อมสีนั้น เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ทำให้มีปริมาณสีย้อมร้อยละ 4-12 ของสีย้อมที่ใช้ ปนเปื้อนออกมากับน้ำเสีย (Coughlin, Kinkle, and Bishop, 2002; Scheeren, Paniz, and Martins, 2002) และจากกระบวนการฟอกขาว และการชุบมันทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีค่าพีเอชสูง เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกขาว เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และโซดาไฟ (NaOH) เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

ขั้นตอน	COD (g/l)	BOD (g/l)	TS (g/l)	TDS (g/l)	pH	Color (ADMI)	การใช้น้ำ (l/kg ผ้า)
ลอกแป้ง	4.6-5.9	1.7-5.2	16.0-32.0	-	-	-	3-9
กำจัดสิ่งสกปรก	8.0	0.1-2.9	7.6-17.4	-	10-13	694	26-43
ฟอกขาว	6.7-13.5	0.1-1.7	2.3-14.4	4.8-19.5	8.5-9.6	153	3-124
ชุบมัน	1.6	0.05-0.1	0.6-1.9	4.3-4.6	5.5-9.5	-	232-308
การย้อม	1.1-4.6	0.01-1.8	0.5-14.1	0.05	5-10	1450-4750	8-300

หมายเหตุ : Correia, Stephenson, and Judd, 1994; Orhon, Babuna, and Insel, 2001; Mattioli et al., 2002; Bisschops and Spanjers, 2003; Dos Santos, Bisschops, and Cervantes, 2006a



รูปที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียในแต่ละจุดกำเนิดจากกระบวนการฟอกย้อม (SEAM Project, 1999; Yusuff and Sonibare, 2004; Joseph, 2007; Paul, 2008; Charoeniarph and Choyphan, 2009)

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ในการนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มาใช้ร่วมกับระบบบำบัดหลักของโรงงานฟอกย้อมซึ่งส่วนใหญ่ใช้ระบบเอเอส จึงได้ทำการรวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการบำบัดเอเอส ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่ามีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.5-8.1 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี อยู่ในช่วง 106-488 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีไอดี อยู่ในช่วง 13.8-48 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสีอยู่ในช่วง 127-229 Pt Co จะเห็นได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี บีไอดีของน้ำทิ้งนั้นยังเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และยังมีสีหลงเหลืออยู่ปริมาณมาก

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดเอเอส

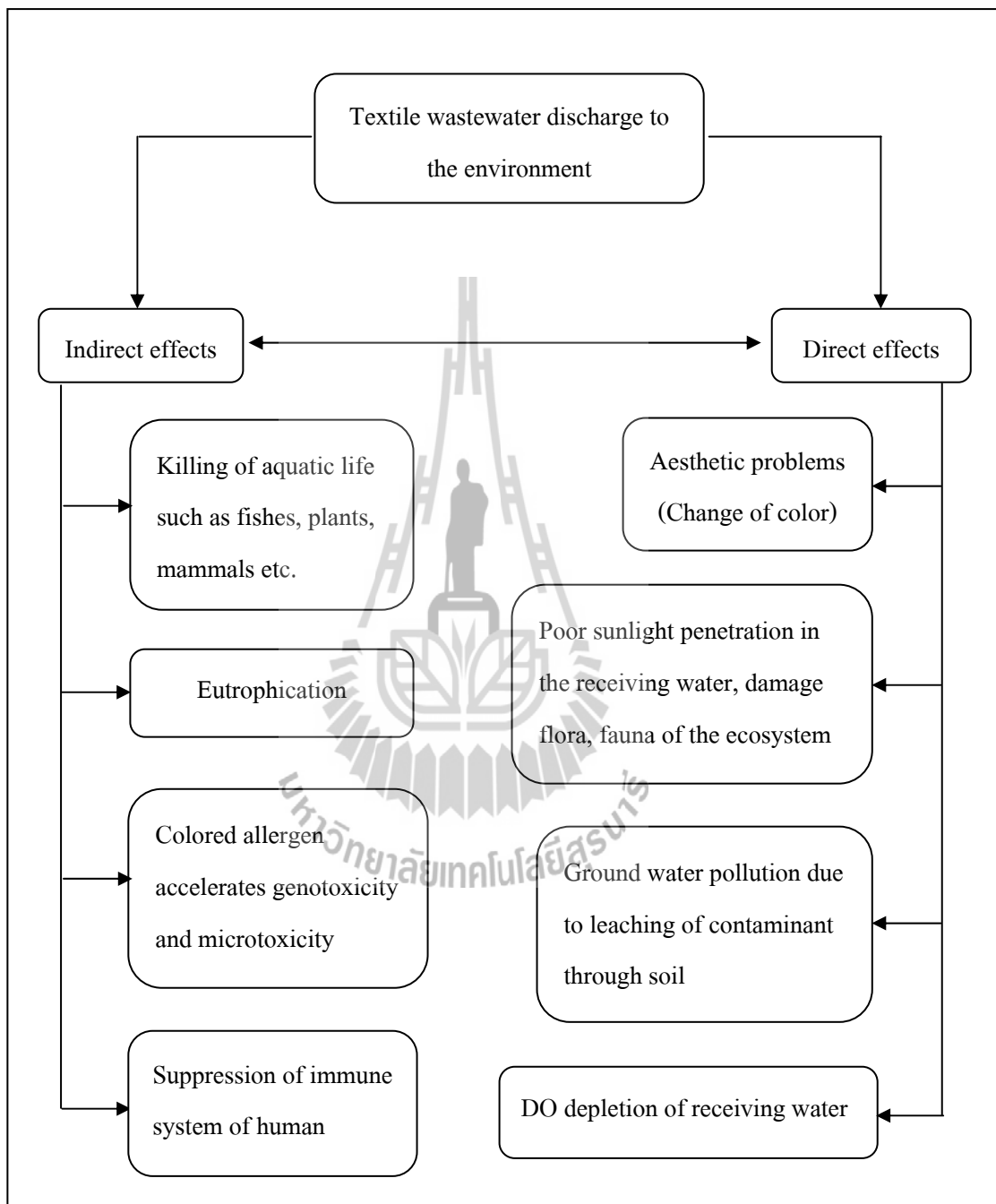
พารามิเตอร์	Nasiman, 1996	Amar et al., 2009	Gozálvez-Zafrilla et al., 2008	Bes-Pía et al., 2009
pH	7.8	7.6-8.1	7.8	7.5-8.0
บีไอดี (mg/l)	48	13.8-40	45	-
ซีไอดี (mg/l)	488	106-175	150	200-250
สีข้อม (Pt Co)	-	127-229	-	-

2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

2.3.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

จากลักษณะของน้ำเสียฟอกย้อมที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณสารอินทรีย์ และความเข้มข้นของสีสูง หากปนเปื้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดผลกระทบทั้งทางตรง และทางอ้อม โดยผลกระทบทางตรง ตัวอย่างเช่น ปัญหาทางด้านทัศนียภาพ การส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำลดลง และเกิดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำบาดาล เป็นต้น ส่วนผลกระทบทางอ้อม เช่น เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน และก่อให้เกิดความพิษทางพันธุกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ก่อให้เกิดความน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น เป็นการทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ (Pearce, Lloyd, and Guthrie, 2003) นอกจากนี้สีข้อมขัดขวางการส่องผ่านของแสงในแหล่งน้ำ ทำให้พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ (Georgiou et al., 2003; Merzouk, Madani, and Sekki, 2010) ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในแหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในแหล่งน้ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ (Banat et al., 1996) และอาจเกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเนื่องจากการซึมผ่านลงไปในดิน (Namasivayam and Sumithra, 2005;

Khaleed et al., 2009) และทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นได้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

(Verma, Dash, and Bhunia, 2012)

2.3.2 ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

สีย้อมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมักเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรซับซ้อน และส่วนมากจะมีองค์ประกอบเป็นสารโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง หากได้รับเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากสารประกอบในสีมีสารซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutagenic) ของสิ่งมีชีวิต (Gottlieb et al., 2003) หากสัมผัสถูกผิวหนัง ตา จะทำให้เกิดการระคายเคือง (Hatch and Maibach, 1999; Rai et al., 2005; Christie, 2007) และพบว่าก่อให้เกิดโรคมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ ลำไส้ และตับ เป็นต้น (Myslak, Bolt, and Brockmann, 1991) ซึ่งทางคณะกรรมการการค้าแห่งสหภาพยุโรปประเทศสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ได้มีการประกาศห้ามการนำเข้า และห้ามใช้สีเอโซไซท์ที่เป็นอันตราย เนื่องจากความเป็นพิษที่สามารถก่อให้เกิดอันตราย ดังนั้นจึงได้ประกาศห้ามการซื้อขาย และใช้สีย้อมที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ และสีย้อมที่มีหมู่เอโซไซท์จำนวนหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็ง (อังคณา อมรศรี, 2546) สำหรับในประเทศไทยได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3993 (พ.ศ. 2552) ออกความตามในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กำหนดห้ามใช้สีเอโซไซท์ที่ก่อให้เกิดสารจำพวกอะโรมาติกเอมีนเกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.4 สีย้อม

สีย้อม (Dye stuff) คือ สารที่ปกติเป็นสารอินทรีย์ที่สร้างมาเพื่อติดสี หรือดูดซับแสง โดยการทำให้อยู่บน หรืออยู่ในผิวหน้าของวัตถุ เพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา ซึ่งความทนทานของสีจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม และพันธะในการยึดติดกับวัตถุนั้น ๆ (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2540) การทำให้สีย้อมมีความคงทน และเพิ่มความสดใสของสี จึงใช้สารโลหะหนัก ได้แก่ แมงกานีส ทองแดง อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว โคบอลต์ โปรท และสังกะสีด้วยเหตุนี้ในน้ำเสียฟอกย้อมจึงมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ก่อให้เกิดปัญหาความเป็นพิษของโลหะหนัก (สุกานดา กาสังข์, 2548)

2.4.1 องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม

โมเลกุลของสีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน (Buckly, 1992) คือ

2.4.1.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye chromophore group)

องค์ประกอบส่วนนี้จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อม โดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงตกกระทบ โครงสร้างโครโมฟอร์จะเกิดการสั่น (Oscillate) เนื่องจากมีการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไปเป็นผลให้เกิดการเห็นสีตามช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 5 กลุ่มในจำนวนนี้ที่นิยม ได้แก่

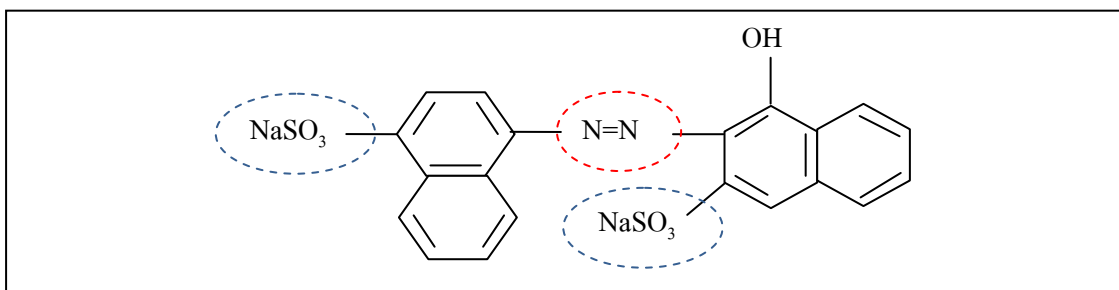
- N=N กลุ่มเอโซ (Azo group)
- C=O กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group)
- NO₂ กลุ่มไนโตร (Nitro group)
- N=O กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)
- NR₃⁺ อนุพันธ์แอมโมเนียม (Alkyl ammonium derivatives)

โดยเฉพาะกลุ่มเอโซนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอถึงร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Zee et al., 2003)

2.4.1.2 หมู่ฟังก์ชันนัลของสีย้อม (Dye functional group) หรือที่เรียกว่า ออกโซโครม (Auxochrome)

องค์ประกอบของโมเลกุลส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ก่อพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใย ซึ่งจะทำให้เกิดการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใยขึ้น โดยโครงสร้างส่วนนี้มักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene ring) ที่มีหมู่อะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่ เช่น หมู่ SO₃⁻, Na⁺, COOH, OH และ NH₂ เป็นต้น โมเลกุลสีจะยึดติดกับเส้นใยได้โดยการที่หมู่ฟังก์ชันนัล (Functional group) เหล่านี้ทำปฏิกิริยากับเส้นใย โดยอาจเป็นพันธะโควาเลนต์ พันธะอิออนิก แรงวันเดอร์วาลส์ หรือโดยการแทรกซึมของอนุภาคสีย้อมเข้าไปในเส้นใย

จากรูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซแอซิด (Acid red B) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ โครโมฟอร์ ซึ่งเป็นส่วนทำให้เกิดสี โครโมฟอร์แบบ (N=N) จัดอยู่ในกลุ่มเอโซ ดังแสดงในวงกลมสีแดง และในโครงสร้างโมเลกุลยังประกอบด้วยออกโซโครม ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกับเส้นใยยึดติดกัน โครงสร้างส่วนนี้ประกอบด้วยวงเบนซีน ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ คือ กลุ่มซัลโฟนิล ดังแสดงในวงกลมสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid red B (Jiang et al., 2010)

2.4.2 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างเคมี

สีย้อมที่ขายในท้องตลาด มีสูตร โครงสร้างทางเคมีเป็น โครงสร้างหลักกว่า 30 ชนิด แต่โครงสร้างหลักที่มีปริมาณการใช้มากจริง ๆ มีอยู่ไม่ถึง 10 ชนิด ที่สำคัญ (อิสรรา พุ่มคชา, 2539) ได้แก่

- สีย้อมเอโซ (Azo dye)

สีย้อมเอโซ คือ สีย้อมที่มีกลุ่มเอโซ ($N=N$) อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่ และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Carliell et al., 1995; Ollgaard et al., 1999; Stolz, 2001; Zee et al., 2003; Dos Santos et al., 2003) คุณสมบัติที่สำคัญของสีย้อมกลุ่มนี้ คือ มีสีให้เลือกครบทุกเฉด แต่โดยทั่ว ๆ ไปจะมีความสำคัญโดยเฉพาะช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และดำ มีกรรมวิธีสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใส และคงทนต่อแสง ราคาไม่แพง สีย้อมเอโซมีหมู่เอโซเป็นโครโมฟอร์ในโครงสร้าง และมีหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) หรืออะมิโน ($-NH_2$) เป็นหมู่ออกโซโครม สีย้อมเอโซมีหลายชนิด เช่น สีแอซิด (Acid dye) สีรีแอคทีฟ (Reactive dye) สีไคเร็กต์ (Direct dye) สีเบสิก (Basic dye) ซึ่งสีย้อมเหล่านี้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี จึงกำจัดได้ยากโดยกระบวนการทางกายภาพ และชีวภาพ ส่วนสีอะโซอิก (Azoic dye) สีดีสเพอร์ส (Disperse dye) เป็นสีที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ (อังคณา อมรศรี, 2544)

- สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone dye)

สีแอนทราควิโนน คือ สีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีความสำคัญเป็นลำดับ 2 รองจากสีเอโซ โดยครอบคลุมประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมด (ชัยบุษ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม, 2543) เป็นสีที่มีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีม่วง สีฟ้า สีเขียว และสีแดงสด เป็นสีที่มีความสว่างสดใสดี และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มข้นของสีน้อยกว่าสีเอโซ และมีราคาแพงอีกด้วย

- สีย้อมไตรฟีนิลมีเทน (Triphenylmethane dye)

สีกลุ่มนี้ให้สีม่วง สีฟ้า และสีเขียว ที่มีความสว่างสดใสมากแต่สมบัติในด้านความคงทนต่อแสงไม่ดี

- สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur dye)

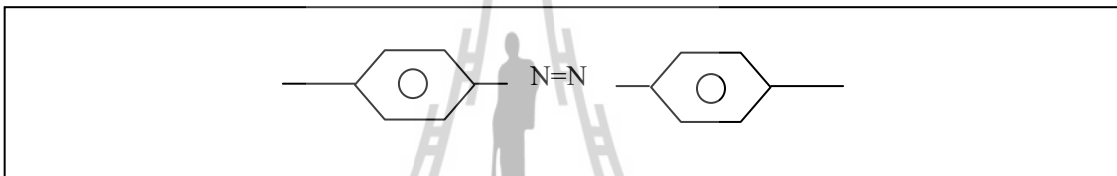
สีย้อมซัลเฟอร์ นิยมใช้เป็นสีย้อมทึบ ๆ ที่ต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ สีน้ำตาล สีน้ำเงิน เป็นต้น สีกลุ่มนี้มีสีให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีทึบไม่สดใส

- สีย้อมอินดิโกอยด์ (Indigoid dye)

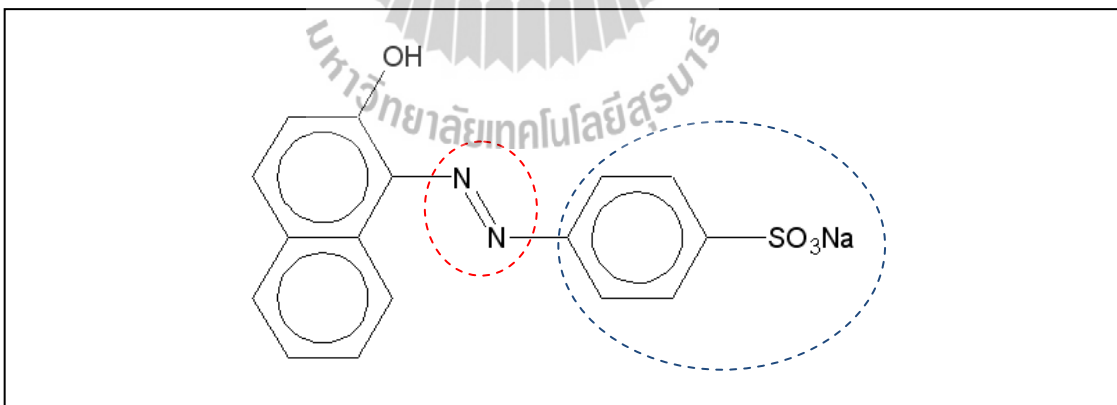
สีย้อมอินดิโกอยด์ คือสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

2.4.3 สีย้อมเอโซ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีความสนใจที่จะบำบัดสีย้อมเอโซ เนื่องจากสีย้อมเอโซ เป็นกลุ่มสีที่นิยมใช้มากถึงร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Carliell et al., 1995; Ollgaard et al., 1999; Stolz, 2001; Zee et al., 2003; Dos Santos et al., 2003) สีย้อมเอโซมีหลายชนิด เช่น สีแอซิด สีรีแอคทีฟ สีไดเร็กต์ สีเบสิก ซึ่งสีย้อมเหล่านี้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี จึงกำจัดได้ยากโดยกระบวนการทางกายภาพ และชีวภาพ ส่วนสีอะโซอิก สีดิสเพอร์ส เป็นสีที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ (อังคณา อมรศรี, 2544) สีเอโซมีสูตรโครงสร้างของโครโมฟอร์ (N=N) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อม แสดงดังรูปที่ 2.5 และมีส่วนที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใยทำให้เกิดการยึดติดกันขึ้น เรียกว่า ออกโซโครม โครงสร้างส่วนนี้จะประกอบด้วยวงเบนซีนที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



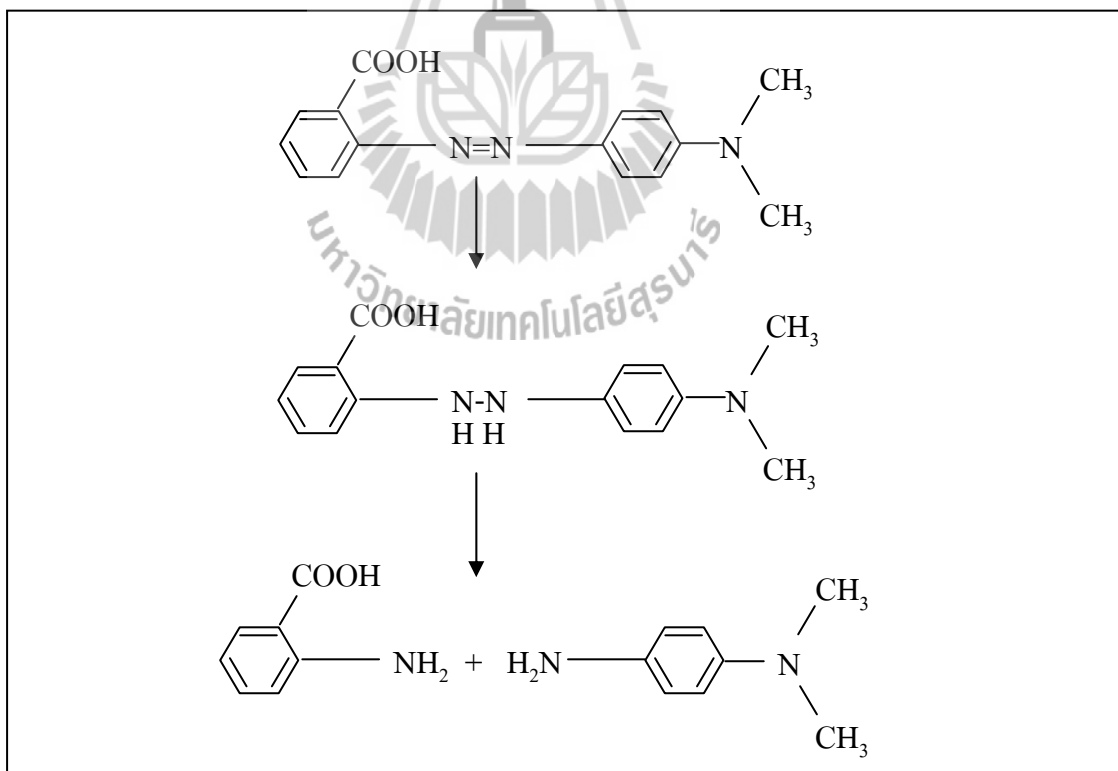
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมเอโซ (Buckly, 1992)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid orange 7
(Dos Santos, Cervantes, and Van Lier, 2004)

จากรูปที่ 2.6 เป็นโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซแอสิด (Acid orange 7) สามารถอธิบายได้ว่าสีย้อมชนิดนี้เป็นสีเอโซเนื่องจากมีโครงสร้างโครโมฟอร์แบบ (N=N) ประกอบด้วยไนโตรเจน 2 อะตอม ต่อเชื่อมกันด้วยพันธะคู่ เป็นลักษณะของสีกลุ่มเอโซโครโมฟอร์นี้เองที่เป็นส่วนทำให้เกิดสี ดังแสดงในวงกลมสีแดง นอกจากนี้ในโครงสร้างโมเลกุลยังประกอบด้วยออกโซโครม ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกับเส้นใยยึดติดกัน โครงสร้างส่วนนี้ประกอบไปด้วยวงเบนซีน ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ คือ กลุ่มซัลโฟนิล ดังแสดงในวงกลมสีน้ำเงิน

กระบวนการในการลดรูป (Reduction cleavage) ของสารประกอบเอโซนั้น ทำได้โดยการทำลายพันธะคู่โดยสารรีดิวซ์ (Reducing Agent) ทำให้ตัวสีย้อมถูกทำลายลง เมื่อพันธะของสารประกอบเอโซถูกทำลายลงจะเกิดเป็นกลุ่มเอมีน 1 กลุ่ม ประกอบด้วยไนโตรเจน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 2 อะตอม กระบวนการในการลดรูปของสารประกอบเอโซ แสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าจากกระบวนการลดรูปของสารประกอบเอโซ จะได้สารผลิตภัณฑ์ คือ อะโรมาติกเอมีนเกิดขึ้น ซึ่งสารอะโรมาติกเอมีนมีอันตรายต่อสุขภาพในด้านการก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์



รูปที่ 2.7 กระบวนการลดรูปของสารประกอบเอโซ (Masayuki et al., 2001)

สหภาพยุโรป (EU) ได้กำหนดบังคับใช้ EU Directive (2002/61/EC) โดยข้อบังคับนี้ระบุการห้ามใช้สารฟอกย้อมที่ก่อให้เกิดสารจำพวกอะโรมาติกเอมีน ในผลิตภัณฑ์ หรือ ส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิตสิ่งทอซึ่งอาจเกิดการสัมผัสโดยตรง หรือทางอ้อมกับผิวหนัง หรือ ทางปาก สำหรับประเทศไทยได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3993 (พ.ศ. 2552) ออกความตามในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กำหนดห้ามใช้สีเอโซที่ก่อให้เกิดสารจำพวกอะโรมาติกเอมีนเกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟอกย้อม ทำให้น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมประกอบด้วย สารอินทรีย์ สารเคมี และสีย้อมมากมายหลายชนิด ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม ทำให้ต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมที่เหมาะสม ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ วิธีการกำจัดสีย้อมที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี การออกซิเดชัน การดูดซับ เทคโนโลยีเยื่อกรอง และการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน เป็นต้น ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1 การบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment)

การบำบัดสีย้อมแบบใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนจะมีเอนไซม์ mono และ di-oxygenase catalyse ซึ่งสามารถรวมกับออกซิเจน และทำให้เกิดการแตกพันธะอะโรมาติก (Ring fission) (Madigan, Martinko, and Parker, 2003) ทำให้สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และนอกจากนี้ยังสามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้ แต่กำจัดสีเอโซ และ สารอาหารได้ค่อนข้างต่ำ (Tunay et al., 1996) จากการศึกษาของ Khelifi et al. (2008) ใช้ระบบชีเอสทีอาร์ในการกำจัดสีย้อมอินดิโกยัด พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ร้อยละ 80 และสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 60 กระบวนการใช้ออกซิเจนนั้นถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม และพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนไม่สามารถสลายโครงสร้างสีย้อมเอโซได้แต่สามารถกำจัดสารอะโรมาติกเอมีนได้

โรงงานฟอกย้อมขนาดเล็ก และขนาดกลางในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล พื้นที่โรงงานส่วนใหญ่มีเนื้อที่จำกัด และที่ดินมีราคาแพง ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมควรเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้พื้นที่น้อย และมีการดูแลระบบไม่ยุ่งยากมากนัก ระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ในโรงงานฟอกย้อม มีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ ระบบเอส และระบบเอสบีอาร์

2.5.1.1 Extended aeration

เป็นกระบวนการที่มีระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสีย และอายุสลักจั่นานกว่าระบบเอเอสอื่น ๆ ดังนั้นขนาดถังเติมอากาศจะมีขนาดใหญ่กว่าระบบอื่น ๆ แต่มีข้อดี คือ ง่ายต่อการควบคุมระบบให้ได้ประสิทธิภาพสูง ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องถ่ายสลักจั่นทิ้งออกไปจากระบบเหมือนระบบอื่น ๆ เนื่องจากในทางทฤษฎีแล้วจะไม่มีจุลินทรีย์ส่วนเกินเกิดขึ้นมา แต่ในทางปฏิบัติมักจะมีพวกสารย่อยสลายไม่ได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องถ่ายสลักจั่นออกจากระบบบ้าง

2.5.1.2 ระบบเอสปีอาร์

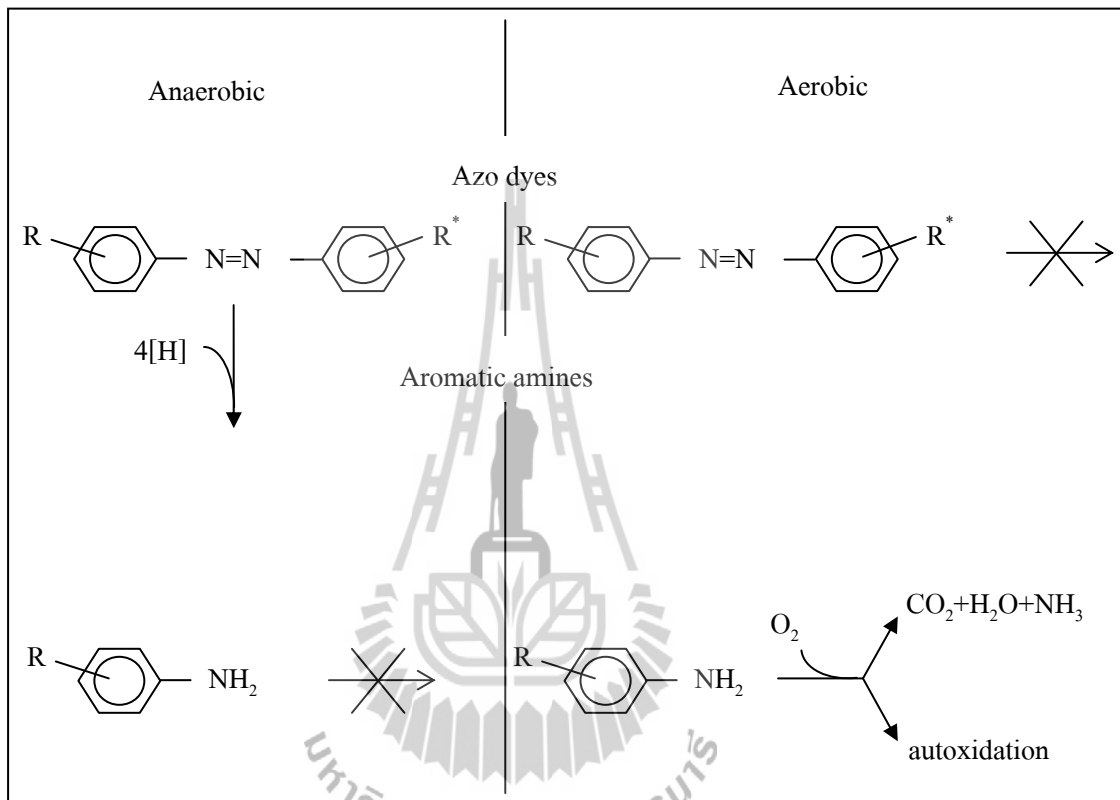
เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถังเติมอากาศเพียงถังเดียว สามารถทำหน้าที่ทั้งการเติมอากาศเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำหน้าที่แยกตะกอนด้วยการตกตะกอนภายในถังเดียวกัน คือ เป็นระบบที่ปล่อยให้ น้ำเสียไหลเข้าถังที่มีสลักจั่นอยู่ภายในถัง และเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศ หลังจากนั้นจะหยุดเติมอากาศทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งจะได้น้ำใสส่วนบนที่สามารถปล่อยทิ้งออกได้

ระบบเอเอสมีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตามในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมนั้นพบว่ามีปัญหา น้ำทิ้งหลังผ่านระบบเอเอส ยังคงมีความเข้มข้นของสีย้อม และสารอินทรีย์หลงเหลือในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านออกจากระบบไม่ได้มาตรฐาน และก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่าง ๆ ต่อแหล่งรับน้ำสาธารณะ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

2.5.2 การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic treatment)

กระบวนการบำบัดสีย้อมแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น จุลินทรีย์จะใช้เอนไซม์ azo reductases ทำลายพันธะเอโซ และได้สารที่มีโมเลกุลเล็กกล คือ สารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Gingell and Walker, 1971) ซึ่งในขั้นตอนการย่อยสลายนี้อาจไม่สามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสีย เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ทำให้สีย้อมมีโมเลกุลเล็กกลเท่านั้น และนอกจากนี้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยนั้น ยังมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง (Basibuyuk and Forster, 1997; Ong et al., 2005a) จากการศึกษาของ Manu and Chaudhari (2002) ใช้กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนในการกำจัดสีแอซิด และสีรีแอคทีฟ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 95 และร้อยละ 92 ตามลำดับ กระบวนการนี้มีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูง แต่ข้อเสีย คือ ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ไม่สูงมากนัก (Field et al., 1995; Delée et al., 1998) สอดคล้องกับการศึกษาของ Sponza and Isik (2002) ศึกษาการกำจัดสีย้อมโดยใช้ระบบยูเอเอสบี ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15.7 ชั่วโมง พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีร้อยละ 59 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 85 จากการผลการทดลองทำให้ทราบว่ากระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ไม่สูงมากนัก จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่ากระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสีของเอโซให้อยู่ในรูปอะโรมาติกเอมีน ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวสามารถกำจัดสีได้ แต่กระบวนการดังกล่าวไม่สามารถกำจัดสารอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.8 กระบวนการบำบัดสีของเอโซ และอะโรมาติกเอมีนแบบไม่ใช้
และใช้ออกซิเจน (Zee and Villaverde, 2005)

2.5.3 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation)

การสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเติมสารเคมีพวกสารสร้างตะกอนผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอย ขั้นตอนที่สอง คือ การกวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้เกิดการรวมตะกอน ซึ่งมีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยกับสารสร้างตะกอนจนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ การตกตะกอนเป็นกระบวนการกำจัดที่ใช้ง่าย ใช้ง่าย กว้างขวาง สามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้ เช่น ไอออนของอลูมิเนียม (Al^{3+}), แคลเซียม (Ca^{2+}) และ เฟอร์ริก (Fe^{3+})

(Mishra and Bajpai, 2006; Mishra, Bajpai, and Pandey, 2006; Yue et al., 2008) ซึ่งความสามารถในการตกตะกอนก็ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ และสารสร้างฟล็อก ระยะเวลาการผสม และระยะเวลาตกตะกอน เป็นต้น (Kace and Linford, 1975; Lee, Matthews, and Pavlostathis, 2006). El-Gohary and Tawfik (2009) ได้ศึกษากระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารช่วยตกตะกอนที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) และปูนขาว (CaO) ในการกำจัดสีย้อมชนิดสีย้อมไคเร็กซ์ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนสีย้อมของสารส้มเท่ากับ 6.0 และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนสีย้อมของปูนขาวเท่ากับ 11.7 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 90 และ 78.9 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี ร้อยละ 58.6 และ 50 ตามลำดับ จากการศึกษาของ Ciabatti, Tognotti, and Lombardi (2010) ใช้โพแทสเซียมเฟอร์เรท เป็นสารโคแอกกูแลนต์ปริมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมน้อยกว่าร้อยละ 50 จึงต้องมีการเติมสารพอลิเมอร์เป็นสารช่วยโคแอกกูแลนต์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 95 และจากการศึกษาของ Hai, Yamamoto, and Fukushi (2007) พบว่าวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมีนี้ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีสูง และผลในการกำจัดสีเอโซ เช่น สีรีแอคทีฟ สีแอซิด และสีเบสิค พบว่าการเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มไม่สามารถทำได้ เนื่องจากสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก นอกจากนั้นข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ ก่อให้เกิดกากตะกอนซึ่งต้องบำบัดกากตะกอนเหล่านั้นเพิ่ม และไม่เหมาะสมกับการบำบัดสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้บางชนิด (Anjaneyulu, Chary, and Rai, 2005)

2.5.4 การออกซิเดชัน (Oxidation method)

เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง โดยสีจะทำปฏิกิริยาอย่างแรงกับสารออกซิไดซ์ทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออก กลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี วิธีการออกซิเดชันสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agents) ที่รุนแรง เช่น คลอรีน (Chlorine) โอโซน (Ozone) และเฟนตันรีเอเจนต์ (Fenton's reagent) เป็นต้น ได้มีการศึกษาวิจัยพบว่า

- การกำจัดสีโดยใช้คลอรีน สามารถกำจัดสีที่ละลายน้ำได้ เช่น สีรีแอคทีฟ สีแอซิด สีไคเร็กซ์ แต่ไม่สามารถกำจัดสีดิสเพอร์ส ซึ่งเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำได้ (Namboodri, Perkins, and Walsh, 1994a; 1994b) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Oliveira et al. (2010) ที่ศึกษาการใช้คลอรีนในการกำจัดสีดิสเพอร์ส 3 ชนิด คือ Disperse red 1 Disperse red 13 และ Disperse orange 1 พบว่าไม่สามารถกำจัดสีย้อมชนิดนี้ได้ นอกจากนี้จากการศึกษาของ Pizzolato et al. (2002) ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ในการกำจัดสี พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้เพียงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Szpyrkowicz, Juzzolino, and Kaul (2001) ที่พบว่าไฮโปคลอไรท์สามารถ

กำจัดสีได้เพียงร้อยละ 35 ถึงแม้ว่าการใช้คลอรีนในการบำบัดสีย้อมจะเป็นวิธีการที่มีราคาถูก แต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ (Banat et al., 1999)

- การกำจัดสีโดยใช้โอโซน คือ กระบวนการทางเคมีที่ใช้กำจัดสีจากน้ำทิ้ง โดยการทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออกกลายเป็นสารที่ไม่มีสี เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เมื่อไม่นานมานี้ เรียกว่า การโอโซนเนชัน (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลของสีด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จึงจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ในโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักจะประกอบด้วยสารไนโตรเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม แต่มีข้อดีคือสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย Sundrarajan, Vishnu, and Joseph (2007) ศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟ (สีเหลือง และสีน้ำเงิน) โดยวิธีโอโซนเนชัน พบว่าสามารถกำจัดสีได้สำเร็จที่ระยะเวลาสัมผัส (Contact time) 5 นาที สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึงร้อยละ 90 และสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอไซด์ได้ร้อยละ 50 และ Shu and Chang (2005) ใช้วิธีโอโซนเนชันในการกำจัดสีไดเรกต์ (สีเหลือง) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าใช้ระยะเวลาสัมผัส 16 นาที สามารถกำจัดสีความเข้มข้นลดลงเหลือ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ Robinson et al. (2001) พบว่าข้อดีของการใช้โอโซน คือ สามารถนำไปใช้ในลักษณะที่เป็นก๊าซจึงไม่ไปเพิ่มปริมาณของน้ำเสีย และปริมาณสลัดจ์ แต่มีข้อเสีย คือ โอโซนมีครึ่งชีวิตสั้น (Short half-life) ประมาณ 20 นาที ไม่สามารถกำจัดสีคิสเพอร์ส และสีที่ไม่ละลายน้ำ มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอไซด์ต่ำ นอกจากนี้ราคาของโอโซนสูง (Anjaneyulu, Chary, and Raj, 2005) จากการศึกษาของ Koottatep (1993) พบว่าการกำจัดสีโดยใช้โอโซนจะทำให้โทนของสีเปลี่ยนไป และสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 50 กำจัดซีโอไซด์ได้ร้อยละ 30 ในขณะที่ทำให้ค่าบีโอดีสูงขึ้น เนื่องจากโอโซนจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น ทำให้การกำจัดสีโดยใช้โอโซนเหมาะที่จะใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้น ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ สอดคล้องกับการศึกษาของ Szpyrkowicz, Juzzolino, and Kaul (2001) พบว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอไซด์ไม่สูงมาก โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์เพียงร้อยละ 10 เนื่องจากการใช้โอโซนในการบำบัดก่อให้เกิดสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าซีโอดีในน้ำเสีย

- การกำจัดสีโดยใช้เฟนตันรีเอเจนต์ เป็นสารเคมีที่เกิดจากการผสมกันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เมื่อทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH\cdot$) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก (Meric, Kaptan, and Tunay, 2003; Wang, 2008) ทำให้สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้หลากหลาย ทั้งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก และสารอินทรีย์เป็นพิษ (Kuo, 1992; Lin and Peng, 1995)

กระบวนการบำบัดไม่ยุ่งยาก และราคาไม่แพง (Bigda, 1995) ประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยเฟนตันรีเอเจนต์นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอัตราส่วนระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการศึกษาของ Ramirez, Costa, and Madeira (2005) ใช้วิธีเฟนตันรีเอเจนต์ในการกำจัดสีย้อม พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 3 อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10.0 มิลลิโมลาร์ และอัตราส่วนระหว่างเฟอร์รัสไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.08 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 99.7 และจากการศึกษาของ Kim et al. (2004) โดยใช้เฟนตันรีเอเจนต์ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำ (สีรีแอคทีฟ) สีที่ไม่ละลายน้ำ (สีดิสเพอร์ส) และสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ และสามารถกำจัดซีไอดีร้อยละ 92.0-95.8 และร้อยละ 70.0-80.3 ตามลำดับ และกำจัดสีย้อมดิสเพอร์ส และสามารถกำจัดซีไอดีได้ร้อยละ 83.3-85.0 และร้อยละ 48.0-56.2 ตามลำดับ วิธีเฟนตันรีเอเจนต์มีความสามารถกำจัดได้ทั้งสีที่ละลายน้ำ และสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีข้อเสีย คือ ก่อให้เกิดกากตะกอน และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเฟนตันก่อให้เกิดโลหะหนักของเหล็กตกค้างอยู่ซึ่งต้องมีการกำจัดต่อไป

2.5.5 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารหรือโมเลกุล ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว หรือก๊าซให้มาเกาะจับหรือดูดติดอยู่บนผิวของของแข็ง โดยที่โมเลกุล หรือสารที่มากูดติดบนผิวของของแข็ง เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ ส่วนของแข็งที่สารมากูดติด เรียกว่า ตัวดูดซับ การกำจัดสีโดยวิธีดูดซับ การเลือกตัวดูดซับนั้นพิจารณาจากลักษณะเฉพาะ เช่น มีสัมพรรคภาพสูง (High affinity) และมีความสามารถในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) (Subramaniam et al., 2009) ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การใช้ถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิว (Surface area) มาก ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 500-2,000 ตารางเมตรต่อกรัม (Carrott, Ribeiro, and Roberts, 1991; Ozacar and Sengil, 2003) ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดโมเลกุลจำนวนมาก ๆ การเกาะติดที่ผิวได้ จึงมีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการดูดซับสีย้อม ข้อจำกัดของการใช้วิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพง (Robinson et al., 2001) ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำ และมักเกิดปัญหาจากการอุดตัน และต้นทุนในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์สูง (อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์, 2538) จากการศึกษาของ Choy, Mckay, and Porter (1999) พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมแอซิด 3 ชนิด คือ Acid red 114 Acid yellow และ Acid blue มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 101.0 128.8 และ 100.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาสารดูดซับชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ได้สารดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง และต้นทุนในการผลิตต่ำ เช่น จากการศึกษาของ Malik (2003) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อม Acid yellow 36

ของถ่านที่ผลิตจากชี้เลื่อย และแกลบ พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับ 183.8 และ 86.9 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ Kadirvelu et al. (2000) ใช้ชี้เลื่อยจากต้นมะพร้าวในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมพบว่าสามารถสีย้อมได้ร้อยละ 95 และกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี ได้ร้อยละ 56 ข้อดีของการกำจัดสีด้วยวิธีการดูดซับ คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง แต่มีข้อเสียเรื่องการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับหรือการกำจัดตัวดูดซับที่ใช้แล้ว (Karcher, Kornmuller, and Jekel, 2001; Anjaneyulu, Chary, and Raj, 2005)

2.5.6 เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อกรอง สามารถใช้ในการกำจัดสีที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำได้ (Cheremisinoff, 2002; Avlonitis et al., 2008) เป็นการทำให้โมเลกุลของสีย้อมรวมกันอย่างหนาแน่นบนด้านหนึ่งของเมมเบรน ในขณะที่น้ำจะผ่านเยื่อกรองไปได้ กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อกรอง เช่น ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) และรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) เทคนิคเหล่านี้มีข้อดี คือ สามารถใช้บำบัดน้ำทิ้งในปริมาณมากได้รวดเร็ว และยังสามารถนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ (Marcucci et al., 2001; Fersi and Dhahbi, 2008) และสามารถกำจัดสี บีไอดี และซีไอดีในน้ำเสีย (Dos Santos, Cervantes, and Van Lier, 2007) จากการศึกษาของ Dhale and Mahajani (2000) ใช้เยื่อกรองชนิดนาโนฟิลเตรชันในการกำจัดสีย้อมดิสเพอร์ส พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 99 และกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีร้อยละ 97 นอกจากนี้จากการศึกษาของ Qin, Oo, and Kekre (2007) พบว่าเยื่อกรองชนิดนาโนฟิลเตรชัน สามารถกำจัดความขุ่น ความกระด้าง ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปทีไอซี และสีทำให้น้ำน้ำเสียกลับมาใช้ในกระบวนการย้อมได้ใหม่อีกครั้ง อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเยื่อกรองมีข้อเสีย เนื่องจากต้นทุนของอุปกรณ์มีราคาสูง และเกิดปัญหาการอุดตันเยื่อกรอง (Robinson et al., 2001; Dos Santos, Cervantes, and Van Lier, 2007)

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดสีย้อมโดยวิธีต่าง ๆ สามารถสรุปข้อดี และข้อเสียของแต่ละกระบวนการ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการบำบัดสีข้อม

วิธีการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบเอเอส	สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544	<ul style="list-style-type: none"> • มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ 	<ul style="list-style-type: none"> • น้ำทิ้งหลังผ่านระบบเอเอส ยังคงมีความเข้มข้นของสีข้อมและสารอินทรีย์หลงเหลือในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านออกจากระบบไม่ได้มาตรฐาน และก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่าง ๆ ต่อแหล่งรับน้ำสาธารณะ
การบำบัดแบบใช้ออกซิเจน	Madigan, Martinko, and Parker (2003) Tunay et al. (1996) Khelifi et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง • สามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้ 	<ul style="list-style-type: none"> • กำจัดสีเอโซ และสารอาหารได้ค่อนข้างต่ำ
การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน	(Gingell and Walker, 1971; Basibuyuk and Forster, 1997; Ong et al., 2005a; Field et al., 1995; Delée et al., 1998; Sponza and Isik, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถทำลายพันธะเอโซ และ สามารถกำจัดสีได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> • ไม่สามารถลดค่าซีโอดีได้ • สารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการบำบัดสีย้อม (ต่อ)

วิธีการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอน ด้วยสารเคมี	(Mishra and Bajpai, 2006; Mishra, Bajpai, and Pandey, 2006; Yue et al., 2008; El-Gohary and Tawfik, 2009; Hai, Yamamoto, and Fukushi, 2007; Anjaneyulu, Chary, and Raj, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • เหมาะกับกระบวนการกำจัดสีขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ • มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ 	<ul style="list-style-type: none"> • ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง • ไม่สามารถใช้สารส้มในการตกตะกอนสีรีแอกทีฟ สีแอซิด และสีเบสิกได้เนื่องจากสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก • ก่อให้เกิดกากตะกอนทำให้ต้องมีการบำบัดกากตะกอนต่อไป • ไม่สามารถบำบัดสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้บางชนิด
การกำจัดสีโดยใช้คลอรีน	(Namboodri, Perkins, and Walsh, 1994a; 1994b; Oliveira et al., 2010; Pizzolato et al., 2002; Banat et al., 1999)	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถกำจัดสีที่ละลายน้ำ เช่น สีรีแอกทีฟ สีแอซิด สีไดเร็กต์ได้ • เป็นวิธีการที่มีราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> • ไม่สามารถกำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำได้ เช่น สีดิสเพอร์ส • มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพียงระยะเวลาสั้น ๆ • ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการบำบัดสีย้อม (ต่อ)

วิธีการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
การกำจัดสีโดยใช้โอโซน	(Robinson et al., 2001; Anjaneyulu, Chary, and Raj, 2005; Kootatep, 1993; Szpyrkowicz, Juzzolino, and Kaul, 2001)	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย • ไม่ไปเพิ่มปริมาณของน้ำเสียและปริมาณสลัคจ์ • เหมาะที่จะใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> • เกิดสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม • โอโซนมีครึ่งชีวิตสั้น (short half-life) ประมาณ 20 นาที • ไม่สามารถกำจัดสีดิสเพอร์สและสีที่ไม่ละลายน้ำ • ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีต่ำ • ราคาของโอโซนสูง • ทำให้ค่าบีโอดี สูงขึ้นเนื่องจากโอโซนจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น • ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีไม่สูงมากเนื่องจากการใช้โอโซน ก่อให้เกิดสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าซีโอดีในน้ำเสีย

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการบำบัดสีย้อม (ต่อ)

วิธีการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
การกำจัดสีโดยใช้เฟนตันรีเอเจนต์	(Meric, Kaptan, and Tunay, 2003; Wang, 2008; Kuo, 1992; Lin and Peng, 1995; Bigda, 1995; Kim et al., 2004)	<ul style="list-style-type: none"> • มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก • สามารถออกซิไดซ์ทั้งสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ • กระบวนการบำบัดไม่ยุ่งยาก และราคาไม่แพง • กำจัดได้ทั้งสีที่ละลายน้ำและสีที่ไม่ละลายน้ำ • มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 	<ul style="list-style-type: none"> • เกิดตะกอนและโลหะหนักของเหล็ก ซึ่งต้องมีการกำจัดต่อไป
การดูดซับ	(Robinson et al., 2001; อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์, 2538; Kadirvelu et al., 2000; Karcher, Kornmuller, and Jekel, 2001; Anjaneyulu, Chary, and Raj, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง • มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> • ถ่านกัมมันต์มีราคาแพง • ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำ • เกิดปัญหาจากการอุดตัน • ต้นทุนในการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ของถ่านกัมมันต์สูง • ต้องมีวิธีในการกำจัดตัวดูดซับที่ใช้แล้ว

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการบำบัดสีย้อม (ต่อ)

วิธีการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
เทคโนโลยีเยื่อกรอง	(Cheremisinoff, 2002; Avlonitis et al., 2008; Marcucci et al., 2001; Fersi and Dhahbi, 2008; Dos Santos, Cervantes, and Van Lier, 2007; Robinson et al., 2001)	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถกำจัดสีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้ • สามารถใช้บำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณมากได้รวดเร็ว • สามารถนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ • มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมและกำจัดสารอินทรีย์สูง • สามารถทำให้น้ำน้ำเสียกลับมาใช้ในกระบวนการย้อมได้ใหม่อีกครั้ง 	<ul style="list-style-type: none"> • ต้นทุนของอุปกรณ์มีราคาสูง • เกิดปัญหาการอุดตัน

2.6 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

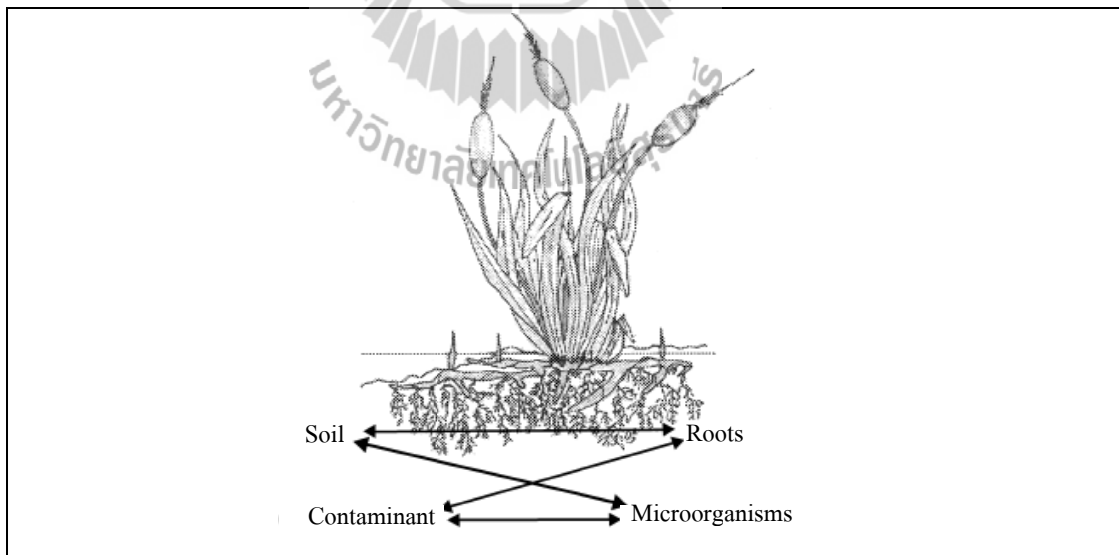
พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetlands) หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึง หรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดินในระยะเวลาานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอิมตัวด้วยน้ำไว้ได้ (U.S. EPA, 2000)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed wetlands) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติด้วยการปลูกพืชต่าง ๆ บนทราย กรวด หรือดิน ซึ่งใช้เป็นตัวกลาง ในบางครั้งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อาจถูกออกแบบให้มีรูปร่างแตกต่างกันไป พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีความแตกต่างกับพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ ตรงที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้มากขึ้น ดังนั้น ข้อได้เปรียบของการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ สามารถสร้างได้ในเกือบทุกพื้นที่ แม้แต่ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดในเรื่องการใช้พื้นที่ สามารถสร้างสภาวะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพให้มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแต่ละประเภท เป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำ และไม่ต้องดูแลรักษาระหว่างการเดินระบบ (Scholz and Xu, 2002; Kadlec and Knight, 2006) นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่ง่ายต่อการใช้งาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และเดินระบบต่ำ

รวมทั้งสามารถออกแบบในเรื่องของรูปแบบการไหลของน้ำ การใช้วัสดุตัวกลางได้ (Reed, 1993; Kadlec and Knight, 2006) กลไกในการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประกอบไปด้วย การดูดซับโดยตัวกลาง การแลกเปลี่ยนประจุ การกรอง การนำไปใช้โดยพืชและกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน (Davies and Cottingham, 1994) ด้วยเหตุนี้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จึงเป็นระบบที่ได้รับความสนใจในการใช้บำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น เช่น น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากการเกษตร รวมไปถึงน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม (Heinss and Koottatep, 1998; Schulz, Gelbrecht, and Rennert, 2003; Vymazal, 2009)

2.6.1 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ พืช ดินหรือตัวกลางชนิดอื่น ๆ และจุลินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปแสดงให้เห็นว่า กลไกการบำบัดมลสารของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยรากพืชสามารถนำออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศลงไปสู่ราก ทำให้บริเวณรอบ ๆ รากพืช มีออกซิเจนสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายมลสาร และเป็นที่เกาะอาศัยของจุลินทรีย์ ส่วนของตัวกลาง ทำหน้าที่เป็นแหล่งสารอาหาร และแร่ธาตุที่จำเป็นของจุลินทรีย์ ช่องว่างภายในดิน จะช่วยให้น้ำเสียสามารถไหลผ่านได้ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งให้จุลินทรีย์ยึดเกาะบนผิวดิน ภายในช่องว่างและช่วยในการดูดซับมลสารต่าง ๆ นอกจากนี้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ก็มีจุลินทรีย์ทั้งแบบใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจนที่ช่วยในการย่อยสลายมลสาร



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Stottmeister et al., 2003)

2.6.1.1 พืช

หน้าที่หลักของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์คือ การลำเลียงออกซิเจน โดยออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่ทางใบของพืช และลำเลียงออกซิเจนซึ่งใช้หลักการแพร่ (Diffusion) และการไหลพาของอากาศ (Convective) ลงไปยังระบบราก ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ดีกว่าการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียว สำหรับชนิดของพืชที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบ่งเป็น พืชใต้น้ำ (Submerged plant) พืชโผล่พ้นน้ำ (Emerged plant) และพืชลอยน้ำ (Floating plant) แต่ในปัจจุบันนี้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นิยมใช้พืชโผล่พ้นน้ำ ได้แก่ ทุปถาญี กก อ้อ และแห้วทรงกระเทียม เป็นต้น โดยส่วนต่าง ๆ ของพืชที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีบทบาทต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

คุณสมบัติของพืชที่จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำ คือ พืชที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น เพราะพืชจะคุ้นเคยกับสภาพภูมิอากาศ และดิน จึงสามารถเจริญเติบโตได้ดี (U.S. EPA, 2000) ทนต่อสารมลพิษในน้ำเสียได้ดี ผลิตมวลชีวะได้มาก มีอัตราการสังเคราะห์แสง และเจริญเติบโตได้ตลอดปี สามารถในการดูดซึม และเก็บสะสมสารต่าง ๆ ได้ และง่ายต่อการจัดการ โดยนำออกจากระบบบ้าง เพื่อไม่ให้พืชอยู่หนาแน่นเกินไป (พัฒน์ จันทรโรทัย, 2536)

ตารางที่ 2.4 บทบาทส่วนต่าง ๆ ของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ลดความเร็วลม เพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน สะสมธาตุอาหาร ลดความเข้มของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ลดความเร็วกระแสน้ำ เพื่ออัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของไบโอฟิล์ม ปล่อยออกซิเจน เพื่อสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน ดูดซับธาตุอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> ป้องกันการอุดตันของตัวกลาง ปล่อยออกซิเจนเพื่อเพิ่มการย่อยสลาย และการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ดูดซับธาตุอาหาร ปล่อยแอนติไบโอติก

หมายเหตุ : Brix, 1997

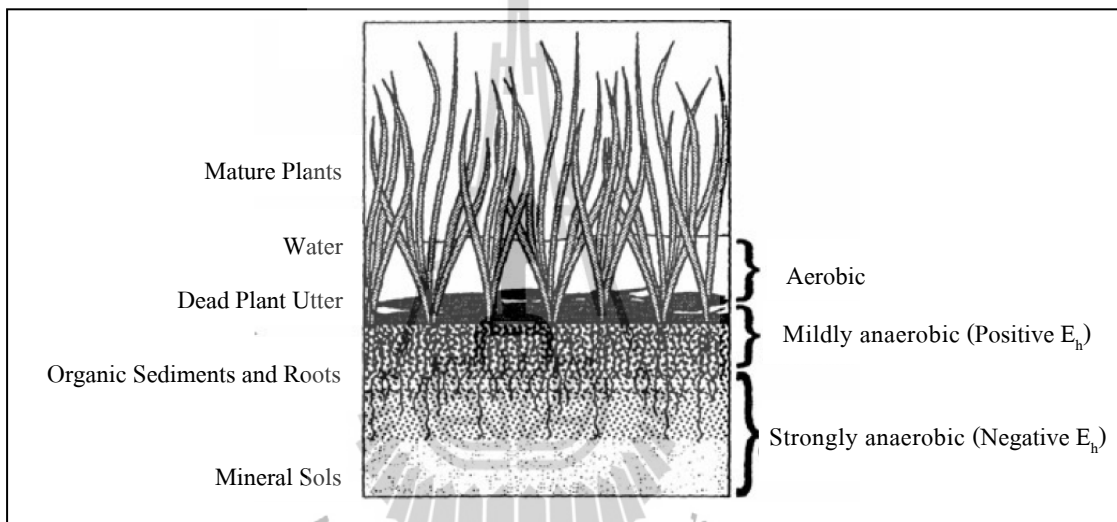
สำหรับพืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ ต้นอ้อ รากของต้นอ้อสามารถแพร่ขยายไปได้ลึก 0.6-1 เมตร สามารถดำรงชีวิตได้ที่อุณหภูมิ 10-33 องศาเซลเซียส ระดับความเค็มสูงสุดที่พืชทนได้ คือ 45 ส่วนในพันส่วน (ppt) และค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2-8 (Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988) ลักษณะของลำต้นมีความแข็งแรงกลวง และเป็นปล้อง นอกจากนี้สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้ด้วยเมล็ด เหง้า หรือลำต้น (Harris and Marshall, 1960; Galinato and van der Valk, 1986; Tucker, 1990; Marks, Lapin, and Randall, 1994) เหตุที่เลือกใช้ต้นอ้อ เนื่องจากต้นอ้อมีความทนต่อสารพิษ เนื่องจากมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมได้ สามารถปรับตัวเข้ากับลักษณะสมบัติของน้ำเสีย และนอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ peroxidase (POD) ที่มีความสำคัญในการกำจัดสีย้อม เนื่องจากเอนไซม์ peroxidase มีความสามารถในการกำจัดสารอะโรมาติกเอมีน ฟีนอล และซัลโฟเนส (Azevedo et al., 2003; Veitch, 2004) ซึ่งสารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของสีย้อม จึงสามารถช่วยกำจัดสีย้อมได้

สำหรับพืชชนิดอื่น ๆ ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ก็มีการนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อม ตัวอย่างเช่น ต้นหน่อไม้ฝรั่ง (*Zizania latifolia*) จากงานวิจัยของ Ong et al. (2009) ได้ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสีย้อมแอซิดเอโซของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลาง (Up-flow constructed wetlands) โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสีย้อมระหว่างต้นอ้อและต้นหน่อไม้ฝรั่ง พบว่าในชุดทดลอง UFCW ที่ปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 96.0 และกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 82.0 ส่วนระบบที่ปลูกหน่อไม้ฝรั่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 96.0 และกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 79.0 ถึงแม้ว่าทั้งต้นอ้อ และหน่อไม้ฝรั่งจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเท่ากัน แต่ต้นหน่อไม้ฝรั่งกลับเกิดสถานะขี้ด ใบเหลือง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดความผิดปกติต่อการเจริญเติบโตของหน่อไม้ฝรั่ง ในขณะที่ต้นอ้อสามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Mbuligwe (2005) ที่เปรียบเทียบพืช 2 ชนิด คือ ฐูปฤายี และต้นบอน ในการกำจัดน้ำเสียฟอกย้อม พบว่าฐูปฤายีมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 72.16 และกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 68.24 ส่วนต้นบอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 77.13 และกำจัดซีโอดีร้อยละ 72.45 จะเห็นได้ว่าฐูปฤายี และต้นบอนก็สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมได้เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ต้นอ้อเป็นพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการกำจัดน้ำเสียฟอกย้อม

2.6.1.2 ตัวกลาง

ตัวกลางที่นำมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ กรวด หิน และทราย ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไป โดยจะใช้เพียงชนิดหนึ่งชนิดใดหรือใช้รวมกันก็ได้ ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แสดงดังตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ แยกตามปริมาณของออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 2.10 ได้แก่

- บริเวณที่มีออกซิเจน (Aerobic) เป็นบริเวณผิวน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ บริเวณนี้สามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศได้
- บริเวณที่มีออกซิเจนน้อย (Mildly anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้นที่มีออกซิเจน ซึ่งชั้นนี้มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อยเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีซากพืชสะสมอยู่ อย่างไรก็ตามระบบบรากที่ขีดเกาะอยู่ในชั้นนี้สามารถปล่อยออกซิเจนออกมาสู่ชั้นตัวกลางได้บางส่วน
- บริเวณที่ไร้ออกซิเจน (Strongly anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ชั้นสุดท้ายหรือล่างสุดของชั้นตัวกลาง และในบริเวณนี้จะอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน



รูปที่ 2.10 ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Kadlec and Knight, 2006)

ตารางที่ 2.5 ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ชนิดของตัวกลาง	ขนาดตัวกลาง (มิลลิเมตร)	ค่าความพรุน (n)	ค่าสภาพนำเชิงกลศาสตร์ (เมตรต่อวัน)
ทรายหยาบ	2	0.28-0.32	100-1,000
หินทราย	8	0.30-0.35	500-5,000
หินเล็ก	16	0.35-0.38	1,000-10,000
หินกลาง	32	0.36-0.40	10,000-50,000
หินใหญ่	128	0.38-0.45	50,000-250,000

หมายเหตุ : U.S. EPA, 2000

2.6.1.3 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์มีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืช และที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลน หรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป (สุชาติ ปุณณสัมฤทธิ์, 2548) จุลินทรีย์ที่พบในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีมากมายหลายชนิด เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย และโปรโตซัว พวกจุลินทรีย์เหล่านี้จะเปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหาร และพลังงานในการดำเนินชีวิต และยังมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัดเนื่องจากทำให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ คือ การดูดซึม การเปลี่ยนรูป เป็นต้น

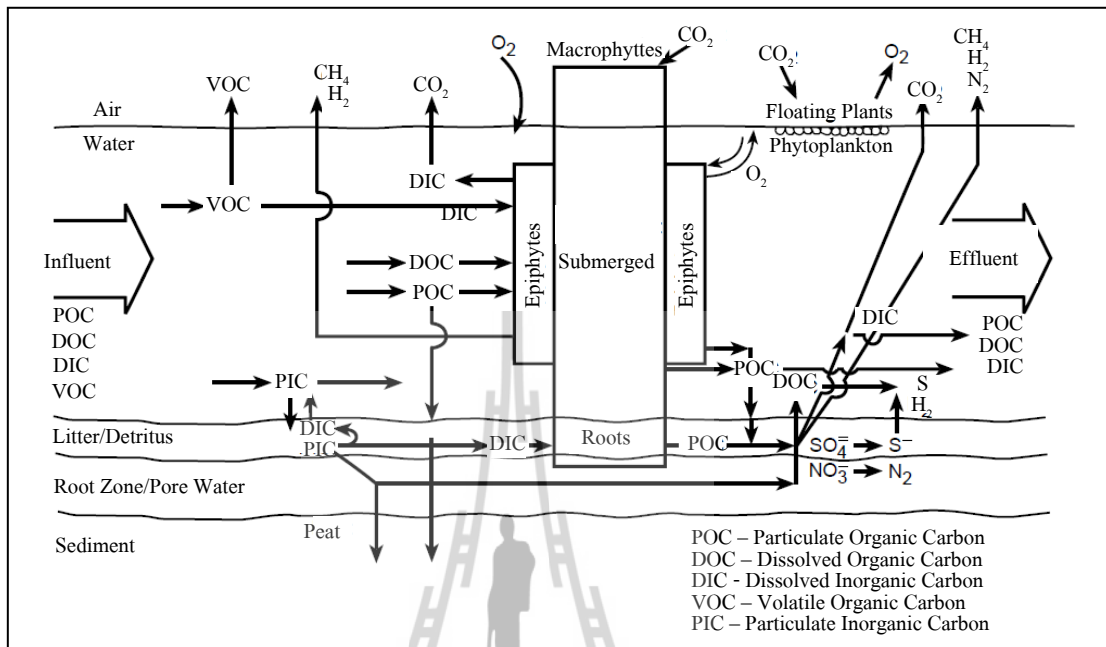
2.6.2 กลไกการกำจัดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าบึงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน เพราะจะมีการปรับระดับดินที่พื้นบ่อ และมีการควบคุมระบบการไหลของน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนหรือตัดแปลงกระบวนการทำงานต่าง ๆ ภายในบ่อได้ตามความต้องการ โดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ (Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988) พร้อมทั้งอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย การตกตะกอน การดูดซับ โดยอนุภาคของตัวกลาง การสะสมในพืช การเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ และพืชในระบบสามารถกำจัดมลสารต่าง ๆ ได้ด้วยการออกซิไดซ์

2.6.2.1 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จุลินทรีย์จะมีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่พื้นบ่อ เกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืช และที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งการกำจัดสารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง โดยจะขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำ อัตราการเจริญของจุลินทรีย์ และแหล่งออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาการบำบัดสำหรับกรณีที่เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่าน

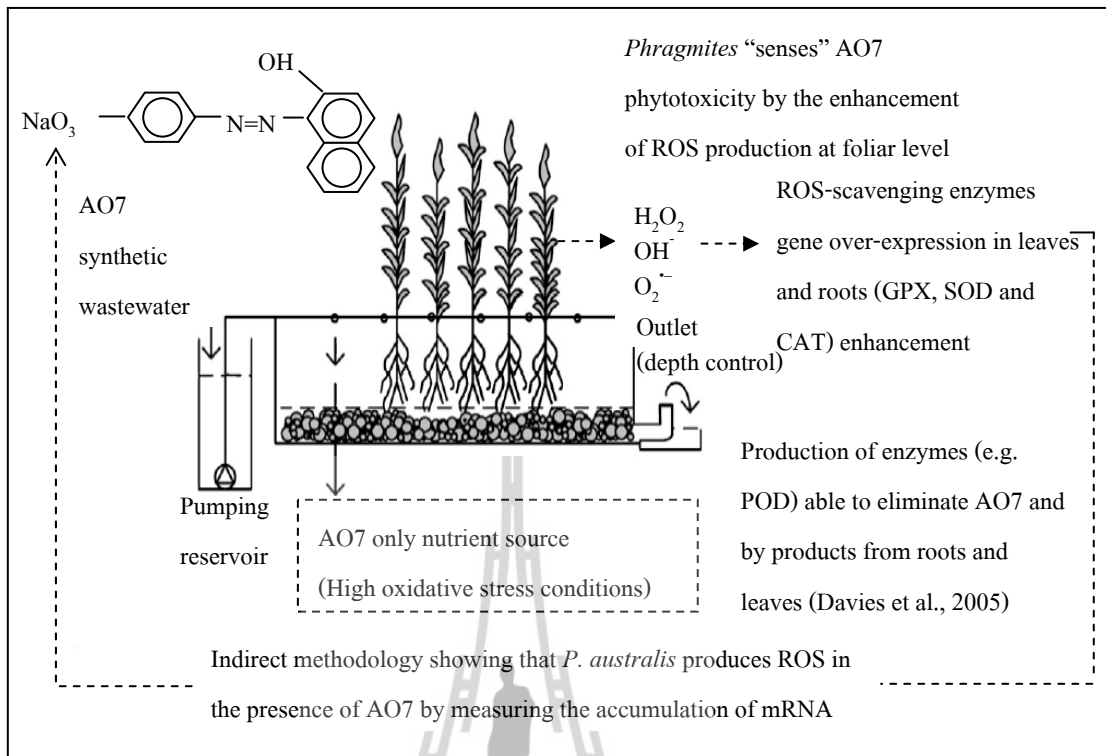
พื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่สะสมอยู่ในชั้นกรอง และอัตราการซึมของน้ำผ่านชั้นกรอง โดยออกซิเจนสามารถถ่ายเทผ่านได้ง่าย



รูปที่ 2.11 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (U.S. EPA, 2000)

2.6.2.2 กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประกอบด้วย จุลินทรีย์ ตัวกลาง และพืช โดยจุลินทรีย์จะมีหน้าที่ในการย่อยสลายสีย้อมในน้ำเสียฟอกย้อม โดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะใช้เอนไซม์ azo reductases ทำลายพันธะเอโซ ทำให้ความเข้มของสีย้อมลดลง และได้สารที่มีโมเลกุลเล็กลง คือ สารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Gingell and Walker, 1971) ส่วนจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนมีเอนไซม์ mono และ di-oxygenase catalyse ซึ่งสามารถรวมกับออกซิเจน และทำให้เกิดการแตกพันธะอะโรมาติก (Madigan, Martinko, and Paker, 2003) ทำให้สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง สำหรับตัวกลางที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะทำหน้าที่ช่วยดูดซับสีย้อม และยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ได้อีกด้วย นอกจากนี้พืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะทำหน้าที่ช่วยในการบำบัดสารมลพิษ โดยอาศัยกระบวนการทำงานของพืช เช่น การดูดซึมโดยตรง การดูดซึมมลพิษแล้วย่อยสลายด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช เพื่อเคลื่อนย้าย เก็บ หรือทำให้สารมลพิษอยู่ในรูปที่เป็นอันตรายน้อยลง

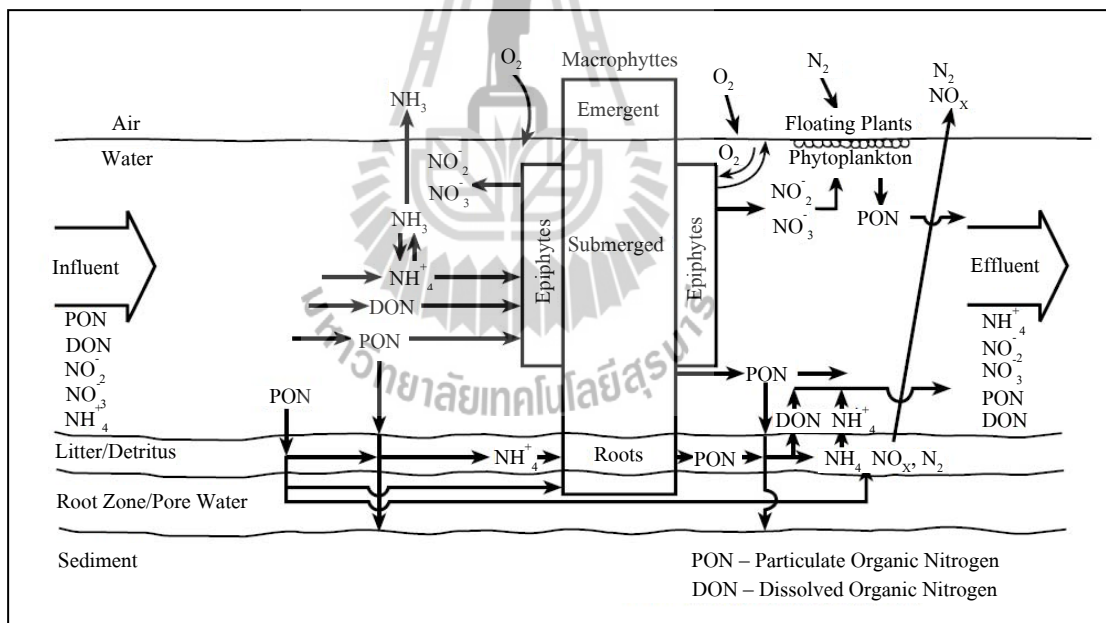


รูปที่ 2.12 กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Davies et al., 2009)

2.6.2.3 กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าการกำจัดไนโตรเจนที่เกิดขึ้น มีทั้งการกำจัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยส่วนใหญ่แล้วไนโตรเจนจะถูกกำจัดด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การดูดซึมไนโตรเจนเข้าไปในพืช และการระเหยของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่วนมากจะพบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซไนโตรเจน กระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน เป็นขั้นตอนแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน จากนั้นจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนไปเป็นไนเตรทไนโตรเจน โดยมีไนไตรท์ไนโตรเจนเป็นสารที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดในน้ำหรือดินที่มีออกซิเจนเพียงพอ ซึ่งจะรวมถึงบริเวณรอบ ๆ รากพืชด้วย แต่ถ้ำระบบอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนหรือออกซิเจน (Anoxic) กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้น และไนเตรทไนโตรเจน จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจน และก๊าซไนโตรเจนในที่สุด

นอกจากการกำจัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่เกิดจากจุลินทรีย์แล้วยังเกิดการดูดซับไนเตรทไนโตรเจน และแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยตัวกลาง โดยประจุลบของไนเตรทไนโตรเจนจะถูกยึดติดกับไอออนบวกบริเวณพื้นผิวของตัวกลาง เช่น แร่ดินเหนียวด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้า คือ ประจุลบของไนเตรทไนโตรเจนจะถูกยึดอยู่กับประจุบวกของตัวกลาง และยังเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย เมื่อไนเตรทไนโตรเจนเข้าไปแทนที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับโครงสร้างของแร่ที่เป็นองค์ประกอบของตัวกลาง เช่น โลหะหนักพวกอะลูมิเนียม เหล็ก เป็นต้น การดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยตัวกลางจะเป็นการดูดซับไอออนบวกของอนุภาคตัวกลางที่มีประจุบริเวณผิวเป็นลบ โดยแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ถูกยึดติดอยู่ที่ผิวของตัวกลางจะเกิดการยึดแบบหลวม ๆ สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกชนิดอื่นได้ (ปัทมา วิทยากร, 2533) นอกจากนี้แอมโมเนียมไนโตรเจนยังสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่เกาะบริเวณผิวของตัวกลางได้ เช่น โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน เป็นต้น (Demir, Gunay, and Debik, 2002)



รูปที่ 2.13 กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (U.S. EPA, 2000)

2.6.2.4 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

สารประกอบฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำจะมาจากน้ำที่ไหลเข้า และการพัดพาของบรรยากาศ ส่วนใหญ่จะพบฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้ ของแข็ง และฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูปของแข็ง การกำจัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ การตกตะกอนผลึก

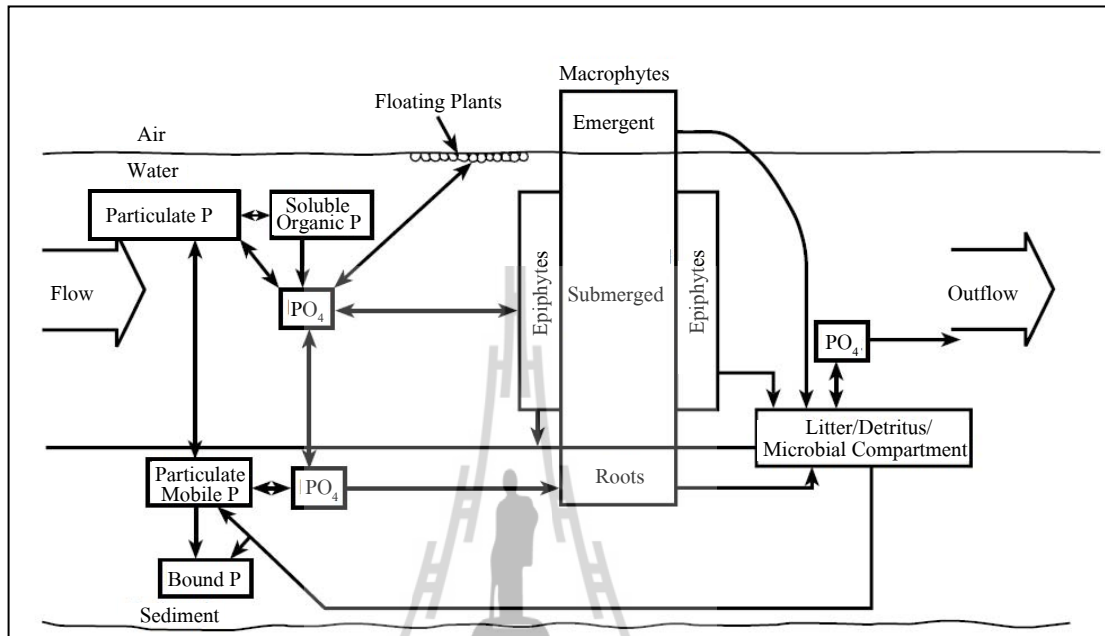
การดูดซับโดยตัวกลาง การย่อยสลายของจุลินทรีย์ และการดูดซึมโดยพืช ซึ่งส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นที่ชั้นของตัวกลาง โดยการทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมที่ประกอบอยู่ในตัวกลาง (Zhu et al., 1997; Bubba, Arias, and Brix, 2003) จากนั้นพืชจะดูดซึมผ่านทางราก และนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่อไป โดยเมื่อฟอสฟอรัสยึดติดกับตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้ว จากนั้นจะเกิดการดูดซับ และตกตะกอนผลึก โดยความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทางกายภาพของตัวกลางชนิดนั้น ๆ

กระบวนการกักเก็บ และแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยจะเห็นได้ว่าวงจรของฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีส่วนประกอบสำคัญหลายอย่าง ได้แก่ น้ำ พืช สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก อนุภาคต่าง ๆ ในระบบ และตัวกลางฟอสฟอรัสตามธรรมชาติที่เข้าสู่ระบบมาจากน้ำที่เข้าสู่ระบบ และการพัดพาในอากาศ ทั้งในรูปสารละลาย และรูปของแข็ง ส่วนฟอสฟอรัสที่ออกจากระบบจะปนไปกับน้ำออก และซึมลงไปที่สะสมในชั้นตัวกลาง และชั้นตะกอน ฟอสฟอรัสบางส่วนก็ระเหยไปในอากาศ กลไกของการกำจัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สำคัญที่สุด คือ การซึมลงไปในชั้นตัวกลาง และมีการสะสมที่ตัวกลางขึ้น ส่วนในแง่ของการดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ของพืช และกิจกรรมการนำไปใช้ประโยชน์ของสิ่งมีชีวิต เช่น ปลา หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำถือเป็นส่วนน้อย ในกรณีที่ต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงขึ้น การใช้ส่วนผสมระหว่างชั้นตัวกลางที่มีเหล็ก และอะลูมิเนียม ได้รับความนิยมน โดยอาจจะมีการเติมทรายเข้าไปเพื่อช่วยปรับค่าการนำการไหล ช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบดีขึ้น (Steiner and Freeman, 1989)

2.6.2.5 กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

โดยทั่วไปพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีระยะเวลาเก็บกักน้ำหลายวัน การลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีผลมาจากกระบวนการที่ซับซ้อนหลายกระบวนการรวมถึงการเคลื่อนย้ายของของแข็งโดยสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ด้วย โดยเฉพาะเมื่อน้ำเสียที่ผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีความเร็วของน้ำต่ำ มีพืชปกคลุม มีดินที่เหมาะสม จะช่วยในการกรองและการตกตะกอน การกำจัดของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นกระบวนการที่ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น ระยะเวลาเก็บกักเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย หากมีระยะเวลาเก็บกักนานการไหลของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไหลค่อนข้างช้า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนทางกายภาพของของแข็งแขวนลอย นอกจากนี้ความหนาแน่นของพืชจะเพิ่มการจมตัวของของแข็งแขวนลอยโดยการตกตะกอน เนื่องจากพืชจะจับของแข็งแขวนลอยไว้ในชั้นตัวกลางที่มีการสะสมของซากพืช และซากสัตว์ ซึ่งช่วยเพิ่ม

ความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง สามารถกรองของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กผ่านชั้นของดักกลาง ซึ่งช่วยป้องกันการปนออกนอกระบบของของแข็งแขวนลอย (Kadlec and Knight, 2006)



รูปที่ 2.14 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (U.S. EPA, 2000)

2.6.3 ชนิดและประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

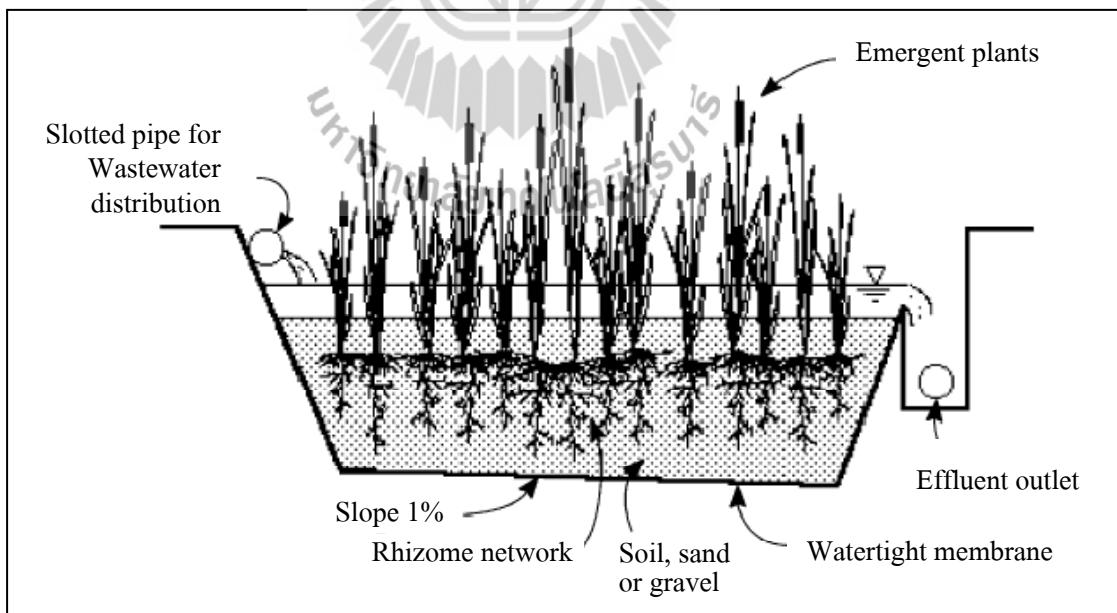
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.6.3.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง (Free Water Surface

Flow Constructed Wetland, FWS)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง ประกอบด้วย พืช ดิน หรือดักกลางชนิดต่าง ๆ เพื่อช่วยในการยึดเกาะของรากพืชให้พืชสามารถทรงตัวอยู่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยบริเวณพื้นผิวน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง สามารถรับออกซิเจนจากบรรยากาศได้โดยตรง และปริมาณออกซิเจนส่วนเกินจะถูกถ่ายเทไปยังส่วนรากของพืช โดยที่รากจะขนส่งออกซิเจนสู่ส่วนลึกของดักกลางทำให้เกิดกระบวนการบำบัดมลสารด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน (กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546) ในส่วนของดักกลางซึ่งสัมผัสกับราก และไรโซมสามารถเกิดสภาวะมีออกซิเจน และไร้ออกซิเจนได้ (Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988) มีหลากหลายงานวิจัยที่ได้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง มาใช้กำจัดมลสารต่าง ๆ เช่น การศึกษาของ Cameron et al. (2003)

ได้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง เพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากชุมชน ซึ่งน้ำทิ้งจากชุมชนมีปริมาณสารอินทรีย์ และธาตุอาหารมาก จากการศึกษาพบว่าสามารถบำบัดบีโอดีไนโตรเจนทั้งหมด ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และออร์โทฟอสเฟต ได้ร้อยละ 34 37 93 90 และ 82 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดฟิกลโคลิฟอร์ม และอีโคไล ได้ร้อยละ 52 และ 58 อีกด้วย จากการศึกษาของ Lim, Wong, and Lim (2001) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน และทองแดง (Cu) โดยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทำการปลูกต้นธูปฤาษี พบว่าสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ร้อยละ 22 และกำจัดทองแดงร้อยละ 30-57 ซึ่งการบำบัดไนโตรเจนเกิดจากการดูดซึมโดยต้นธูปฤาษี นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษานำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลางไปใช้ในการกำจัดโลหะหนัก จากการศึกษาของ Pimpan and Jindal (2009) ได้นำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการกำจัดแคดเมียม พบว่า แคดเมียมถูกกำจัดโดยการดูดซับของดิน และการนำไปใช้โดยพืช ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 61.7-99.6 และจากการศึกษาของ Maine et al. (2009) พบว่าสามารถบำบัดโครเมียมได้ร้อยละ 53 และกำจัดนิเกิล ร้อยละ 39 จากงานวิจัยต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลางสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในกำจัดมลสารได้หลากหลายประเภท แต่ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการสร้างระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง คือ ปัญหาเรื่องยุง และใช้พื้นที่มาก (กรมควบคุมมลพิษ และ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)

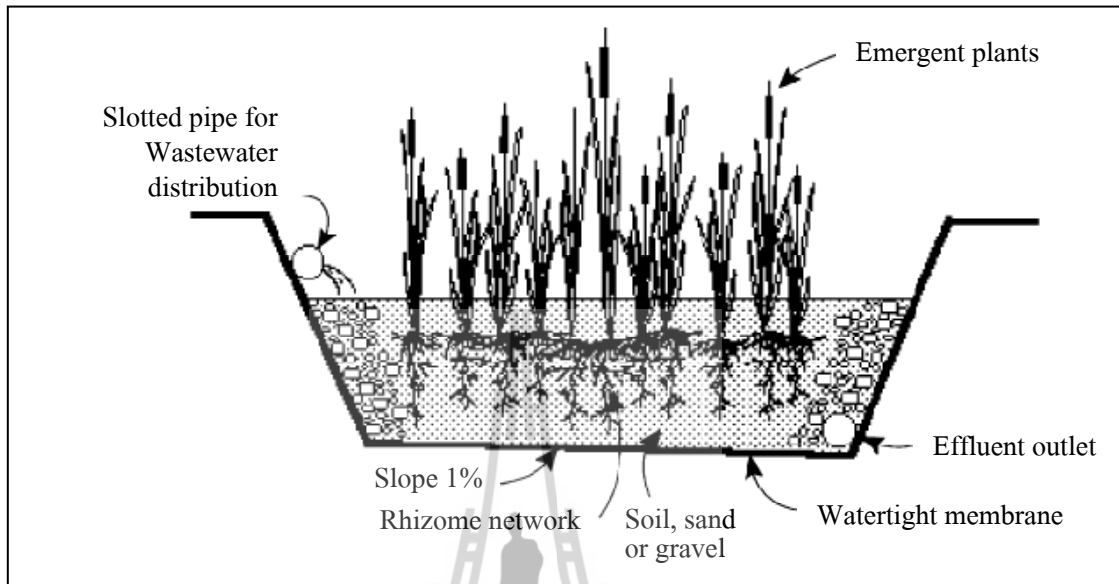


รูปที่ 2.15 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง (Polprasert, 2004)

2.6.3.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland, SF)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยผ่านลงไปในพื้นที่ชั้นดักกลางที่มีพืชน้ำขึ้นอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยดักกลางที่ใช้เป็นพวกหินบด กรวด หรือดินชนิดต่าง ๆ ซึ่งดักกลางอาจมีชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้รวมกันได้ (ลักษณะ คณานรินทร์, 2539) ความหนาชั้นดักกลางประมาณ 0.6-0.7 เมตร (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง บริเวณใต้ชั้นดักกลางจะอึดตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนขึ้น นอกจากนี้พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยังส่วนรากทำให้จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนสามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณราก (กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546) ดังนั้นจึงสามารถเกิดกระบวนการบำบัดแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจนในระบบเดียวกันได้ (Brix, 1987; Cooper et al., 1996) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ของแฉ่งแฉวนลอยทั้งหมดในโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ (Vymazal et al., 1998; Brix, Arias, and Del Bubba, 2001) ปัจจุบันมีการนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางไปใช้ในการกำจัดมลสารต่าง ๆ ในน้ำ เช่น จากการศึกษาของ Poggi-Varaldo et al. (2002) ได้ใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยปล่อยน้ำไหลเข้าระบบแนวราบ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี บีโอดี และของแฉ่งแฉวนลอยทั้งหมดร้อยละ 90 91 และ 85 ตามลำดับ นอกจากนี้ Zachritz and Jacquez (1993) ศึกษาการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงปลา พบว่าสามารถลดของแฉ่งแฉวนลอยในน้ำเสียร้อยละ 67.2 และ 87.0 ตามลำดับ โดยการกำจัดฟอสฟอรัสเกิดจากการดูดซับโดยดักกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Zhu et al., 1997; Drizo, 1998; Sakadevan and Bavor, 1998; Grüneberg and Kern, 2001) จากการศึกษา Mantovi et al. (2003) ได้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มนม พบว่า สามารถกำจัดสารอินทรีย์ ของแฉ่งแฉวนลอยทั้งหมดในโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 90.8 91.9 79.1 และ 60.6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม โดย Maine, Sune, and Hadad (2006) ได้ทำการศึกษาการบำบัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือ โครเมียม นิเกิล และสังกะสี ซึ่งเกิดจากโรงงานเหล็กโดยมีการปนเปื้อนในน้ำเสียโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ผลการศึกษาพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด โครเมียม ร้อยละ 86 และกำจัดนิเกิล และสังกะสีร้อยละ 67 จากการศึกษาของ Ojstršek, Fakin, and Vrhovsek (2007) นำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม สามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 70 และกำจัดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีร้อยละ 88 ซึ่งกลไกสำคัญในการบำบัด

สี และสารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์



รูปที่ 2.16 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Polprasert, 2004)

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลางและแบบไหลใต้ผิวดักกลาง สามารถสรุปข้อดี และข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อดี-ข้อเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง

ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง (FWS)	(กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546; Cameron et al., 2003; Lim, Wong, and Lim, 2001; Pimpan and Jindal, 2009; Maine et al., 2009)	<ul style="list-style-type: none"> • สามารถกำจัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำจัดเชื้อโรคได้ • ใช้ออกซิเจนจากบรรยากาศได้โดยตรง • สามารถกำจัดโลหะหนักได้ เช่น ทองแดง แคดเมียม โครเมียม นิเกิล 	<ul style="list-style-type: none"> • เกิดปัญหาในเรื่องของการเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง • ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมาก
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF)	(กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546; Vymazal et al., 1998; Brix, Arias, and Del Bubba, 2001; Zachritz and Jacquez, 1993; Zhu et al., 1997; Drizo, 1998; Sakadevan and Bavor, 1998; Grüneberg and Kern, 2001; Mantovi et al., 2003; Maine, Sune, and Hadad, 2006; Ojstršek, Fakin, and Vrhovsek, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> • กำจัดสารอินทรีย์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ • สามารถกำจัดโลหะหนักได้ เช่น โครเมียม นิเกิล และสังกะสี • เกิดการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการดูดซับของดักกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ • จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนสามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณรากของพืช 	<ul style="list-style-type: none"> • เกิดปัญหาการอุดตันของชั้นดักกลาง • เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้น้อยกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว

2.6.4 เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้พื้นผิวดักกลาง ดังแดงในตารางที่ 2.7 ประกอบไปด้วย

2.6.4.1 ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT)

มีหน่วยเป็น วัน กำหนดโดยตั้งสมมุติฐานว่ามีการกวนสมบูรณ์ และมีการไหลแบบตามกัน ซึ่งในสภาพจริงจะไม่พบทั้ง 2 กรณี การหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงทำได้ยากเพราะ การไหลในระบบจะซับซ้อน เนื่องจากมีพืชเจริญเติบโตอยู่ และพืชจะไปแทนที่ปริมาตรน้ำจำนวนหนึ่งด้วย (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2538)

2.6.4.2 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/(เฮกแตร์.วัน) เป็นมวลของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบต่อหน่วยพื้นที่ของระบบต่อหน่วยวัน มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

2.6.4.3 ความลึกของน้ำ

ระดับน้ำเป็นปัจจัยหลักในการเลือก และบำรุงรักษาพืชในระบบ เพราะความต้องการของพืชแตกต่างกันออกไป โดยมีตั้งแต่เจริญได้ในระดับน้ำตื้นจนถึงระดับน้ำลึก

2.6.4.4 ความพรุนของตัวกลาง

มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของระบบ หากตัวกลางที่เลือกใช้มีความพรุนสูง ประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงด้วย และใช้พื้นที่ในการกำจัดน้อยลง

2.6.4.5 ความลึกของตัวกลาง

มีหน่วยเป็น เมตร มีความสัมพันธ์กับความยาวของรากพืช หากความความลึกของชั้นตัวกลางมีความเหมาะสมกับความยาวของรากพืชจะส่งผลให้พืชสามารถพัฒนาระบบรากได้ดี

ตารางที่ 2.7 เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง และแบบไหลใต้ผิวดักกลาง

รายละเอียด	แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง	อ้างอิง	แบบไหลใต้ผิวดักกลาง	อ้างอิง
ความลึกของน้ำ (เมตร)	0.1-0.6	Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988; Metcalf and Eddy, 2003	0.3-0.8	Metcalf and Eddy, 2003; U.S.EPA, 2000
	0.6-0.9	U.S. EPA, 2000		
ความลึกของดักกลาง (เมตร)	0.2-0.3	Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988; Watson and Hobson, 1989; Cooper et al., 1996	0.5-0.6	U.S.EPA, 2000; Ong et al., 2009
ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (วัน)	2-3	U.S. EPA, 2000	2-15	Metcalf and Eddy, 2003; Ong et al., 2009
	4-15	Metcalf and Eddy, 2003		
อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (กิโลกรัม/เฮกแตร์.วัน)	< 112	Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988	16-60	U.S.EPA, 2000

2.7 หินดินดาน

หินดินดาน (Shale) เป็นหินตะกอนเนื้อละเอียดที่ประกอบด้วยตะกอนขนาดดินเหนียว (Clay) และขนาดทรายแป้ง (Silt) เกิดจากการทับถมของโคลน และดินเหนียวเป็นเวลานาน ๆ เกิดการสะสมตัวเมื่อกระแสน้ำที่พัดพาเอาตะกอนเหล่านี้มา มีความเร็วลดลง ชั้นหินดินดานเป็นชั้นหิน

ที่มีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ เนื้อหินละเอียดมาก กะเทาะหรือหลุดเป็นแผ่นได้ง่าย มีค่าความพรุนสูง แต่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ต่ำ มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 แหล่งของหินดินดานในประเทศไทย ในภาคกลางมีแหล่งผลิตที่จังหวัดสระบุรี เพชรบุรี และราชบุรี ส่วนภาคใต้มีแหล่งผลิตที่จังหวัดนครศรีธรรมราช และสงขลา หินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54-60 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11-16 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 4-5 (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; อมรา คาวไธสง, 2550; Martin Marietta Material, 2004)#

ตารางที่ 2.8 ส่วนประกอบทางเคมีของหินดินดาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	Martin Marietta Material (2004)	เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา (2538)	อมรา คาวไธสง (2550)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	58-60	58.10	54.42
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	14-16	15.40	11.49
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	4-5	4.02	4.68
เฟอร์รัสออกไซด์ (FeO)	2-3	2.45	2.30
แมกนีเซียออกไซด์ (MgO)	2-3	2.44	2.00
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	3-4	3.11	10.97
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1-2	1.30	0.38
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	3-4	3.24	1.79

2.7.1 การใช้ประโยชน์ของหินดินดาน

หินดินดานสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ผสมทำปูนซีเมนต์ ใช้ในอุตสาหกรรมดินเผา และเซรามิก เป็นต้น นอกจากนี้หินดินดานยังเป็นแหล่งสะสมของปิโตรเลียม หรือถ่านหิน (Coal) ย่างไฟแล้วให้ น้ำมัน และเมื่อนำไปกลั่นจะได้น้ำมัน จึงเรียกหินดินดานว่าหินน้ำมัน (Oil shale) (กรมทรัพยากรธรณี, 2548) ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อมนั้น ได้มีการนำหินดินดานมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนักชนิดต่าง ๆ และสีข้อม จากการศึกษากของ Al-Qodah (2000) ได้นำเถ้าของหินน้ำมัน (Shale oil ash) มาใช้เป็นตัวดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ 3 ชนิด คือ สี Drim yellow-K4G, Drim blue-KBL และสี Drim red K4BL พบว่าอัตราการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟของเถ้าหินน้ำมันขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส ความเร็วในการเขย่า

และอุณหภูมิ โดยถ้าของหินน้ำมันสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีเมื่อระยะเวลาสัมผัส ความเร็วในการเขย่า และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อขนาดของสารดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Paikary, Banerjee, and Mukherji (2005) ได้นำหินดินดานมาใช้ในการกำจัดอาร์เซนิก พบว่า หินดินดานสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกอยู่ในช่วง 0.07-1.35 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาของ Drizo et al. (1999) ได้ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Buxite, Light Expanded Clay Aggregate (LECA), หินปูน ขี้เถ้าลอย หินดินดาน และซีโอไลต์ พบว่าหินดินดาน และ Buxite สามารถดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด 730 และ 350 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องมาจากผิวหน้าของหินดินดานมีออกไซด์ของอลูมิเนียม แคลเซียม และเหล็ก ที่มีความสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ นอกจากนี้ยังพบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้ และมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดิน และรากได้ดี และได้คาดการณ์อายุของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง พบว่าอายุของระบบจะสูงถึง 20 ปี (Drizo et al., 2000) นอกจากนี้จากการของ อมรา ดาวโรตอง (2550) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับของหินดินดาน และปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับพบว่า หินดินดานมีความสามารถในการดูดซับไนเตรทไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจน 0.143 และ 0.166 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ นอกจากนี้มีความสามารถในการดูดซับออร์โทฟอสเฟต 0.485 มิลลิกรัมต่อกรัม และทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของหินดินดานในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดกรวด และทราย พบว่าหินดินดานทุกขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และออร์โทฟอสเฟตได้ดีกว่าตัวกลางชนิดกรวด และทราย จากการศึกษาของ ปิติพร มโนลูน (2554) การศึกษาสมมูลมวลสารในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ชีวิตินของตัวกลางหินดินดาน พบว่าสัดส่วนการสะสมฟอสฟอรัสภายในชุดระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานมีการฟอสฟอรัสสะสมที่ตัวกลางร้อยละ 68.41-99.71 สะสมในพืชร้อยละ 4.58-20.27 และในรูปอื่น ๆ ร้อยละ 0.14-13.33 และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติของชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของตัวกลางหินดินดานมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 74.49-78.92 กำจัดฟอสฟอรัสมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 68.73-77.21 และกำจัดทีเคเอ็นมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 57.49-61.98 จะเห็นได้ว่าจากการศึกษาวิจัยพบว่า หินดินดานสามารถที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับสารอาหาร และพืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนหินดินดาน อีกทั้งมีองค์ประกอบทางเคมี เช่น อะลูมิเนียม ซิลิกอน และเหล็ก ซึ่งมีแนวโน้มที่จะสามารถดูดซับสีย้อมเอโซได้ สามารถนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และสามารถดูดซับสีย้อมได้

2.7.2 การดูดซับของหินดินดาน

ตัวกลางหินดินดาน มีลักษณะสมบัติทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าความพรุน ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติสำคัญในการเลือกใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เนื่องจากตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากก็มีความสามารถในการดูดซับมาก ส่วนตัวกลางที่มีความพรุนสูงจะมีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวกลางสำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เนื่องจากมีช่องว่างสำหรับให้อากาศ และเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกลางนั้น และมีผลต่อการไหลของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสีย้อม เป็นต้น จากการศึกษาของ อมรา ดาวไรสง (2550) พบว่า ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 52.95-69.06 โดยประสิทธิภาพการกำจัดเกิดจากตัวกลาง โดยการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนด้วยตัวกลางจะเป็นการดูดซับไอออนบวกของตัวกลาง และแอมโมเนียมไนโตรเจนยังสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่เกาะอยู่บริเวณผิวของตัวกลางได้ นอกจากนี้การศึกษาของ อมรา ดาวไรสง (2550) และ ปิติพร มโนคุณ (2554) พบว่าหินดินดานสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ โดยถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง กลไกการตรึง และการดูดซับผิว นอกจากนี้หินดินดานยังมีความสามารถในการดูดซับสีย้อม ซึ่งจากการศึกษาของสายรุ้ง นพขุนทด (2554) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานมีลักษณะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และประกอบกับผลการศึกษาผลของอุณหภูมิซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานเป็นการดูดซับแบบเคมี ซึ่งการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของหินดินดานกับ โมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟ การดูดซับสีย้อมของหินดินดานเป็นการดูดซับแบบประจุที่ตรงกันข้าม กล่าวคือ สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่มีประจุลบ ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟจะมีกลุ่มซัลโฟนิก ($-SO_3Na$) อย่างน้อย 1 กลุ่ม เมื่อสีย้อมรีแอคทีฟละลายน้ำจะแตกตัวให้โซเดียมไอออน (Na^+) และโมเลกุลของสีย้อมที่มีประจุลบ ($Dye-SO_3^-$) หินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นสารโลหะออกไซด์ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Fe_2O_3 เป็นต้น ซึ่งโลหะออกไซด์ที่ผิวหน้าของหินดินดานเมื่ออยู่ในสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ ที่ผิวหน้าของหินดินดานจะถูกเติมด้วยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ทำให้ผิวหน้าของหินดินดานแสดงประจุบวกซึ่งทำให้หินดินดานสามารถที่จะดูดซับโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟซึ่งมีประจุเป็นลบได้

2.8 ต้นอ้อ

ชื่อสามัญ : ต้นอ้อ

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Phragmites communis* (Cav.) Trin. Ex Steudel

ต้นอ้อเป็นพืชที่มีวงจรชีวิตมากกว่า 2 ปี และทนทานต่อน้ำท่วม เนื่องจากมีระบบรากมากมาย โดยปกติรากของต้นอ้อสามารถแพร่ขยายไปได้ลึก 0.6-1 เมตร สามารถดำรงชีวิตได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 10-33 องศาเซลเซียส ระดับความเค็มสูงสุดที่พืชทนได้ คือ 45 ส่วนในพันส่วน (ppt) และค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2-8 (Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988) ลักษณะของลำต้นมีความแข็งแรง และเป็นปล้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 นอกจากนี้สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้ด้วยเมล็ด เหง้า หรือลำต้น (Harris and Marshall, 1960; Galinato and van der Valk, 1986; Tucker, 1990; Marks, Lapin, and Randall, 1994)

2.8.1 การใช้ประโยชน์ของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

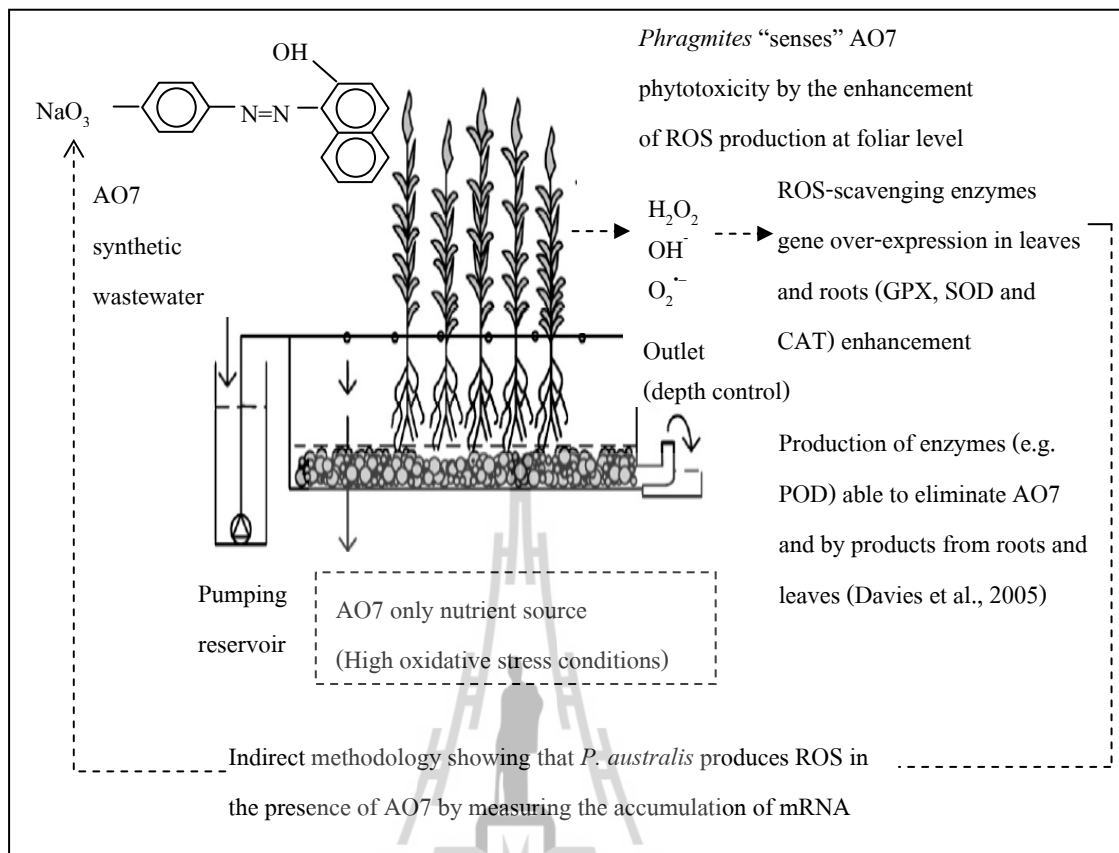
ต้นอ้อเป็นพืชที่นิยมใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดมลสารต่าง ๆ เช่น กำจัดคลอโรเบนซินที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน (Braeckevelt et al., 2008) กำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียชุมชน (Prochaska and Zouboulis, 2006) ประโยชน์หลักของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ การลำเลียงออกซิเจน โดยระบบรากพืชจะแทงเข้าไปในดินหรือชั้นกรอง ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ลึกกว่าการลำเลียงออกซิเจนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จากการศึกษาของ (Brix, 1997; Armstrong et al., 1999) พบว่าต้นอ้อสามารถดึงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศได้ประมาณ 0.02-12 กรัมออกซิเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชในระบบ และปริมาณออกซิเจนในดินหรือชั้นกรอง (Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988) จากการศึกษาของ Akhtar, Khan, and Husain (2005) นำต้นมะระขี้นกที่มีเอนไซม์ peroxidases (POD) พบว่าสามารถกำจัดสีย้อม Reactive Red และ Reactive Blue 4 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่แสดงให้เห็นว่าพืชที่มี peroxidases (POD) สามารถกำจัดสีย้อมในกลุ่มรีแอคทีฟ ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดหนึ่งในกลุ่มสีย้อมเอโซไซด์ (Bhunia, Durani, and Wangikar, 2001; Shaffiqu et al., 2002) จากงานวิจัยของ Davies et al. (2009) ได้ทำการศึกษากลไกของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัดสีย้อมเอโซไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเอโซไซด์ (Acid orange 7) เข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกต้นอ้อ ภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะเกิดกระบวนการทำลายสารพิษ (สีย้อม) จากกระบวนการดังกล่าวจะก่อให้เกิดสารอนุมูลอิสระเช่น superoxide ion (O_2^-), Hydrogen peroxide (H_2O_2), Hydroxyl radical (OH^\cdot) (Asada, 2006) เพิ่มขึ้นในระบบ ทำให้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เกิดสภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) คือ สภาวะที่เกิดความไม่สมดุลของปริมาณอนุมูลอิสระ และสารต้านอนุมูลอิสระ ต้นอ้อที่ปลูกในระบบมีเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระเช่น superoxide dismutase (SOD) catalase (CAT)

peroxidase (POD) และ glutathione peroxidase (GPX) (Mittler and Zilinskas, 2003; Halliwell and Whiteman, 2004) ที่จะสามารถทำลายอนุมูลอิสระได้ ซึ่งเอนไซม์อยู่ในใบ และรากของต้นอ้อ ด้วยเหตุที่ต้นอ้อมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมได้ นอกจากนี้เอนไซม์ peroxidase (POD) ที่มีอยู่ในต้นอ้อนั้น ยังมีความสำคัญในการกำจัดสีย้อมเนื่องจากเอนไซม์ peroxidase มีความสามารถในการกำจัดสารอะโรมาติกเอมีน ฟีนอล และซัลโฟเนส (Azevedo et al., 2003; Veitch, 2004) ซึ่งสารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของสีย้อม จึงทำให้เอนไซม์ peroxidase สามารถกำจัดสีย้อมได้ (Davies et al., 2005) ซึ่งจากผลการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าต้นอ้อมีเอนไซม์ peroxidase (POD) ซึ่งมีคุณสมบัติในการกำจัดสีไอโซได้ ดังนั้นต้นอ้อจึงมีคุณสมบัติในการช่วยกำจัดสีย้อมได้

ส่วนคลอโรฟิลล์ในใบพืชนั้น สามารถใช้ประเมินสภาวะความผิดปกติของพืช เช่น หากพืชเกิดสภาวะใบเหลือง ซีด จะทำให้พืชสังเคราะห์แสงได้ลดลง หรือไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้เพราะไม่มีคลอโรฟิลล์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางอ้อมกับเอนไซม์ peroxidase ในใบของพืช โดยหากพืชไม่มีคลอโรฟิลล์ พืชจะสังเคราะห์แสงไม่ได้ ส่งผลให้เอนไซม์ peroxidase ลดลง ทำให้ต้นอ้อไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้



รูปที่ 2.17 ลักษณะรากและลำต้นของต้นอ้อ (Vymazal and Kröpfelová, 2007)



รูปที่ 2.18 กลไกของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัด
สีย้อมเอโซเอซิด (Davies et al., 2009)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีย้อม และสารอินทรีย์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Davies et al. (2005) ใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง
ในแนวตั้ง เพื่อบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม มีความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 129.0-700.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ
ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของน้ำเข้ามีค่า 224.0-863.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากผ่านการบำบัด
โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้ว พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี และสารอินทรีย์
ร้อยละ 69.0-74.0 และร้อยละ 52.0-64.0 ตามลำดับ

Ojstrsek, Fakin, and Vrhovsek (2007) นำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง
ใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม สามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 70.0 และซีโอดีร้อยละ 88.0
ซึ่งกลไกสำคัญในการกำจัดสี และสารอินทรีย์เกิดจากกระบวนการใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน

ของจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นอกจากนี้พืชที่ปลูกในระบบก็มีส่วนช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์

Bulc and Ojstrsek (2008) ได้ศึกษาการบำบัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ Reactive red 22 Vat red 13 และ Reactive black 5 ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ตัวกลางที่ใช้ ได้แก่ Zeolitic tuf (ขนาด 9.0-12.0 มิลลิเมตร) ทราช (ขนาด 0.0-4.0 มิลลิเมตร) กรวด (ขนาด 8.0-12.0 มิลลิเมตร) จากการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง สามารถลดสีได้ร้อยละ 70.0 ของน้ำเสียจากสีย้อมทั้ง 3 ชนิด และสามารถลดค่าที่ไอซี (TOC) และซีไอดีได้ร้อยละ 88.0 การกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ขึ้นอยู่กับ ชนิดของตัวกลาง ระยะเวลาในการบำบัด และองค์ประกอบทางเคมีของสีย้อม

Ong et al. (2009) ได้ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสีย้อมแอซิดเอโอ (Acid Orange 7) ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (แบบไหลขึ้น) (Up-flow constructed wetlands, UFCW) โดยติดตั้งเครื่องเติมอากาศเพื่อทำให้เกิดสภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจนในถังเดียวกัน และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างระบบที่ติดตั้งเครื่องเติมอากาศ และไม่ติดตั้งเครื่องเติมอากาศ พบว่า ในชุดทดลอง UFCW ที่ติดตั้งเครื่องเติมอากาศมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 98.0 กำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีได้ร้อยละ 86.0 กำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน และกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 95.0 และร้อยละ 29.0 ตามลำดับ ส่วนระบบที่ไม่ติดตั้งเครื่องเติมอากาศมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 96.0 กำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีได้ร้อยละ 78.0 กำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนร้อยละ 41.0 และกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 30.0 แสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และแอมโมเนียไนโตรเจนได้

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจนในการกำจัดสีย้อม และสารอินทรีย์จากน้ำเสียฟอกย้อม

O'Neil et al. (2000) ใช้ระบบผสมผสานระหว่างการไม่ใช้ออกซิเจน และใช้ออกซิเจน (Anaerobic-aerobic) สีย้อมเอโอแอซิด (Procion red H-E7B) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นมีค่าซีไอดี 3,343 มิลลิกรัมต่อลิตร บีไอดี 1,517 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสี 2.88 หน่วยสี พบว่ากระบวนการหลักในการกำจัดสี คือ ช่วงที่อยู่ในสภาวะไม่มีออกซิเจน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีร้อยละ 63.9 ในทางตรงกันข้ามสภาวะที่มีออกซิเจนสามารถบำบัดสีย้อมได้เพียงร้อยละ 11.1

Fu et al. (2001) พบว่าการผสมผสานการบำบัดระหว่างระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนกับระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนนั้น ส่งผลให้สามารถกำจัดสีย้อมและสามารถลดสารอินทรีย์ได้

Manu and Chaudhari (2002) ศึกษาการกำจัดสีย้อมแอซิด (Acid orange 7) และสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive black 8) ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 24.0-28.0 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมทั้งสองชนิดมากกว่าร้อยละ 90.0 และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์อยู่ในช่วงร้อยละ 92.0-95.0

Sponza and Isik (2002) ใช้ระบบยูเอสบี และต่อด้วยระบบซีเอสทีอาร์ ในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ เมื่อน้ำเสียผ่านระบบยูเอสบี ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15.7 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีร้อยละ 59.0 และกำจัดสีได้ร้อยละ 85.0 เนื่องจากระยะเวลาเก็บกักสั้น ทำให้ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้หมด จึงนำน้ำเสียส่งต่อไปบำบัดด้วยระบบซีเอสทีอาร์ พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 5.7 วัน สามารถกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นร้อยละ 42.0

ฉันทพันธ์ ศุภกา กาญจนานันท์ จันทองจัน และสมศักดิ์ คำรงค์เลิศ (2545) ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ โดยจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน และใช้ออกซิเจน พบว่าสีย้อมส่วนใหญ่จะถูกกำจัดในระหว่างกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนจะทำหน้าที่ในการทำลายพันธะของสี จึงสามารถกำจัดหรือลดสีลงได้ ส่วนค่าซีโอดีจะลดลงในระหว่างการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนโดยการย่อยสลายของจุลินทรีย์

Madigan, Martinko, and Parker (2003) พบว่าการบำบัดสีย้อมแบบใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนจะมีเอนไซม์ mono และ di-oxygenase catalyse ซึ่งสามารถรวมกับออกซิเจน และทำให้เกิดการแตกพันธะอะโรมาติก ทำให้สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และนอกจากนี้ยังสามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้หินดินดานในการบำบัดสีย้อมเอโซ

เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; อมรา คาวไชยสง, 2550; Martin Marietta Material, 2004 พบว่าหินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54.0-60.0 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11.0-16.0 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 4.0-5.0 ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่คาดว่าจะบำบัดสีได้

Drizo et al. (1999;2000) ได้ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Buxite Light Expanded Clay Aggregate (LECA) หินปูน ขี้เถ้าลอย หินดินดานและซีโอไลต์ พบว่าหินดินดานและ Buxite สามารถดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด 730.0 และ 350.0 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องจากผิวหน้าของหินดินดานมีออกไซด์ของอะลูมิเนียม แคลเซียม และเหล็ก ที่มีความสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ นอกจากนี้ยังพบว่าพืชสามารถ

เจริญเติบโตบนหินดินดานได้และมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดินและรากได้ดีและได้คาดการณ์อายุของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง พบว่าอายุของระบบจะสูงถึง 20 ปี

Al-Qodah (2000) ได้นำเถ้าของหินน้ำมัน (Shale oil ash) มาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ สี Drim yellow-K4G Drim blue-KBL และสี Drim red K4BL พบว่าอัตราการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของเถ้าหินน้ำมันขึ้นอยู่กับระยะเวลาสัมผัส ความเร็วในการเขย่าในช่วง 250-600 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 20-45 องศาเซลเซียส โดยเถ้าของหินน้ำมันสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีเมื่อระยะเวลาสัมผัส ความเร็วในการเขย่า และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อขนาดของสารดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วงตั้งแต่ 100-300 ไมโครเมตร

เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อม โดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Reactive Red 2 (RR2) Reactive Red 120 (RR120) และ Reactive Red 141 (RR141) พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.0-10.0 การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ของซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมีประสิทธิภาพดี โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 82.0 89.0 และ 98.0 สำหรับสี RR2 RR120 และ RR141 ตามลำดับ

สายรุ้ง นพขุนทด (2554) ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยกระบวนการดูดซับโดยใช้หินดินดานในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Remazol Deep Red RGB (Red) Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) และ Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีไอดี และสีของคอลัมน์หินดินดานมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.0 และ 90.0 ตามลำดับ และคอลัมน์หินดินดานเหมาะสำหรับการนำไปใช้กับน้ำทิ้งหลังจากระบบบำบัดทางชีวภาพ เพราะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีไอดีสูง และอายุการใช้งานนาน

2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ต้นอ้อในการบำบัดสีย้อมเอโซของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Davies et al. (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลางในแนวตั้ง โดยใช้ตัวกลาง Sandy-cal Soil และทำการปลูกต้นอ้อ ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของน้ำเข้ามีค่า 224.0-863.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ซีไอดี และทีไอซี ร้อยละ 74.0 64.0 และ 71.0 ตามลำดับ

Davies et al. (2009) ทำการศึกษากลไกของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัดสีย้อมเอโซเอซิด (Acid orange 7) พบว่า ต้นอ้อมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมได้ และต้นอ้อมีเอนไซม์ peroxidase (POD) ที่มีความสำคัญ

ในการกำจัดสีซีอม จึงสามารถกำจัดสีซีอมได้อีกด้วย โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีซีอม ซีโอดี และทีโอซีร้อยละ 68.0 69.0 และ 67.0 ตามลำดับ

Ong et al. (2009) ได้ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสีซีอมแอซิดโอโซ (Acid Orange 7) ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Up-flow constructed wetlands) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดระหว่างต้นอ้อ (*Phragmites communis*) และหน่อไม้่น้ำ (Manchurian wild rice) พบว่า ในชุดทดลอง UFCW ที่ปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีซีอมร้อยละ 96.0 และกำจัดซีโอดี ได้ร้อยละ 82.0 ส่วนระบบที่ปลูกหน่อไม้่น้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีซีอมร้อยละ 96.0 และกำจัดซีโอดี ได้ร้อยละ 79.0 แต่พืชหน่อไม้่น้ำเกิดสภาวะชืด

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	อ้างอิง	สรุปผลงานวิจัย
1.กำจัดสีซีอมและสารอินทรีย์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	Ong et al. (2009) Bulc and Ojstršek (2008) Ojstršek, Fakin, and Vrhovsek (2007)	<ul style="list-style-type: none"> - การเติมอากาศสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและแอมโมเนียไนโตรเจน - ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางสามารถกำจัดสีซีอมได้ดี - การกำจัดสีซีอมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ขึ้นอยู่กับชนิดของดักกลาง ระยะเวลาในการบำบัด และองค์ประกอบทางเคมีของสีซีอม - กลไกการกำจัดสีซีอมและสารอินทรีย์เกิดจากกระบวนการใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ - พืชที่ปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีส่วนช่วยในการกำจัดสารอินทรีย์
2.การใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในการกำจัดสีซีอมและสารอินทรีย์จากน้ำเสียฟอกซีอม	Madigan, Martinko, and Parker (2003) Fu et al. (2001)	<ul style="list-style-type: none"> - จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนมีเอนไซม์ mono และ di-oxygenase catalyse สามารถรวมกับออกซิเจนและทำให้เกิดการแตกพันธะอะโรมาติก (ring fission) ทำให้สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง - การผสมผสานการบำบัดระหว่างระบบบำบัดแบบใช้กับไม่ใช้ออกซิเจน ส่งผลให้สามารถกำจัดสีซีอมและสามารถลดสารอินทรีย์ได้

ตารางที่ 2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	อ้างอิง	สรุปผลงานวิจัย
3.การใช้หินดินดานในการบำบัดสีย้อมเอโซ	เสรีวัฒน์ สมินทร์ ปัญญา, 2538; อมรา ดาว ไชสง, 2550; Martin Marietta Material, 2004 Drizo et al. (1999;2000)	- หินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่คาดว่าจะบำบัดสีได้ - พืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้และมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดินและได้คาดการณ์อายุของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง พบว่าอายุของระบบจะสูงถึง 20 ปี
4.การใช้ต้นอ้อในการบำบัดสีย้อมเอโซของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	Davies et al. (2009)	- ต้นอ้อมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมได้ - ต้นอ้อมีเอนไซม์ peroxidase (POD) ที่มีความสำคัญในการกำจัดสีย้อม

2.10 สรุป

อุตสาหกรรมสิ่งทอก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ สารเคมี และสีย้อมมากมายหลายชนิด ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยจำนวนมาก เพื่อทำการศึกษาหาวิธีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพ ง่ายต่อการดูแล มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นทางเลือกหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำ ง่ายต่อการใช้งาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถสร้างสภาวะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ให้มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแต่ละประเภทได้ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจากโรงงานฟอกย้อม โดยใช้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน มีข้อดี คือ สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้ แต่ข้อเสีย คือ กำจัดสีเอโซ และสารอาหารได้ค่อนข้างต่ำ ส่วนกระบวนการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน มีข้อดี คือ สามารถทำลายพันธะเอโซ ทำให้ความเข้มข้นของสีลดลง แต่มีข้อเสีย คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีในน้ำเสียต่ำ นอกจากนี้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลาย มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดต่ำลง จากข้อดี และข้อเสียของการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม ทำให้มีความพยายามในการรวมการย่อย

สลายทั้ง 2 แบบ เข้าอยู่ในระบบเดียวกัน เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งสี และ สารอินทรีย์ได้ในเวลาเดียวกัน พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มี 2 แบบ ได้แก่ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ ไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางมีลักษณะเด่นในเรื่องของการรับออกซิเจนโดยตรงจากรบรยากาศ นอกจากนี้พืชยังทำหน้าที่ในการขนส่งออกซิเจนสู่ส่วนที่ลึกของตัวกลาง กระบวนการส่วนใหญ่ ยังคงเป็นแบบใช้ออกซิเจน ส่วนระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง บริเวณใต้ชั้น ตัวกลางจะอึดตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะทำให้มีโอกาสในการเกิดสภาวะไม่มีออกซิเจน นอกจากนี้พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยังส่วนรากทำให้จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนสามารถ เจริญเติบโตได้ จะเห็นได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ สามารถเกิดกระบวนการบำบัดทั้งแบบ ใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน จึงมีความสนใจที่จะนำมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียฟอกย้อม โดยทั่วไปแล้วระบบบำบัดน้ำเสียที่โรงงานฟอกย้อมนิยมใช้กันในปัจจุบันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ระบบเอเอส แต่เนื่องจากลักษณะสมบัติน้ำเสียฟอกย้อมพบว่ามีปัญหาน้ำทิ้งหลังผ่านระบบเอเอส ยังคงมีความเข้มข้นของสีย้อม และสารอินทรีย์หลงเหลือ ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านออกจากระบบไม่ได้ มาตรฐาน และก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่าง ๆ ต่อแหล่งรับน้ำสาธารณะ ในการศึกษาครั้งนี้ จึงนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มาบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบบำบัดแบบเอเอส โดยจะนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบมาใช้ร่วมกัน เพื่อสามารถกำจัดสารอินทรีย์ และ สีย้อมเอโซจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม ที่ผ่านระบบบำบัดเอเอสโดยตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์จะใช้หินดินดานเป็นตัวกลางเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน มีองค์ประกอบ ของซิลิกอน และอลูมิเนียมซึ่งสามารถดูดซับสีย้อม นอกจากนี้พืชยังสามารถเจริญเติบโต บนหินดินดานได้ ในส่วนของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ ต้นอ้อ ด้วยเหตุที่ต้นอ้อ มีสารต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมและนอกจากนี้ต้นอ้อ มีเอนไซม์ peroxidase (POD) ที่สามารถย่อยสลายสารประกอบในสีย้อมเอโซได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) โดยนำระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลาง มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อม เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์และสีย้อมเอโซที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดในการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษวิจัย

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ตั้งอยู่ภายในบริเวณระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ และพืชที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวกลางที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ. 2553 ถึง มีนาคม พ.ศ. 2554

3.3 ขั้นตอนการศึกษวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวกลาง

นำตัวอย่างดินดินตามาจำแนกขนาด โดยวิธี Sieve analysis (ASTM, 2004) ขนาดตัวกลางที่เลือกใช้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 อ้างอิงตามขนาดตัวกลางสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยทั่วไป (U.S. EPA, 2000) หลังจากนั้นล้างเศษฝุ่น และดินออกจากดินดิน และนำดินดินไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน พื้นที่ผิวจำเพาะ และความพรุน และวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี คือ องค์ประกอบทางเคมีของดินดิน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของดินดิน ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดานที่ใช้เป็นตัวกลางสำหรับชุดการทดลอง

รายละเอียดภายในบ่อ	ขนาดหินดินดาน (mm)	สัมประสิทธิ์การซึม ผ่าน (m/day)	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m ² /g)	ความพรุน
Inlet and outlet zone	4.00-8.00	929.464	3.411	0.37
Treatment zone	0.25-2.00	153.181	5.098	0.34

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน

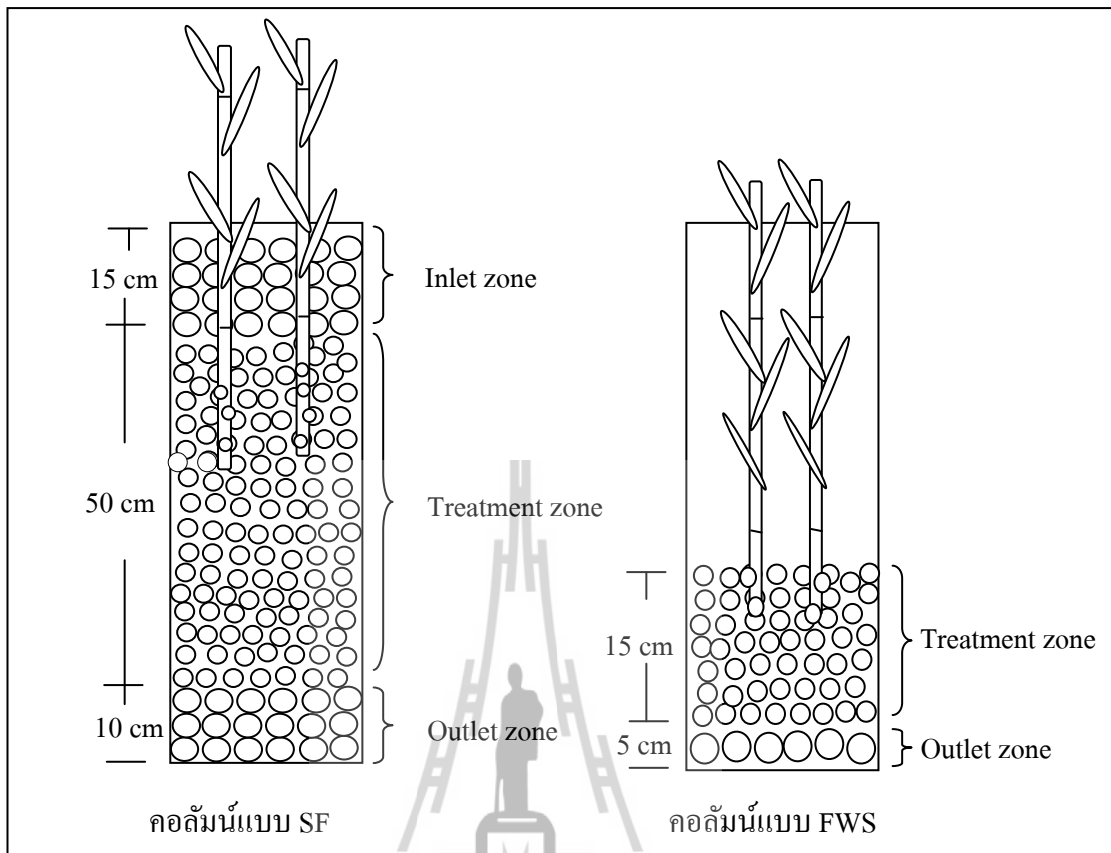
ส่วนประกอบ	ร้อยละ	ส่วนประกอบ	ร้อยละ
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	59.85	โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	5.23
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	10.21	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	1.88
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	16.27	แมงกานีสไดรอกไซด์ (Mn ₂ O ₃)	0.18
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	6.30	ซีโรเนียมไดออกไซด์ (ZrO ₂)	0.07

จากผลการศึกษาของเสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา (2538); อมรา ดาวโรสง (2550); Martin Marietta Material (2004) และ Drizo et al. (1999;2000) พบว่าหินดินดานที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ มีความสามารถดูดซับฟอสฟอรัส และดีได้ดี

การบรรจุหินดินดานลงในคอลัมน์แบบ SF (ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง) และคอลัมน์แบบ FWS (ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การบรรจุหินดินดานลงในคอลัมน์แบบ SF นั้น ในบริเวณน้ำเข้า และน้ำออกของคอลัมน์ (Inlet-outlet zone) ทำการบรรจุหินดินดานขนาด 4.00-8.00 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถกระจายน้ำเข้า และออกได้ดี โดยบริเวณน้ำเข้าบรรจุชั้นหินดินดานสูง 15 เซนติเมตร และบริเวณน้ำออกบรรจุชั้นหินดินดานสูง 10 เซนติเมตร มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.37 ส่วนบริเวณที่มีการบำบัด (Treatment zone) นั้น บรรจุหินดินดานขนาด 0.25-2.00 มิลลิเมตร ที่มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.34 มีระดับความสูง 50 เซนติเมตร ดังนั้นค่าความพรุนทั้งหมดของคอลัมน์แบบ SF จะมีค่าเท่ากับ 0.35

การบรรจุหินดินดานลงในคอลัมน์แบบ FWS ในบริเวณที่มีการบำบัดนั้น ทำการบรรจุหินดินดานขนาด 0.25-2.00 มิลลิเมตร มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.34 มีระดับความสูงเท่ากับ 15 เซนติเมตร ส่วนบริเวณน้ำออกจากคอลัมน์บรรจุหินดินดานขนาด 4.00-8.00 มิลลิเมตรที่มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.37 มีระดับความสูง 5 เซนติเมตร ดังนั้นค่าความพรุนทั้งหมดของคอลัมน์แบบ FWS จะมีค่าเท่ากับ 0.35



รูปที่ 3.1 การบรรจุหินดินดานลงในคอลัมน์แบบ SF และคอลัมน์แบบ FWS

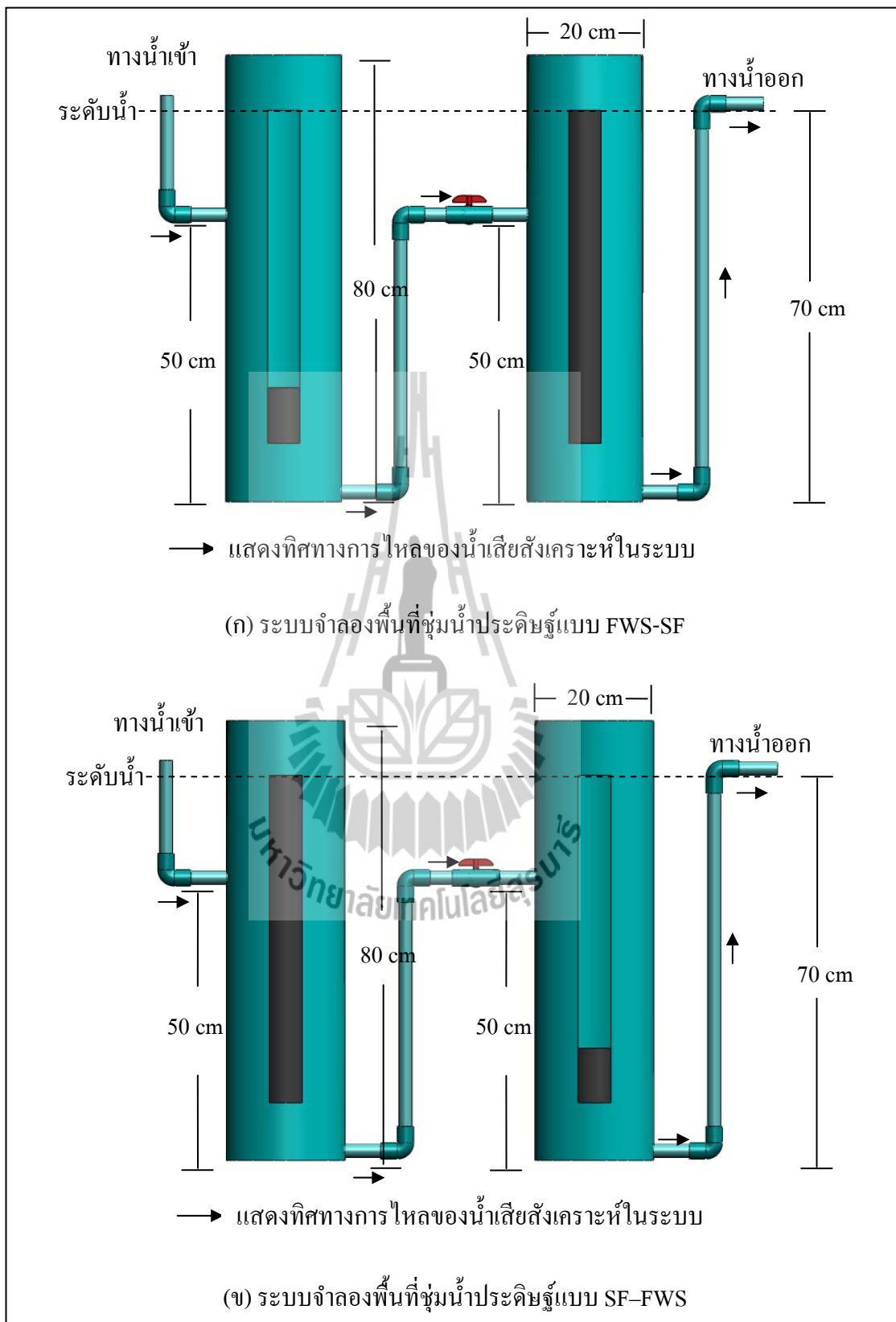
3.3.2 การออกแบบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีลักษณะเป็นคอลัมน์ ทำจากวัสดุ PVC โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ความสูง 80 เซนติเมตร โดยทำการเจาะช่อง และติดกระจกบริเวณด้านหน้าของคอลัมน์ เพื่อให้สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ภายในระบบ จากการศึกษาของสายรุ้ง นพขุนทด (2554) พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม (สีแดง) ของหินดินดานขนาด 2.00-0.25 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ในช่วง 0.0110-0.0252 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้หินดินดานมีน้ำหนักเท่ากับ 33.9 กิโลกรัม คาดว่าจะสามารถดูดซับสีย้อมได้ปริมาณเท่ากับ 374.25-1,092.55 มิลลิกรัม โดยน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมมีความเข้มข้นของสีย้อม 70.54-292.66 มิลลิกรัม จะเห็นได้ว่าปริมาณของหินดินดานเพียงพอต่อการดูดซับสีย้อม

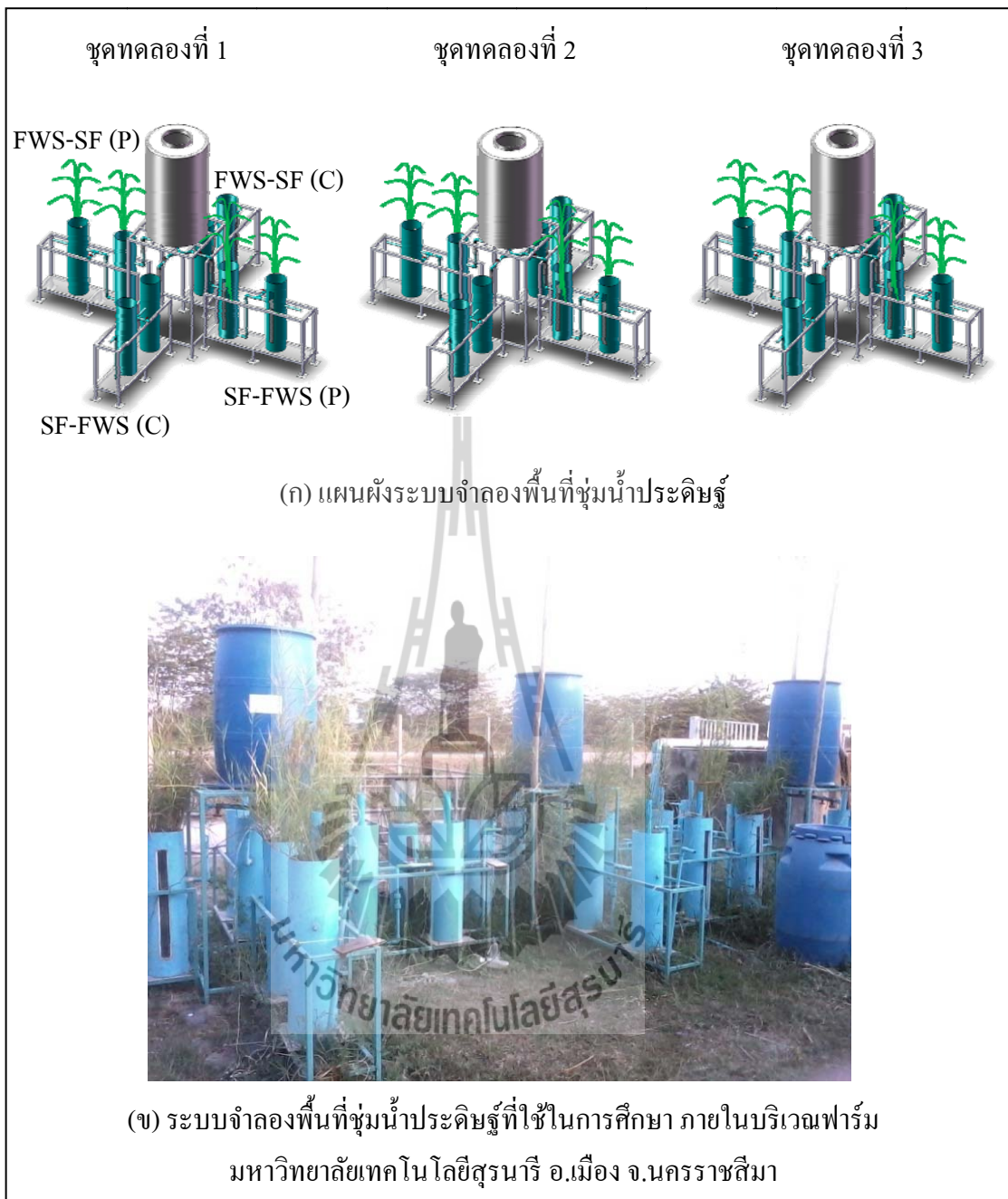
โดยระบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มี 2 ระบบ ได้แก่ ระบบแบบ FWS-SF ประกอบด้วยคอลัมน์แบบ FWS ตามด้วยคอลัมน์แบบ SF ดังแสดงในรูป 3.2 (ก) และระบบแบบ SF-FWS ประกอบด้วยคอลัมน์แบบ SF ตามด้วยคอลัมน์แบบ FWS ดังแสดงในรูป 3.2 (ข)

ในการศึกษาครั้งนี้มีระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมด 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) และ 3.3 (ข) โดยแต่ละชุดการทดลองจะมีถังรวบรวมน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าระบบ โดยแต่ละชุดการทดลองจะประกอบไปด้วย ระบบแบบ FWS-SF อย่างละ 2 เซ็ต สำหรับเป็นระบบควบคุม 1 เซ็ต ที่ไม่ปลูกต้นอ้อภายในคอลัมน์ (FWS-SF (C)) และอีก 1 เซ็ต สำหรับเป็นระบบทดลอง โดยทำการปลูกต้นอ้อภายในคอลัมน์ (FWS-SF (P)) และระบบแบบ SF-FWS อย่างละ 2 เซ็ต สำหรับเป็นระบบทดลอง (SF-FWS (P)) และระบบควบคุม (SF-FWS (C)) เช่นเดียวกัน

โดยในการเดินระบบแบบ FWS-SF นั้น น้ำเสียจะไหลจากถังรวบรวมน้ำเสียเข้าสู่คอลัมน์แบบ FWS ที่จุดระดับความสูง 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) หลังจากนั้นน้ำจะไหลออกจากคอลัมน์แบบ FWS ทางส่วนล่างของคอลัมน์ แล้วไหลขึ้นไปตามท่อเพื่อเข้าสู่คอลัมน์แบบ SF ที่ระดับความสูง 50 เซนติเมตร ของคอลัมน์ และน้ำจะไหลออกจากคอลัมน์แบบ SF ทางส่วนล่างของคอลัมน์ หลังจากนั้นน้ำจะไหลขึ้นไปตามท่อทางน้ำออกที่ได้ทำการต่อสูงขึ้นไปที่ระดับ 70 เซนติเมตรของคอลัมน์ เพื่อรักษาระดับน้ำของทั้ง 2 คอลัมน์ อยู่ที่ระดับความสูง 70 เซนติเมตรเท่ากัน การเดินระบบแบบ SF-FWS ก็ทำเช่นเดียวกันกับระบบแบบ FWS-SF ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข)



รูปที่ 3.2 ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)



รูปที่ 3.3 ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ก) แผนผังจำลอง (ข) ระบบที่สร้างขึ้นจริง

จากเกณฑ์การออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของ U.S. EPA (2000) กำหนดอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 45-60 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาเก็บกักอยู่ในช่วง 2-3 วัน สามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลเข้าคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ได้โดยใช้สมการ

ที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ค่าการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.3

คอลัมน์แบบ FWS

$$Q = \frac{LW[d_n n + d_w]}{t_1} \quad (3.1)$$

คอลัมน์แบบ SF

$$Q = \frac{LW[nd_w]}{t_2} \quad (3.2)$$

ระยะเวลาเก็บกักน้ำของระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS

$$T_{รวม} = t_1 + t_2 \quad (3.3)$$

เมื่อ	Q	=	อัตราการไหล (ลบ.ม. ต่อวัน)
	L	=	ความยาวของระบบ (เมตร)
	W	=	ความกว้างของระบบ (เมตร)
	d_n	=	ความสูงของชั้นตัวกลาง (เมตร)
	d_w	=	ระดับความลึกของน้ำ (เมตร)
	n	=	ค่าความพรุนของตัวกลาง
	t_1	=	ระยะเวลาเก็บกักน้ำของคอลัมน์แบบ FWS (วัน)
	t_2	=	ระยะเวลาเก็บกักน้ำของคอลัมน์แบบ SF (วัน)
	$T_{รวม}$	=	ระยะเวลาเก็บกักน้ำรวมของระบบ (วัน)

ตารางที่ 3.3 ค่าการออกแบบระบบแบบ FWS และแบบ SF ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

รายละเอียด	ระบบแบบ FWS	ระบบแบบ SF
ระดับความสูงของน้ำ (เมตร)	0.50	0.70
ระดับความสูงของตัวกลาง (เมตร)	0.20	0.75
ความพรุนของตัวกลาง	0.35	0.35
อัตราการไหลของระบบแบบ FWS-SF (ลิตรต่อวัน)	6.39	
อัตราการไหลของระบบแบบ SF-FWS (ลิตรต่อวัน)	6.39	
ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)	2.80	1.20

3.3.3 ขั้นตอนการเดินระบบ

3.3.3.1 เตรียมพีช

ต้นอ้อที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ นำมาจาก ตำบลคอนยาง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี นำมาเพาะเลี้ยงภายในบริเวณสถานที่ทำการศึกษาวิจัย เพื่อให้ต้นอ้อปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมเป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน ก่อนที่จะนำมาใช้ในการศึกษา หลังจากนั้นจึงทำการคัดเลือกต้นอ้อที่มีขนาดใกล้เคียงกัน มีเส้นรอบวงประมาณ 1.6 เซนติเมตร และมีความสูงประมาณ 60 เซนติเมตร นำมาปลูกในคอถ่มนี้จำนวน 2 ต้นต่อหนึ่งคอถ่มนี้

3.3.3.2 การเริ่มเดินระบบ

เริ่มต้นเดินระบบด้วยน้ำประปา โดยมีการเติมน้ำเล็กน้อยเพื่อให้พีชฟื้นตัวประมาณ 2 สัปดาห์ ก่อนที่จะทำการศึกษาสารติดตาม หลังจากนั้นจึงทำการเดินระบบต่อด้วยน้ำประปาอีกประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อเตรียมระบบก่อนการเดินระบบด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อม โดยมีระยะเวลาในการเดินระบบด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็นระยะเวลาทั้งหมด 212 วัน

3.3.3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัว และการเคลื่อนที่ของสารภายในระบบโดยใช้วิธีการศึกษาสารติดตาม (Tracer study)

การศึกษาสารติดตามเพื่อประเมินรูปแบบการไหลในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ สามารถอธิบายลักษณะการไหลว่าเป็นไปตามอุดมคติ หรือไม่ไปตามอุดมคติ กล่าวคือ การเคลื่อนที่ของสารในระบบแบบตามอุดมคติ แบ่งออกเป็นระบบที่มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ (Completely mixed flow) มีการปั่นป่วนภายในระบบ และลักษณะการไหลแบบตามกัน (Plug flow) คือ มีลักษณะคล้ายการไหลในเส้นท่อ มีการปั่นกวนน้อย หรือแทบไม่มีการปั่นกวน การประเมินสามารถทำได้โดยการนำค่าของความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการศึกษามาพลอตกับเวลา (นาที่ หรือ ชั่วโมง) และนำไปคำนวณจากสมการของ Levenspiel (1972) ดังแสดงในสมการที่ 3.4-3.7 เพื่อหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำจริงของระบบจำลองสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.3

หลังจากนั้นจึงนำค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ได้มาแทนค่าในสมการที่ 3.5 และ 3.6 เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากระจายการไหลได้ดังสมการที่ 3.7 โดยค่ากระจายการไหลที่คำนวณได้นั้นนำไปเทียบกับตารางที่ 3.4 เพื่อดูลักษณะการกระจายของการไหลของระบบ

ระยะเวลาเก็บกักน้ำเฉลี่ย

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} \quad (3.4)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t}{\sum C_i \Delta t} - T_{\text{mean}}^2 \quad (3.5)$$

ดังนั้น

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = 2d + 8d^2 \quad (3.6)$$

ค่ากระจายการไหล

$$d = \frac{D}{uL_1} \quad (3.7)$$

โดยที่	t_i	=	ระยะเวลาใดๆ ที่สารละลายออกจากระบบ
	C_i	=	ความเข้มข้นของคลอไรด์ ที่ออกจากระบบที่เวลาใด ๆ
	Δt	=	ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ
	D	=	สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวแกน
	u	=	อัตราเร็วการไหล
	L_1	=	ระยะทางของการไหลจากทางเข้าถึงทางออก

ตารางที่ 3.4 ค่าการกระจายของการไหล

ค่าการกระจายการไหล (d)	ลักษณะการไหล
0	การไหลแบบท่อ
0.002	การกระจัดกระจายมีน้อย
0.025	การกระจัดกระจายปานกลาง
0.2	การกระจัดกระจายมีมาก
∞	การไหลแบบกวนสมบูรณ์

หมายเหตุ : Levenspiel (1972)

3.3.3.4 การเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อม

ในการศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไปใช้บำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส จากการทบทวนลักษณะคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบบำบัดเอเอส ดังแสดงในตารางที่ 3.5 สรุปลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอสเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

องค์ประกอบของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส ดังแสดงในตารางที่ 3.6 โดยมีวิธีการเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมปริมาตร 1 ลิตร ทำได้โดยชั่งสาร C_6H_5COONa จำนวน 53.55 มิลลิกรัม สาร CH_3COONa จำนวน 204.9 มิลลิกรัม สาร NH_4NO_3 จำนวน 176.1 มิลลิกรัม สาร $NaCl$ จำนวน 7 มิลลิกรัม สาร $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ จำนวน 3.4 มิลลิกรัม สาร $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ จำนวน 4 มิลลิกรัม และสาร $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ จำนวน 36.7 มิลลิกรัม นำสารทั้งหมดมาละลายในน้ำ หลังจากนั้นเทฟอสฟอรัสที่ชั่งมาจำนวน 11.5 มิลลิกรัม ลงไปในสารละลายข้างต้น ผสมให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ซึ่งน้ำทิ้งที่สังเคราะห์นี้จะมีค่าความเข้มข้นสี 250 Pt Co

ฟอสฟอรัสที่ใช้ในงานวิจัย ได้รับความอนุเคราะห์ฟอสฟอรัสจากบริษัท ไคสตาร์ไทย จำกัด ที่อยู่ 193 ชั้น 17 อาคารเลอรัชดา ถนนรัชดาภิเษก แขวงคลองเตย เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร 10110 เป็นบริษัทตัวแทนในการส่งฟอสฟอรัสให้กับโรงงานฟอกย้อมต่าง ๆ ในประเทศไทย

ตารางที่ 3.5 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบบำบัดเอเอส

พารามิเตอร์	Nasiman, 1996	Amar et al., 2009	Gozalvez-Zafrilla et al., 2008	Bes-Pía et al., 2009	สรุปช่วงค่าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้
pH	7.8	7.6-8.1	7.8	7.5-8.0	7.5-8.1
BOD (mg/l)	48	13.8-40	45	-	13.8-48
COD (mg/l)	488	106-175	150	200-250	106-488
Color(Pt Co)	-	127-229	-	-	127-229

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

องค์ประกอบ	น้ำหนักของสาร (มิลลิกรัม)
C_6H_5COONa	53.55
CH_3COONa	204.90
NH_4NO_3	176.10
NaCl	7.00
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	3.40
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	4.00
$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	36.70
สีย้อมเอโซ	11.50

3.3.3.5 การเดินระบบด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อม

ระยะเวลาการเดินระบบทั้งหมดเป็นระยะเวลาเท่ากับ 212 วัน นำน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมที่มีอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) (เท่ากับ 0.25 ของความเข้มข้นซีโอดี และสีย้อมของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม) ด้วยอัตราการไหล 6.39 ลิตรต่อวัน เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในชุดทดลองที่ 1 2 และ 3 เป็นระยะเวลาประมาณ 40 วัน รายละเอียดความเข้มข้น และอัตราการระสารต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 หลังจากนั้นเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 203.50-252.34 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) (เท่ากับ 0.50 ของความเข้มข้นซีโอดีและสีย้อมของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม) เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในชุดทดลองที่ 2 และ 3 เป็นระยะเวลาประมาณ 72 วัน ส่วนระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในชุดทดลองที่ 1 นั้นยังคงนำน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่อัตราการบรรทุก

สารอินทรีย์เท่ากับ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) เข้าสู่ระบบต่อไปจนจบการศึกษาวิจัย 212 วัน

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 72 วันแล้ว จึงเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเป็น 386.82-477.38 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) (เท่ากับ 1.00 ของความเข้มข้นซีโอดี และสีของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม) เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในชุดทดลองที่ 3 เป็นระยะเวลาประมาณ 100 วัน ส่วนระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในชุดทดลองที่ 2 นั้นยังคงนำน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ต่อไปจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษา 212 วัน

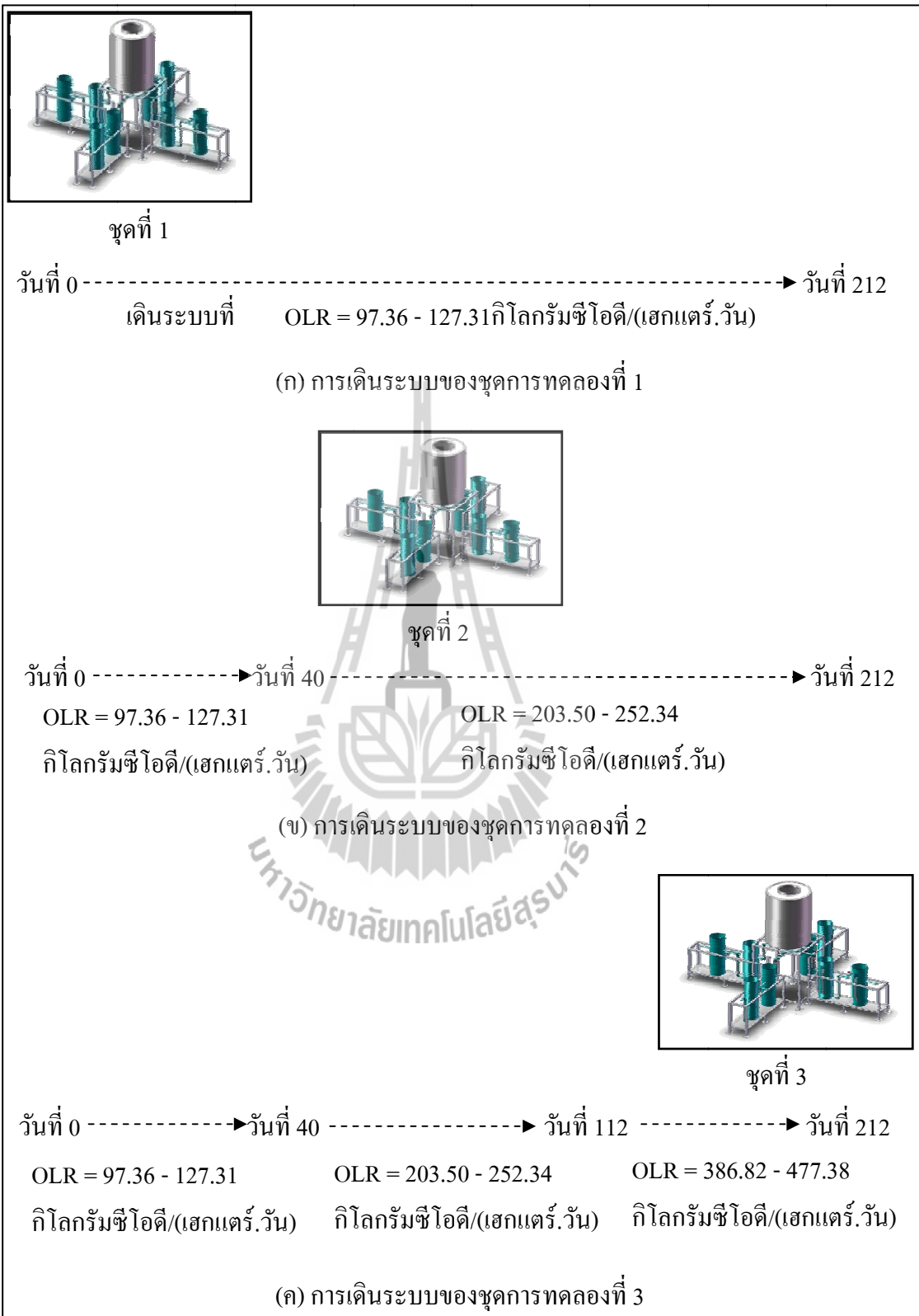
ตารางที่ 3.7 รายละเอียดความเข้มข้น และอัตราภาระสารต่าง ๆ

ความเข้มข้น	อัตราภาระบรรทุกสาร (กิโลกรัม/(เฮกแตร์.วัน))					
	ซีโอดี	บีโอดี	สีย้อม (Pt Co)	ฟอสฟอรัส	ไนโตรเจนทั้งหมด	แอมโมเนียไนโตรเจน
0.25	97.36-127.31	18.52-19.74	56.48-63.65	18.07-21.41	75.56-83.76	43.30-50.86
0.50	203.50-252.34	35.08-44.24	118.61-130.55	38.95-41.60	162.60-173.22	94.26-101.30
1.00	386.82-477.38	69.78-78.33	239.28-258.39	80.28-85.57	317.38-351.57	192.02-198.86

สรุปการเดินระบบของแต่ละชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก-ค) ชุดการทดลองที่ 1 นั้น นำน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) เข้าสู่ระบบ ตลอดระยะเวลาการศึกษาเป็นระยะเวลาทั้งหมด 212 วัน

ชุดการทดลองที่ 2 นั้น นำน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลาประมาณ 40 วัน หลังจากนั้น เพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 203.50-252.34 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ไปจนกระทั่งจบการทดลองเป็นระยะเวลาประมาณ 172 วัน รวมระยะเวลาทั้งหมด 212 วัน

ชุดการทดลองที่ 3 นำน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลาประมาณ 40 วัน และเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 203.50-252.34 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลาประมาณ 72 วัน และช่วงสุดท้ายเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 386.82-477.38 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) จนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาเป็นระยะเวลาทั้งหมด 212 วัน



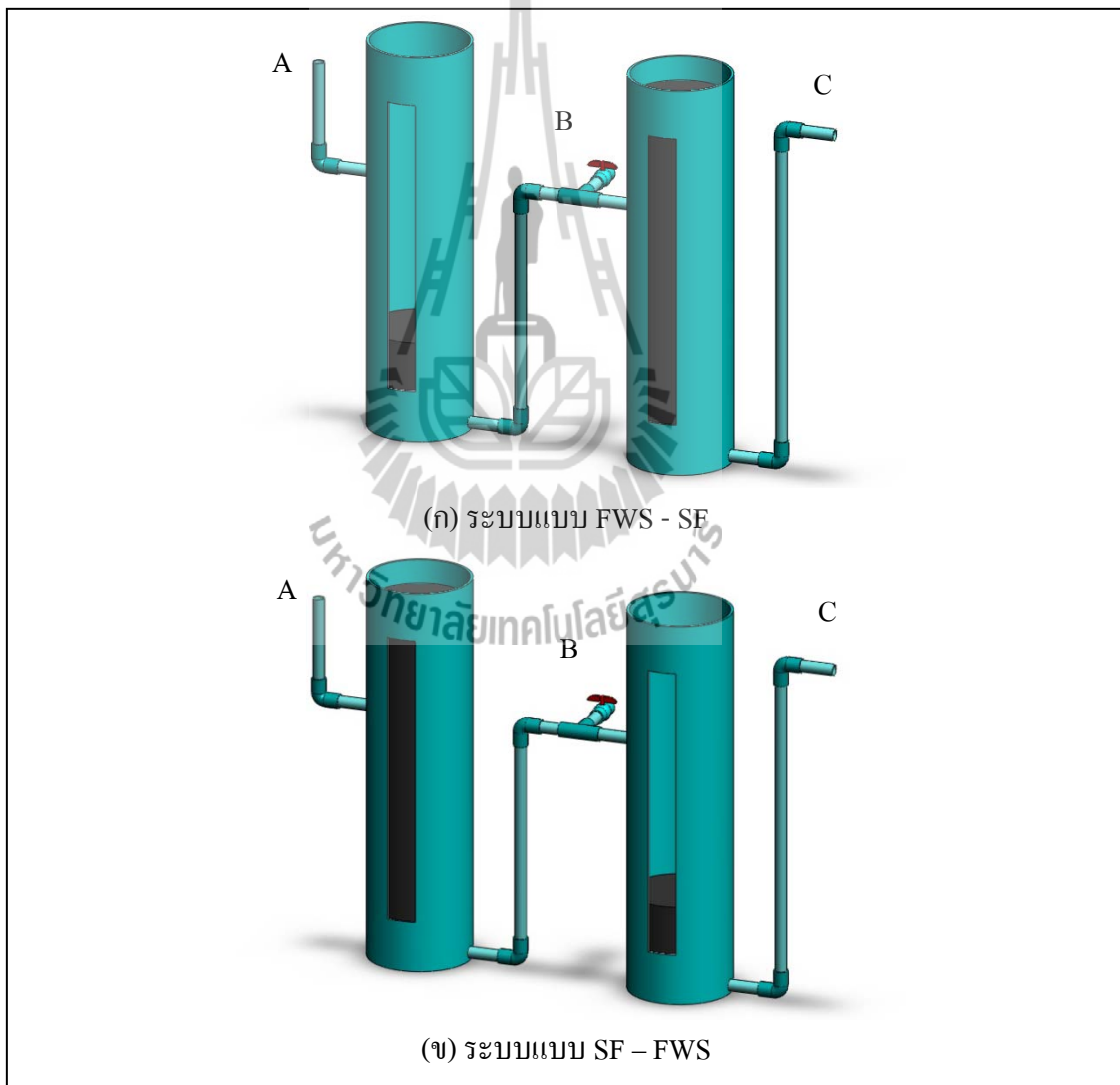
รูปที่ 3.4 สรุปการเดินระบบของแต่ละชุดการทดลองภายในระยะเวลาการศึกษาทั้งหมด 212 วัน

(ก) ชุดการทดลองที่ 1 (ข) ชุดการทดลองที่ 2 (ค) ชุดการทดลองที่ 3

3.3.4 การเก็บตัวอย่าง

3.3.4.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ

จุดในการเก็บตัวอย่างน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สำหรับระบบแบบ FWS-SF นั้น จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 3 จุดหลัก ได้แก่ ถังรวบรวมน้ำเสียก่อนเข้าคอลัมน์แบบ FWS (A) จุดน้ำผ่านคอลัมน์แบบ FWS (B) และจุดที่น้ำผ่านคอลัมน์แบบ SF (C) (รูปที่ 3.5 ก) และจุดเก็บตัวอย่างน้ำของระบบ แบบ SF-FWS จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 3 จุดหลัก ได้แก่ ถังรวบรวมน้ำเสียก่อนเข้าคอลัมน์แบบ SF (A) จุดน้ำผ่านคอลัมน์แบบ SF (B) และจุดที่น้ำผ่านคอลัมน์แบบ FWS (C) (รูปที่ 3.5 ข)



รูปที่ 3.5 จุดเก็บตัวอย่างน้ำของระบบแบบ FWS - SF (ก) และระบบแบบ SF - FWS (ข)

การเก็บตัวอย่างในแต่ละครั้ง สำหรับใน 1 ชุดการทดลองนั้น จะเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 9 ตัวอย่าง ดังนั้นจำนวนตัวอย่างของ 3 ชุดการทดลอง เท่ากับ 27 ตัวอย่างต่อการเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง โดยมีความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำสัปดาห์ละ 2 ครั้ง ตลอดระยะเวลาการศึกษาทั้งหมด 30 สัปดาห์ (212 วัน) เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD) บีโอดี (BOD) ทีเคเอ็น (TKN) แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_4) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และความเข้มข้นของสีโดยใช้ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนช่วงสีข้อมเอโซที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้สูงสุด รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ง รายละเอียดวิธีวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์

ลักษณะสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
COD	Close Reflux Method	APHA, AWWA, and WEF (2005)
BOD ₅	5-day BOD Test	
Total Kjeldahl Nitrogen	Kjeldahl Method	
Ammonia Nitrogen	Titrimetric Method	
Total Phosphorus	Vanadomolybdophosphoric Acid	
Oxidation Reduction Potential	ORP meter	
Dissolved oxygen	DO meter	
pH	pH meter	
Temperature	Thermometer	
Color	Spectrophotometric method	

3.3.4.2 สภาวะภายในระบบ

ทำการตรวจวัดค่าพีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิของน้ำ และค่าโออาร์พีภายในแต่ละชุดการทดลอง โดยทำการตรวจวัดสัปดาห์ละ 1 ครั้ง รายละเอียดวิธีวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.8

3.3.4.3 การเก็บตัวอย่างพืช

หลังจากสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษาวิจัย ทำการเก็บตัวอย่างต้นอ้อในแต่ละคอลัมน์ และต้นอ้อที่ปลูกในสภาวะปกติ คือ ต้นอ้อชนิดเดียวกันกับชุดทดลอง ปลูกในดินไถล้นบริเวณที่ทำการศึกษาวิจัย โดยทำการปลูกพร้อม ๆ กับที่เริ่มต้นเดินระบบ วิธีการเก็บตัวอย่างพืชดังแสดงในรูปที่ 3.6 และจำนวนตัวอย่างต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.9 และ 3.10 เพื่อนำมาหาค่า

น้ำหนักแห้ง (Biomass) และนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์เอ และบี (a, b chlorophyll content) เพราะคลอโรฟิลล์เอ และบีนั้นจะพบได้ในพืชชั้นสูงทั่วไป โดยคลอโรฟิลล์ในใบพืชสามารถใช้ประเมินสภาวะความผิดปกติของพืช เช่น หากพืชเกิดสภาวะใบเหลือง ซีด จะทำให้พืชสังเคราะห์แสงได้ลดลง หรือไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้เพราะไม่มีคลอโรฟิลล์ โดยใช้สูตรของ Whitham, Blaydes, and Delvin (1971) ดังสมการที่ 3.8-3.9

$$\text{Chlorophyll A} = \frac{[12.7D(663) - 2.69D(645)]V}{1000 \times W} \quad (3.8)$$

$$\text{Chlorophyll B} = \frac{[22.9D(645) - 4.68D(663)]V}{1000 \times W} \quad (3.9)$$

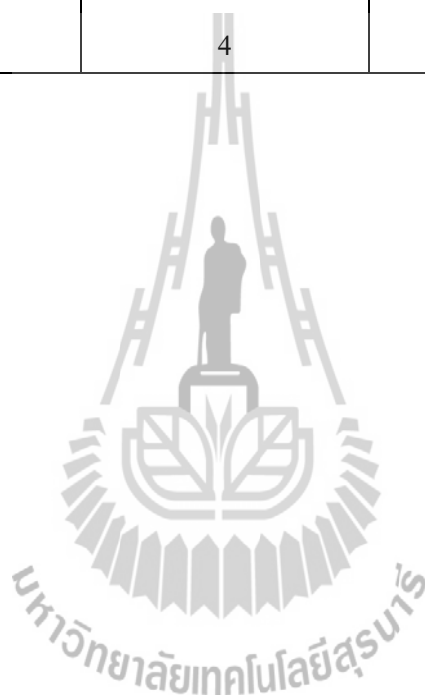
เมื่อ D(645) = ค่า absorbance ที่วัดได้โดยใช้ความยาวคลื่นแสง 645 นาโนเมตร
 D(663) = ค่า absorbance ที่วัดได้โดยใช้ความยาวคลื่นแสง 663 นาโนเมตร
 W = น้ำหนักตัวอย่างใบ (กรัม)
 V = ปริมาตรอะซิโตนที่คลอโรฟิลล์ละลายอยู่

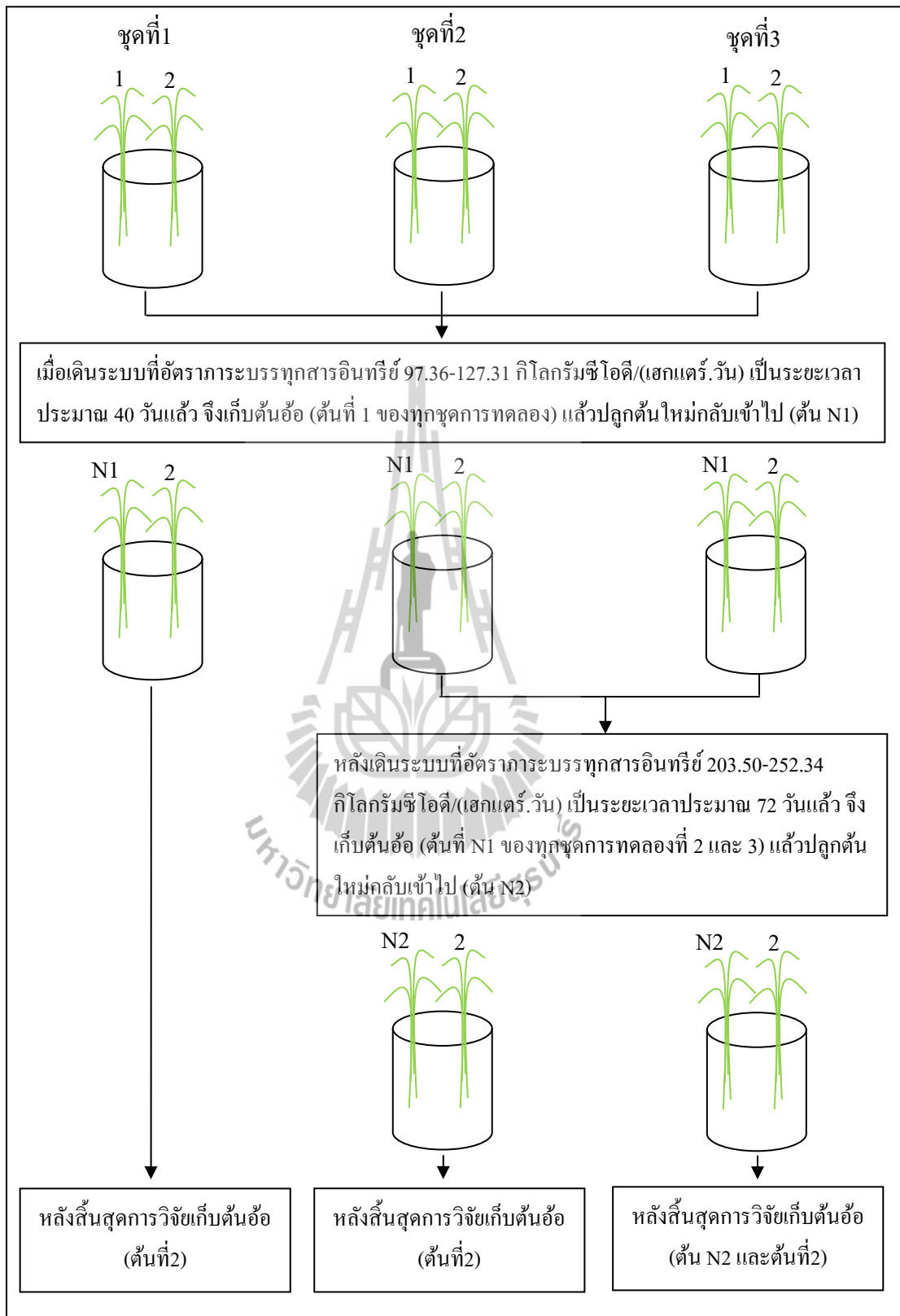
ตารางที่ 3.9 จำนวนตัวอย่างน้ำ

OLR (กิโลกรัมซีโอ ดี/(เฮกแตร์.วัน))	เวลาเดินระบบ (วัน)	จำนวนตัวอย่างน้ำ ต่อชุดการทดลอง	หมายเหตุ
97.36-127.31	40	40	เก็บตัวอย่างน้ำจากชุดที่ 1 2 และ 3
	212	212	เก็บตัวอย่างน้ำจากชุดที่ 1
203.50-252.34	72	144	เก็บตัวอย่างน้ำจากชุดที่ 2 และ 3
	172	172	เก็บตัวอย่างน้ำจากชุดที่ 2
386.82-477.38	100	100	เก็บตัวอย่างน้ำจากชุดที่ 3

ตารางที่ 3.10 จำนวนตัวอย่างพืช

ชุดทดลองที่	เวลาเดินระบบ (วัน)	จำนวนตัวอย่างพืชต่อ ชุดการทดลอง	หมายเหตุ
1	40	4	เก็บพืชต้นที่ 1 จากชุดที่ 1 2 และ3
	212	4	เก็บพืชต้นที่ 2 จากชุดที่ 1
2	72	4	เก็บพืชต้น N1 จากชุดที่ 2 และ3
	212	4	เก็บพืชต้นที่ 2 จากชุดที่ 2
3	100	4	เก็บพืชต้น N2 จากชุดที่ 3
	212	4	เก็บพืชต้นที่ 2 จากชุดที่ 3





รูปที่ 3.6 การเก็บตัวอย่างพืช

3.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง วิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.3.5.1 ประเมินค่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อม โดยนำข้อมูลคุณภาพเข้า และออกจากระบบทั้ง 2 แบบ มาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละพารามิเตอร์ ดังแสดงในสมการที่ 3.10 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ และสีย้อมแตกต่างกัน ได้แก่ ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี บีไอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน ฟอสฟอรัสทั้งหมด และความเข้มข้นของสี นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Independent Sample Test

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละพารามิเตอร์ (\%)} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (3.10)$$

โดย C_i = ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำเข้าระบบ (mg/l)

C_e = ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำออกจากระบบ (mg/l)

โดยทดสอบความแตกต่างของระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS มีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบด้วยวิธี Independent Sample Test (1-tailed) สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของระบบแบบ FWS-SF \leq ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของระบบแบบ SF-FWS

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของระบบแบบ FWS-SF $>$ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของระบบแบบ SF-FWS

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. (1-tailed) $<$ 0.05

กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบแบบ SF-FWS \leq ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบแบบ FWS-SF

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบแบบ SF-FWS $>$ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบแบบ FWS-SF

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. (1-tailed) $<$ 0.05

3.3.5.2 นำผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำก่อนเข้าคอลัมน์แบบ FWS กับน้ำจุดที่ออกจากคอลัมน์แบบ FWS มาคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด ดังสมการที่ 3.10 จะได้ประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์แบบ FWS และนำผลวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำก่อนเข้าคอลัมน์แบบ SF กับน้ำจุดที่ออกจากคอลัมน์แบบ SF มาคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด ดังสมการที่ 3.10 จะได้ประสิทธิภาพการบำบัดของคอลัมน์แบบ SF แล้วนำมาทดสอบความแตกต่างของคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF มีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบด้วยวิธี Independent Sample Test (1-tailed) สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของคอลัมน์แบบ FWS \leq ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของคอลัมน์แบบ SF

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของคอลัมน์แบบ FWS $>$ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของคอลัมน์แบบ SF

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. (1-tailed) $<$ 0.05

กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของคอลัมน์แบบ SF \leq ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของคอลัมน์แบบ FWS

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของคอลัมน์แบบ SF $>$ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมของคอลัมน์แบบ FWS

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. (1-tailed) $<$ 0.05

3.3.5.3 ทดสอบความแปรปรวนว่าที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ และสีข้อมแตกต่างกัน ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบด้วยวิธี One way ANOVA สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีและสีข้อมที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์และสีข้อมต่าง ๆ ของระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS เท่ากัน หรือค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีและสีข้อมที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์และสีข้อมต่าง ๆ ของระบบแบบ FWS - SF และ ระบบแบบ SF-FWS ไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีและสีข้อมที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์และสีข้อมต่าง ๆ ของระบบแบบ FWS-SF และ ระบบ

แบบ SF-FWS ไม่เท่ากัน หรือค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และสีย้อมที่อัตรากระบวนการทุกสารอินทรีย์และสีย้อมต่าง ๆ ระบบ แบบ FWS-SF และ ระบบแบบ SF-FWS แตกต่างกัน

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. < 0.05

3.3.5.4 ทดสอบความแตกต่างของระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS กับชุดควบคุม มีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยทดสอบด้วยวิธี Independent Sample Test (1-tailed) สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีและสีย้อมของระบบแบบ FWS-SF, ระบบแบบ SF-FWS \leq ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีและสีย้อมของชุดควบคุม

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีและสีย้อมของระบบแบบ FWS-SF, ระบบแบบ SF-FWS $>$ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีและสีย้อมของชุดควบคุม

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. (1-tailed) < 0.05

3.3.5.5 ทดสอบความแตกต่างของคลอโรฟิลล์ในใบพืช ระหว่างพืชที่เจริญเติบโตปกติกับพืชที่นำไปปลูกในคอลัมน์ ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อนำไปประเมินลักษณะความผิดปกติของพืช

บทที่ 4

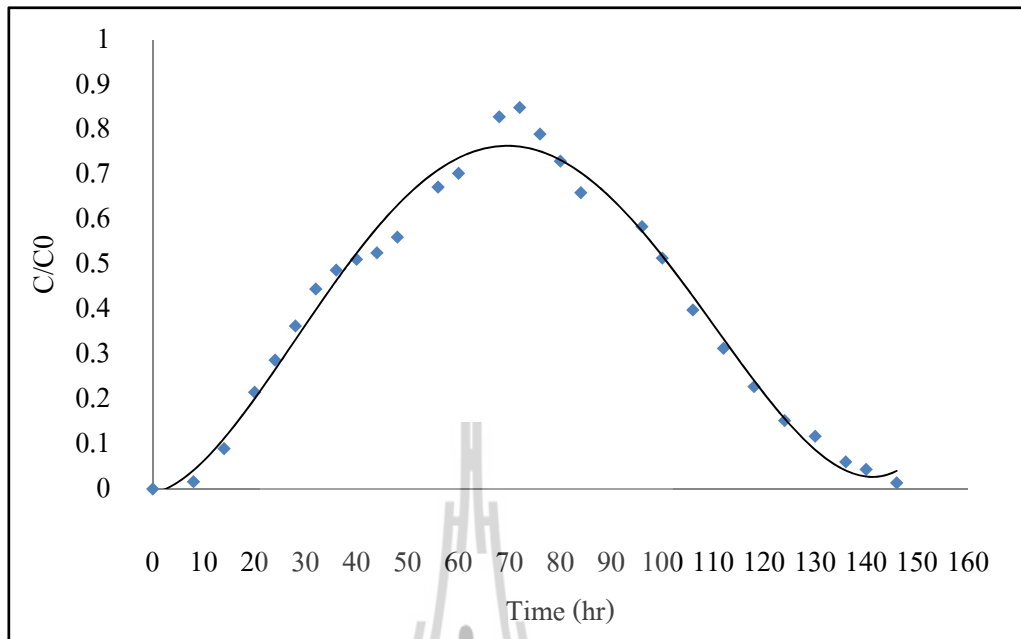
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์ของโรงงานฟอกย้อมหลังจากผ่านระบบเอสโดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

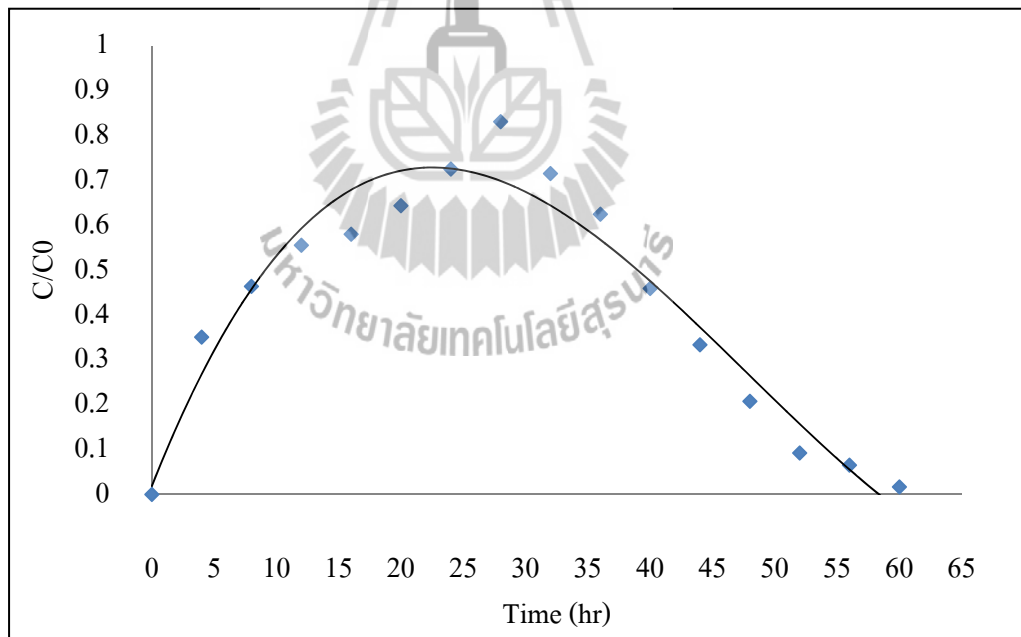
4.1 ผลการศึกษาดูตาม

จากการศึกษาดูตาม (Tracer study) โดยทำการใส่สารโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2.52 กรัมต่อลิตร อัตราการไหล 6.39 ลิตรต่อวัน เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ผลการศึกษาและรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข ตัวอย่างผลการศึกษาดูตามดังแสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องจากการศึกษานี้ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดักกลางและไหลใต้ผิวดักกลางมาต่ออนุกรมกัน ดังนั้นในการหาระยะเวลาเก็บกักนั้น จึงต้องนำระยะเวลาเก็บกักของทั้งสองระบบมารวมกัน โดยรูปที่ 4.1 (ก) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์ที่ออกจากคอลัมน์แบบ FWS กับเวลา และรูปที่ 4.1 (ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์ที่ออกจากคอลัมน์แบบ SF กับเวลา ซึ่งผลการศึกษาได้เส้นกราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ โดยในช่วงแรกจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดที่มีความเข้มข้นสูงสุด จากนั้นความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงจนกระทั่งมีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ใกล้เคียงความเข้มข้นเริ่มต้น

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าระยะเวลาเก็บกักเก็บน้ำของทุกชุดการทดลองที่ได้จากการคำนวณ T_{mean} มีค่าใกล้เคียงกับค่า T_{theory} โดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วงร้อยละ 0.11-2.68 เนื่องจากการเดินระบบสารติดตามอาจเกิดการไหลลัดวงจร และเมื่อพิจารณาค่าการกระจายการไหล (d) ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 3 ชุดการทดลองนั้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.043-0.052 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับในตารางที่ 3.4 (บทที่ 3) พบว่ามีลักษณะการไหลแบบกระจัดกระจายปานกลาง ซึ่งจะมีผลต่อการกวนสารต่าง ๆ ในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Metcalf and Eddy, 2003)



(ก) คอลัมน์แบบ FWS ของชุดทดลองที่ 1



(ข) คอลัมน์แบบ SF ของชุดทดลองที่ 1

รูปที่ 4.1 ผลการศึกษาสารติดตามของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
แบบ FWS (ก) และแบบ SF (ข) ของชุดทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสารติดตาม

ชุดทดลองที่	ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	ระยะเวลาเก็บกัก (ชั่วโมง)		ค่าการกระจาย การไหล (d)	ลักษณะการ ไหล	
		T _{theory}	T _{mean}			
1	ระบบแบบ FWS-SF (P)	96	96.11	0.044	การกระจาย การไหลปาน กลาง	
	ระบบแบบ SF-FWS (P)		94.61	0.048		
	ระบบแบบ FWS-SF (C)		95.02	0.043		
	ระบบแบบ SF-FWS (C)		93.32	0.050		
2	ระบบแบบ FWS-SF (P)		95.72	0.043		
	ระบบแบบ SF-FWS (P)		94.18	0.048		
	ระบบแบบ FWS-SF (C)		95.49	0.046		
	ระบบแบบ SF-FWS (C)		93.98	0.047		
3	ระบบแบบ FWS-SF (P)		95.88	0.043		
	ระบบแบบ SF-FWS (P)		95.29	0.047		
	ระบบแบบ FWS-SF (C)		94.46	0.044		
	ระบบแบบ SF-FWS (C)		93.88	0.052		

4.2 ลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำทิ้งสังเคราะห์ของโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แสดงในตารางที่ 4.2 โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำในถังรวบรวมน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของแต่ละชุดการทดลอง และจากลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์ของโรงงานฟอกย้อมนำมาคำนวณหาอัตราภาระบรรทุกสารที่เข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่โรงงานฟอกย้อม (Min-Max)

ความเข้มข้นสารอินทรีย์ และสีย้อม	ซัลไฟต์ (mg/l)	บีโอดี (mg/l)	ลีสיום (Pt Co)	ฟอสฟอรัส (mg/l)	ไนโตรเจน (mg/l)	แอมโมเนีย ไนโตรเจน (mg/l)
ความเข้มข้นสารอินทรีย์ และสีย้อมร้อยละ 25	47.84-62.56	9.10-9.70	56.48-63.65	8.88-10.52	37.13-41.16	21.28-24.99
ความเข้มข้นสารอินทรีย์ และสีย้อมร้อยละ 50	100.00-124.00	17.24-21.74	118.61-130.55	19.14-20.44	79.90-85.12	46.32-49.78
ความเข้มข้นสารอินทรีย์ และสีย้อมร้อยละ 100	190.08-234.58	34.29-38.49	239.28-258.39	39.45-42.05	155.96-172.76	94.36-97.72

ตารางที่ 4.3 ลักษณะน้ำทิ้งจากการศึกษาวิจัย (Min-Max)

ชุดการทดลองที่	ความเข้มข้นสารอินทรีย์และสีย้อม	อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ในรูปซี ไอที (กิโลกรัมซีไอที/(เฮกแตร์.วัน))	อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ในรูปบี ไอที (กิโลกรัมบีไอที/(เฮกแตร์.วัน))	ความเข้มข้นซีไอที (Pt Co)	อัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัส (กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน))	อัตราการบำบัดทุกไนโตรเจน (กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน))	อัตราการบำบัดทุกแอมโมเนียไนโตรเจน (กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน))	จำนวนตัวอย่าง
1	ความเข้มข้นสารอินทรีย์และสีย้อมร้อยละ 25	97.36-127.31	18.52-19.74	56.48-63.65	18.07-21.41	75.56-83.76	43.30-50.86	212
2	ความเข้มข้นสารอินทรีย์และสีย้อมร้อยละ 50	203.50-252.34	35.08-44.24	118.61-130.55	38.95-41.60	162.60-173.22	94.26-101.30	172
3	ความเข้มข้นสารอินทรีย์และสีย้อมร้อยละ 100	386.82-477.38	69.78-78.33	239.28-258.39	80.28-85.57	317.38-351.57	192.02-198.86	100

4.3 สถานะแวดล้อมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ผลการตรวจวิเคราะห์สถานะแวดล้อมภายในของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ตลอดช่วงระยะเวลาการเดินระบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยทำการตรวจวัดสัปดาห์ละ 1 ครั้ง พบว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำ และค่าไออาร์พี ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงสถานะการมีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจนของระบบ โดยหากมีค่าไออาร์พีมากกว่า 100 มิลลิโวลต์ แสดงว่าระบบจะอยู่ในสถานะมีออกซิเจน แต่หากค่าไออาร์พีน้อยกว่า 100 มิลลิโวลต์ แสดงว่าระบบเกิดสถานะไม่มีออกซิเจน (Suthersan, 2002) จากผลการศึกษาของระบบแบบ FWS-SF พบว่าภายในคอลัมน์แบบ FWS มีค่าไออาร์พีอยู่ในช่วง 90.0-115.3 มิลลิโวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในคอลัมน์ดังกล่าวอยู่ในสถานะมีออกซิเจน เนื่องจากได้รับออกซิเจนจากบรรยากาศโดยตรง และเมื่อตรวจวัดค่าไออาร์พีในคอลัมน์แบบ SF หลังผ่านคอลัมน์แบบ FWS พบว่าค่าไออาร์พีลดลงเหลือ 48.2-67.9 มิลลิโวลต์ เนื่องจากในคอลัมน์แบบ SF น้ำที่ขุ่นจะไหลอยู่ที่ตัวกลาง (หินดินดาน) ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ส่งผลทำให้ค่าไออาร์พีลดลงเช่นกัน ส่วนระบบแบบ SF-FWS จะเห็นได้ว่าค่าไออาร์พีภายในคอลัมน์แบบ SF อยู่ในช่วง 45.6-66.7 มิลลิโวลต์ แต่เมื่อน้ำที่ขุ่นไหลไปยังคอลัมน์แบบ FWS พบว่ามีค่าไออาร์พีเพิ่มขึ้นเป็น 85.3-104.3 มิลลิโวลต์ และผลการตรวจวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ได้ผลสอดคล้องกับค่าไออาร์พีที่ตรวจวัดได้ โดยระบบแบบ FWS-SF พบว่าภายในคอลัมน์แบบ FWS มีค่า DO อยู่ในช่วง 3.4-4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อตรวจวัดค่า DO ในคอลัมน์แบบ SF หลังผ่านคอลัมน์แบบ FWS พบว่าค่า DO ลดลงเหลือ 2.1-3.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาที่ได้จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลของค่าไออาร์พี ส่วนระบบแบบ SF-FWS จะเห็นได้ว่าค่า DO ภายในคอลัมน์แบบ SF อยู่ในช่วง 2.0-3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อน้ำที่ขุ่นไหลไปยังคอลัมน์แบบ FWS พบว่ามีค่า DO เพิ่มขึ้นเป็น 3.2-4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.0-7.5 และอุณหภูมิภายในระบบที่วัดได้ในช่วง 15.9-26.8 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงค่าพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของต้นอ้อ โดยค่าพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 2.0-8.0 และอุณหภูมิควรอยู่ในช่วง 10.0-35.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Reed, Middlebrooks, and Crites, 1988)

ตารางที่ 4.4 สภาวะแวดล้อมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (Max-Min)		ระบบแบบ SF-FWS (Max-Min)	
	คอลัมน์แบบ FWS	คอลัมน์แบบ SF	คอลัมน์แบบ SF	คอลัมน์แบบ FWS
โออาร์พี (mV)	(+115.3)-(90.0)	(+67.9)-(48.2)	(+66.7)-(45.6)	(+104.3) - (+85.3)
พีเอช	7.5-6.5	7.3-6.2	7.0-6.0	7.2-6.4
อุณหภูมิ (°C)	26.8-19.5	22.7-16.3	20.5-15.9	25.9-19.2
ออกซิเจนละลาย น้ำ (mg/L)	4.2-3.4	3.2-2.1	3.0-2.0	4.0-3.2

4.4 การบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดี

จากผลการตรวจวิเคราะห์น้ำเข้า-ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 3 ค่า รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS

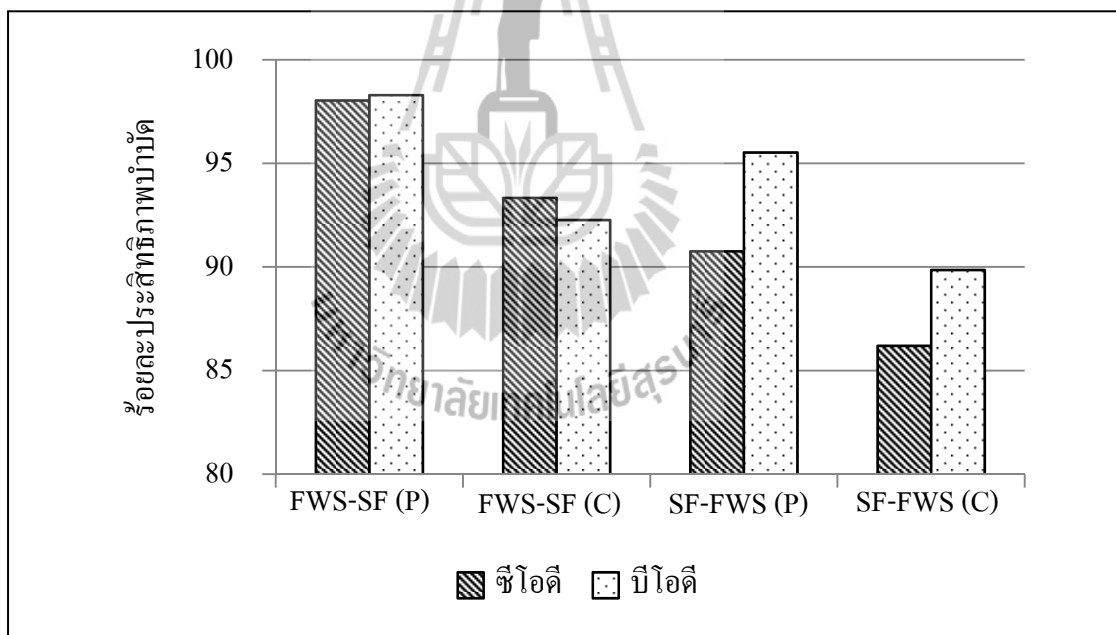
4.4.1.1 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเดินระบบ ช่วง 0-40 วัน ของชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นซีโอดี และ บีโอดีอยู่ในช่วง 47.84-62.56 และ 9.10-9.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้นน้ำที่ผ่านระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าความเข้มข้นซีโอดี และ บีโอดีของน้ำออก อยู่ในช่วง 0.00-17.17 และ 0.00-1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของระบบพบว่ามีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ ระบบแบบ FWS-SF (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) ระบบแบบ SF-FWS (P) และระบบแบบ SF-FWS (C) โดยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 98.04 93.34 90.76 และ 86.20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ในช่วง 40 วันแรกของการเดินระบบของทุกระบบ มีค่ามากกว่าร้อยละ 85 และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของทุกระบบ ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Independent Test พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) สูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ค การที่ระบบแบบ FWS-SF สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี

ได้นั้น เนื่องจากเมื่อน้ำทิ้งไหลเข้าไปในคอลัมน์แบบ FWS ซึ่งภายในคอลัมน์ดังกล่าวเกิดสภาวะมีออกซิเจน สอดคล้องกับผลการตรวจวัดสภาวะแวดล้อมภายในคอลัมน์ พบว่าค่าโออาร์พีและค่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่ามากกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าสูงกว่าคอลัมน์แบบ SF ดังนั้น สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็วโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจน เมื่อนำมาคำนวณหา ค่าอัตราการกำจัดชีโอดีมีค่าเท่ากับ 0.337 กรัมต่อวัน ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.3 ก. ดังนั้นปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจึงเหลือเพียงเล็กน้อย ก่อนจะถูกส่งต่อไปยังคอลัมน์แบบ SF เพื่อช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่เหลือทำให้มีค่าอัตราการกำจัดชีโอดีเหลือเพียง 0.030 กรัมต่อวัน และสำหรับระบบแบบ SF-FWS เมื่อน้ำทิ้งไหลเข้าไปในคอลัมน์แบบ SF ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้อยกว่าภายในคอลัมน์แบบ FWS ดังนั้นจึงมีโอกาสเกิดสภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทั้งแบบมีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจน ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ถูกกำจัดไปได้ น้อยกว่า และมีค่าอัตราการกำจัดชีโอดีเท่ากับ 0.280 กรัมต่อวัน เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานกว่าแบบใช้ออกซิเจน เมื่อสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่ถูกส่งต่อไปยังคอลัมน์แบบ FWS ยังมีสารอินทรีย์เหลืออยู่ในปริมาณมาก และมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดี เท่ากับ 0.034 กรัมต่อวัน (รูปที่ 4.3 ข.) ดังนั้นร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีทั้งหมดของระบบแบบ FWS-SF จึงสูงกว่าระบบแบบ SF-FWS ซึ่งการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ขึ้นอยู่กับ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ และออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาการบำบัดสารอินทรีย์ (กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546) ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Lin et al. (2002) ที่ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS กับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ต่ออนุกรมกัน เพื่อบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลา พบว่าสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีได้ร้อยละ 25-55 โดยชีโอดีสามารถกำจัดได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS โดยจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามพืชจำนวนมาก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่าระบบที่ปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดี และบีโอดีสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่ปลูกต้นอ้อ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Mbuligwe (2005) พบว่า พืชที่ปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีต้นอ้อไม่ปลูกถึงร้อยละ 17.5-21.7 เนื่องจากพืชมีกลไกการย่อยสลายหรือเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช นอกจากนี้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช มีส่วนช่วยในการเพิ่มค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ ส่งผลดีต่อการกำจัดสารอินทรีย์อีกด้วย (Banat, Al-Asheh, and Al-Makhadmed, 2003) สำหรับผลการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีนั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.30 95.53 92.27 และ 89.86 ตามลำดับ (รูปที่ 4.2)

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดซีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน

ระบบจำลอง พื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	ซีโอดี (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.	บีโอดี (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.
	เข้า min-max	ออก min-max		เข้า min-max	ออก min-max	
ระบบแบบ FWS-SF (P)	47.84-62.56	0.00-2.45	98.04 \pm 2.00	9.10-9.70	0.00-0.50	98.30 \pm 1.60
ระบบแบบ FWS-SF (C)		0.00-7.36	93.34 \pm 4.00		0.30-1.00	92.27 \pm 1.84
ระบบแบบ SF-FWS (P)		0.00-14.72	90.76 \pm 9.03		0.20-0.70	95.53 \pm 1.25
ระบบแบบ SF-FWS (C)		1.84-17.17	86.20 \pm 9.33		0.60-1.20	89.86 \pm 1.46



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และบีโอดี ภายในระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน
ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)

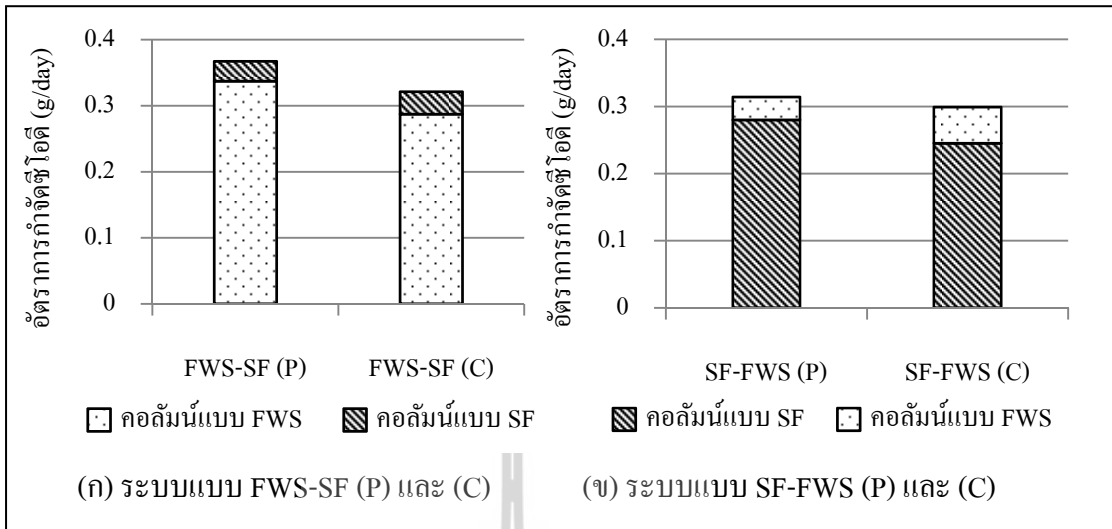
จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ในช่วง 40 วันแรกของการเดินระบบ มีค่ามากกว่าร้อยละ 85 และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีของทุกระบบไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ประสิทธิภาพ

ในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) สูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) เช่นเดียวกับการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี จะเห็นได้ว่าอัตราการกำจัดบีโอดีจะต่ำกว่าอัตราการกำจัดซีโอดี เนื่องจากสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีถูกกำจัดโดยระบบบำบัดเอเอสจนเกือบหมด จะเห็นได้จากลักษณะน้ำทิ้งฟอกย้อมมีอัตราส่วนค่าบีโอดีต่อซีโอดีค่อนข้างต่ำ อยู่ในชว่นน้อยกว่า 0.2 สารอินทรีย์ที่เหลืออยู่จึงเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากโดยกระบวนการทางชีวภาพ

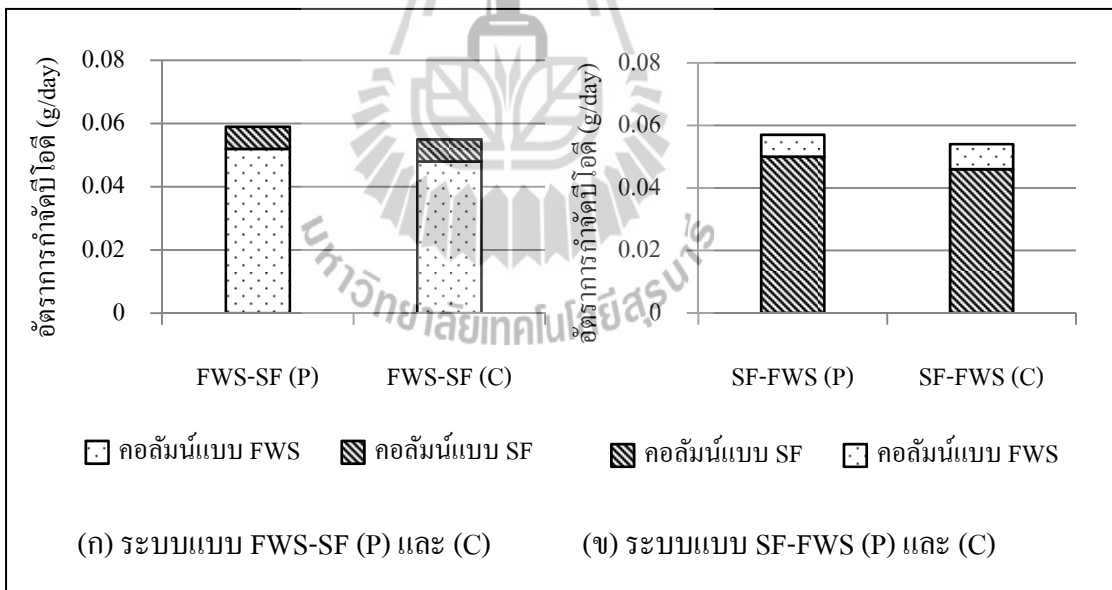
หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 40 วันแล้วนั้น ในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ให้อยู่ในช่วง 203.50-252.34 กิโลกรัมซีโอดี/ (เฮกแตร์.วัน) ส่วนชุดการทดลองที่ 1 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่องที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่าเดิม (97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/ (เฮกแตร์.วัน)) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาวิจัย ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน เพื่อศึกษาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง และเมื่อนำข้อมูลของชุดการทดลองที่ 1 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี ตั้งแต่วันที่ 0-40 อยู่ในชว่นร้อยละ 80.00-100.00 หลังจากนั้นเมื่อเดินระบบต่อเนื่องพบว่าในช่วงวันที่ 44-124 พบว่าค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี อยู่ในชว่นร้อยละ 70.00-95.00 โดยมีแนวโน้มลดลงจากเดิมเล็กน้อย และหลังจากเดินระบบต่อไปจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาในการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีลดลงเหลืออยู่ในชว่นร้อยละ 60.00-85.00 สอดคล้องกับการศึกษาของ Bulc (2006) ที่ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำชะขยะ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะลดลง เมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากน้ำชะขยะมีสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก (บีโอดีต่อซีโอดีน้อยกว่า 0.1) อาจทำให้จุลินทรีย์มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีลดลง เช่นเดียวกับน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสังเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าบีโอดีต่อซีโอดีประมาณ 0.15 นอกจากนี้พืชที่มีอายุมากขึ้น ก็มีแนวโน้มทำให้การกำจัดสารอินทรีย์ลดลง สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยในช่วงวันที่ 0-40 มีประสิทธิภาพร้อยละ 88.00-100.00 เมื่อเดินระบบต่อเนื่องพบว่าในช่วงวันที่ 44-124 ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีอยู่ในชว่นร้อยละ 88.00-100.00 ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกับช่วง 40 วันแรก และหลังจากเดินระบบต่อไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีอยู่ในชว่นร้อยละ 85.00-98.00 ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีตลอดเวลาเดินระบบ 212 วัน มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และมีไอดี ระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์. วัน)

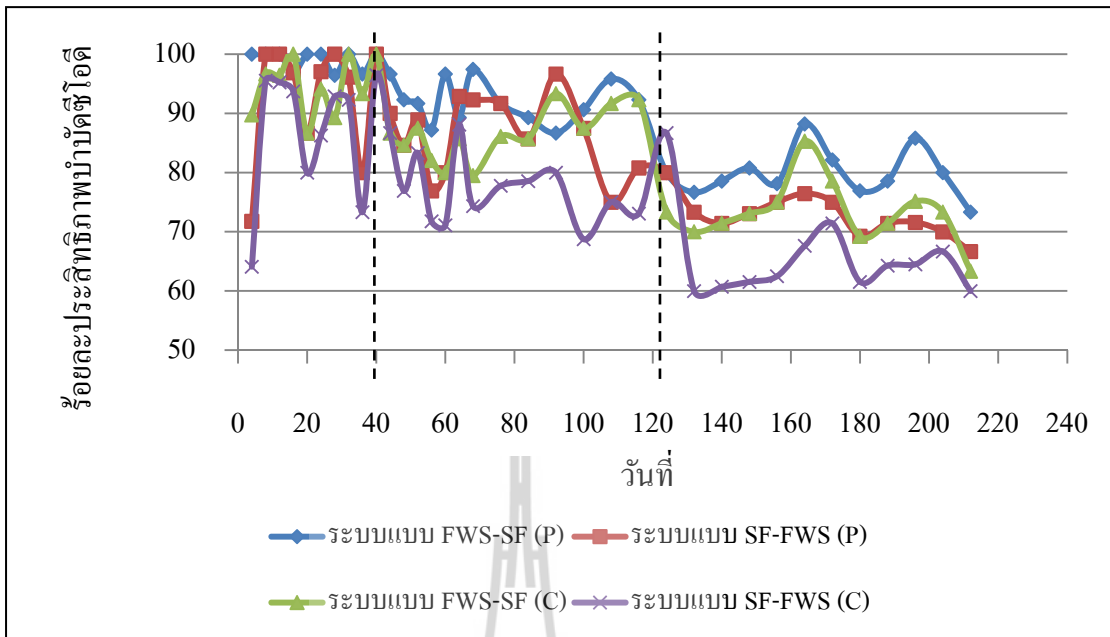
พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ซี ไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	47.84-62.56	1.84-11.04	0.030	47.84-62.56	0.280	3.68-23.31	0.034
	น้ำออก (mg/l)	1.84-11.04	0.00-2.45		3.68-23.31		0.00-14.72	
บี ไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	9.10-9.70	1.10-1.50	0.007	9.10-9.70	0.050	1.30-2.00	0.007
	น้ำออก (mg/l)	1.10-1.50	0.00-0.50		1.30-2.00		0.20-0.70	
ระบบแบบ FWS-SF (C)								
พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (C)				ระบบแบบ SF-FWS (C)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ซี ไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	47.84-62.56	1.84-14.72	0.034	47.84-62.56	0.245	7.36-29.44	0.054
	น้ำออก (mg/l)	1.84-14.72	0.00-7.36		7.36-29.44		1.84-17.17	
บี ไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	9.10-9.70	1.60-2.20	0.007	9.10-9.70	0.046	1.80-2.60	0.008
	น้ำออก (mg/l)	1.60-2.20	0.30-1.00		1.80-2.60		0.60-1.20	



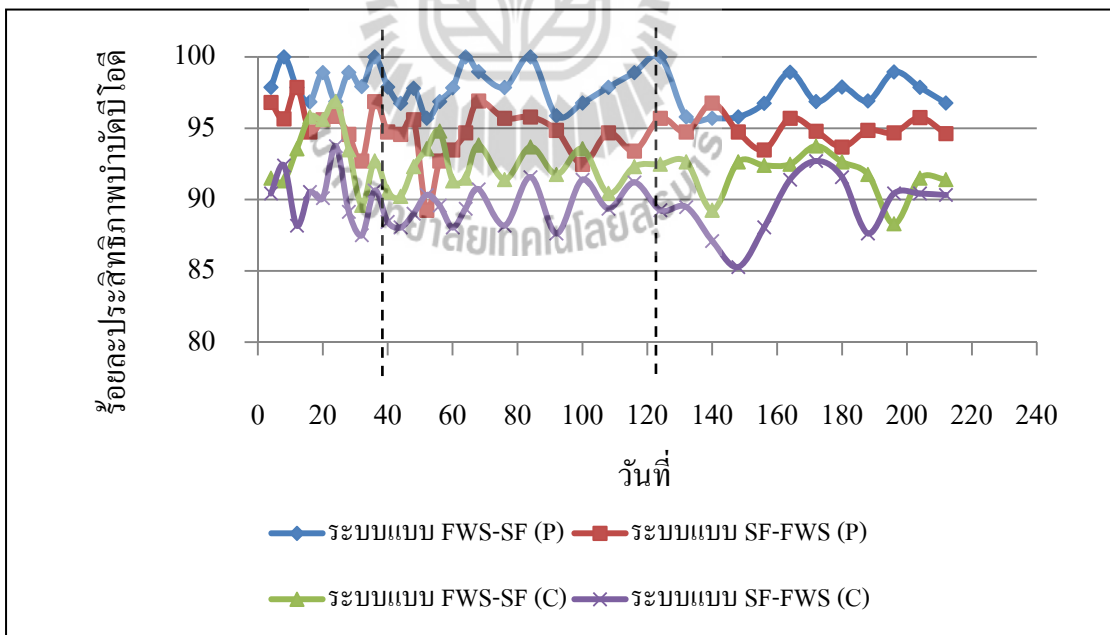
รูปที่ 4.3 อัตราการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)



รูปที่ 4.4 อัตราการกำจัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ 18.52-19.74 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดศัตรูพืชของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราสารบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน



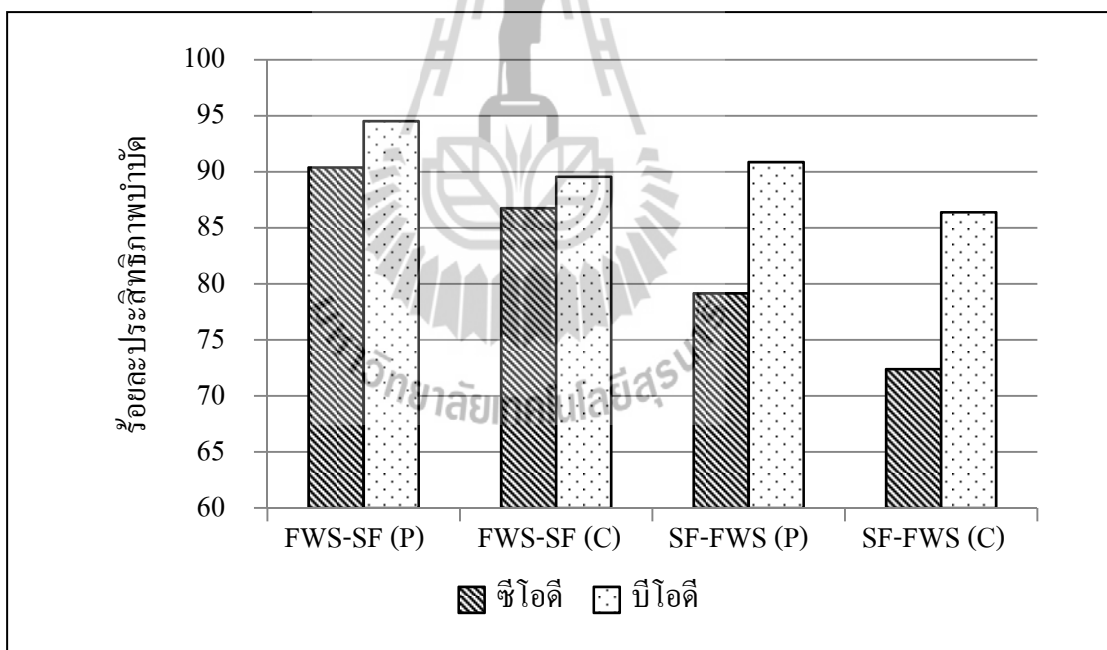
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดศัตรูพืชของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราสารบรรทุกสารอินทรีย์ 18.52-19.74 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน

4.4.1.2 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)

สำหรับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ที่เป็นระยะเวลา 40 วันแล้ว ทำการเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็น 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) โดยทำการเดินระบบต่อมาเป็นระยะเวลา 72 วัน ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ FWS-SF (C) ระบบแบบ SF-FWS (P) และระบบแบบ SF-FWS (C) ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีร้อยละ 90.40 86.76 79.16 และ 72.40 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีของระบบลดลงประมาณร้อยละ 10 แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 สำหรับผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีนั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.54 90.88 89.57 และ 86.40 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีของระบบลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 5 แต่ก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีมากกว่าร้อยละ 85 อย่างไรก็ตามระบบแบบ FWS-SF (P) ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดชีโอดี และบีโอดี สูงกว่าระบบอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) จากตารางที่ 4.8 พบว่าคอลัมน์แบบ FWS มีอัตราการกำจัดชีโอดี และบีโอดีเท่ากับ 0.503 และ 0.105 กรัมต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าคอลัมน์แบบ SF ที่มีอัตราการกำจัดเท่ากับ 0.422 และ 0.100 กรัมต่อวัน ตามลำดับ และมีค่ามากกว่าอัตราการกำจัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) สอดคล้องกับการศึกษาของ ศศิวิมล สุดแสน (2554) ในการบำบัดชีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.32 0.64 และ 1.28 $m^3 m^{-2} d^{-1}$ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์มีผลทำให้อัตราการกำจัดชีโอดีเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ก็มีขีดจำกัด เพราะเมื่อถึงที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่มากเกินไปกว่าประสิทธิภาพของระบบจะรับได้นั้น อัตราการกำจัดชีโอดีจะลดลง

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดซีไอดี และบีไอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
203.50-252.34 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกเตอร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 72 วัน

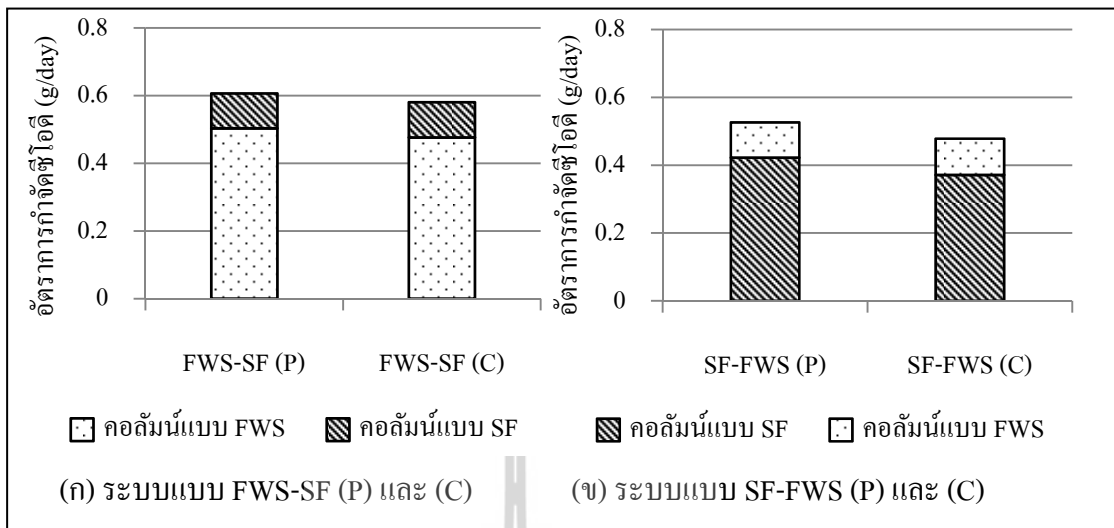
ระบบจำลอง พื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	ซีไอดี (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.	บีไอดี (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.
	เข้า min-max	ออก min-max		เข้า min-max	ออก min-max	
ระบบแบบ FWS-SF (P)	100.00-124.00	3.98- 15.84	90.40 \pm 3.89	17.24-21.74	0.50-2.00	94.54 \pm 1.57
ระบบแบบ FWS-SF (C)		10.60- 21.12	86.76 \pm 3.16		1.50-3.50	89.57 \pm 2.05
ระบบแบบ SF-FWS (P)		10.67-27.72	79.16 \pm 8.66		1.00-3.00	90.88 \pm 2.06
ระบบแบบ SF-FWS (C)		16.00-39.60	72.40 \pm 9.84		1.75-3.75	86.40 \pm 2.45



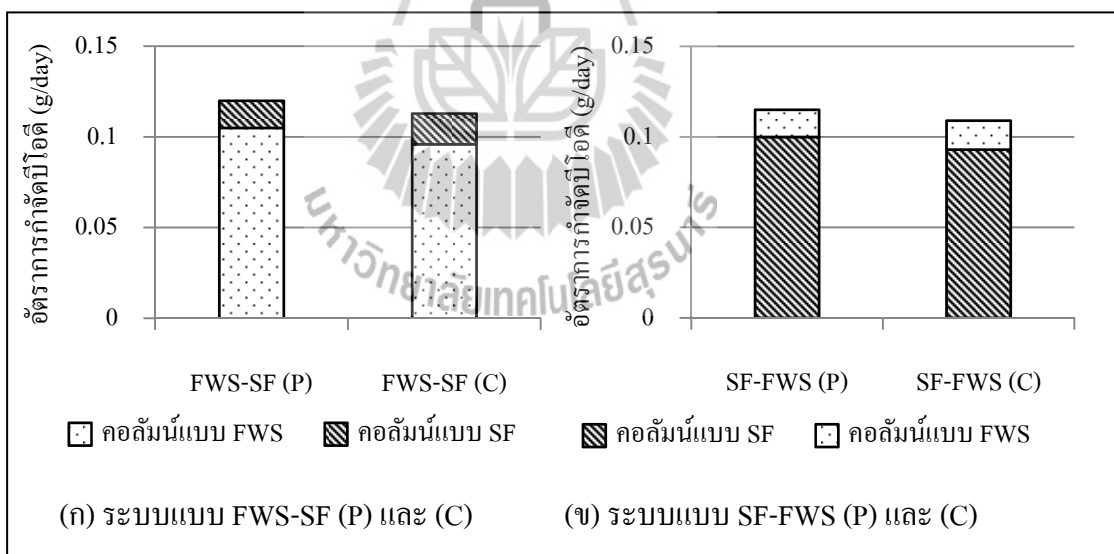
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และบีไอดี ภายในระยะเวลาเดินระบบ 72 วัน
ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกเตอร์.วัน)

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และมีไอดี ระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	FWS	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)
ซีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	100.00-124.00	17.23-48.00	0.103	100.00-124.00	0.422	24.00-64.00	0.104
	น้ำออก (mg/l)	17.23-48.00	3.98-15.84		24.00-64.00		10.67-27.72	
บีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	17.24-21.74	2.70-4.25	0.015	17.24-21.74	0.100	3.25-5.50	0.015
	น้ำออก (mg/l)	2.70-4.25	0.50-2.00		3.25-5.50		1.00-3.00	
ระบบแบบ FWS-SF (C)								
พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (C)				ระบบแบบ SF-FWS (C)			
	FWS	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการผลิตเฉลี่ย (g/day)
ซีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	100.00-124.00	19.88-39.60	0.104	100.00-124.00	0.371	29.33-68.00	0.107
	น้ำออก (mg/l)	19.88-39.60	10.60-21.12		29.33-68.00		16.00-39.60	
บีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	17.24-21.74	3.00-6.00	0.017	17.24-21.74	0.093	4.00-7.25	0.016
	น้ำออก (mg/l)	3.00-6.00	1.50-3.50		4.00-7.25		1.75-3.75	

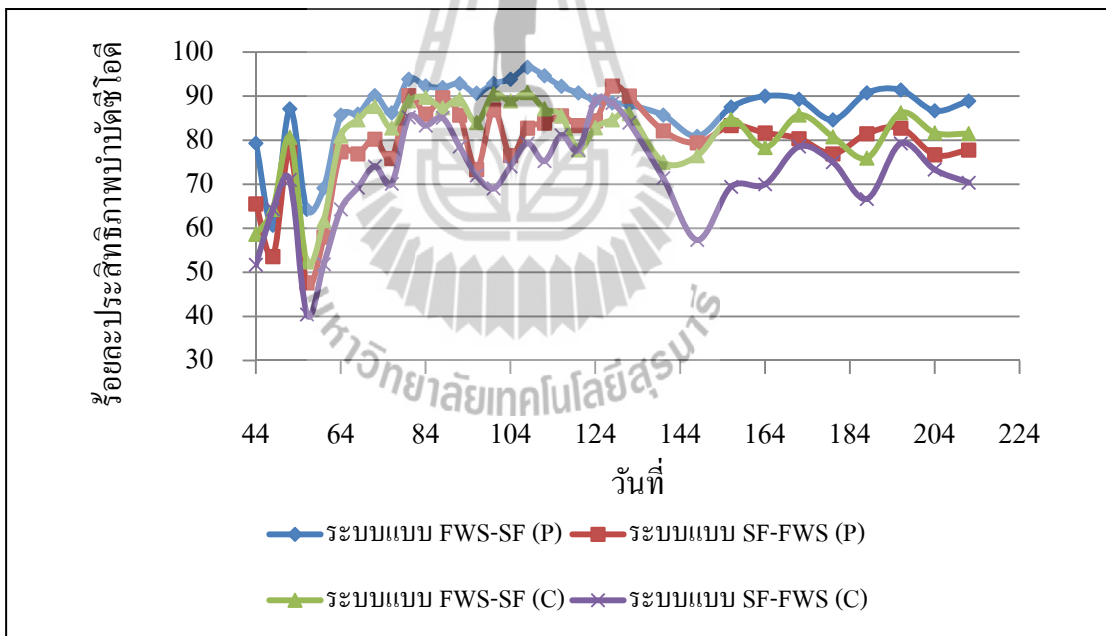


รูปที่ 4.8 อัตราการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

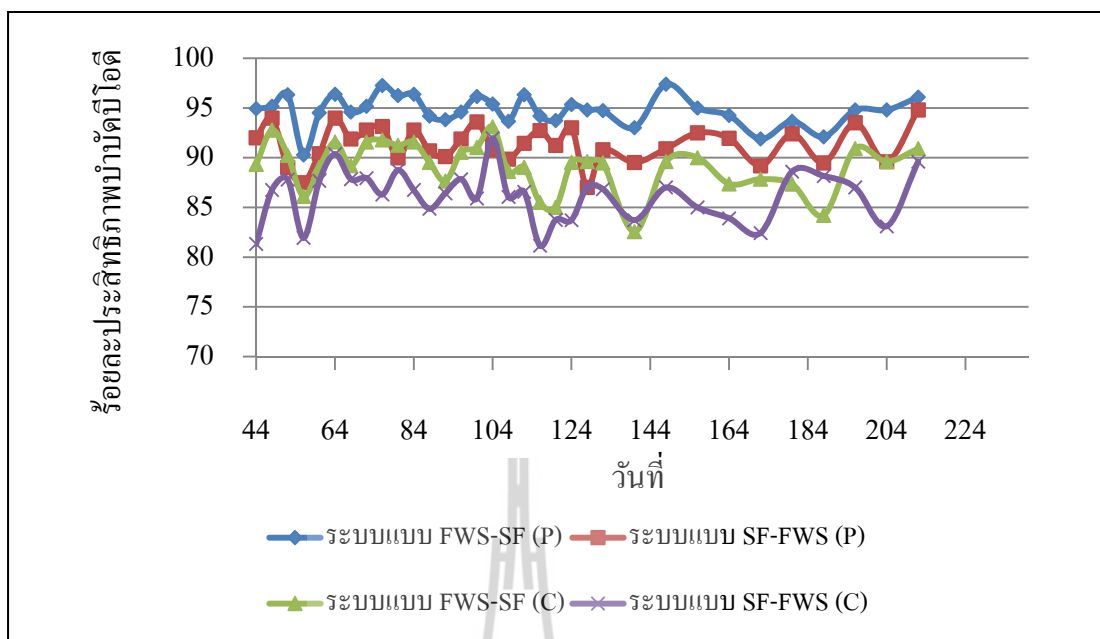


รูปที่ 4.9 อัตราการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 35.08- 44.24 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 72 วันแล้วนั้น ชุดการทดลองที่ 3 ทำการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 386.82-477.38 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่อง ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่าเดิม (203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาวิจัย ตั้งแต่วันที่ 40 จนถึงวันที่ 212 รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน จากระยะเวลาเดินระบบทั้งหมด 212 วัน นำข้อมูลผลการศึกษาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดี และบีโอดี กับเวลา แสดงในกราฟรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดี ในช่วงแรกที่เพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์นั้นระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการปรับสภาพของระบบเพื่อให้สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นได้ และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดี และบีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-90.00 และ 80.00-95.00 ตามลำดับ จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ (212 วัน)



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำไอ้ดของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 35.08-44.24 กิโลกรัมบีไอ้ด/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน

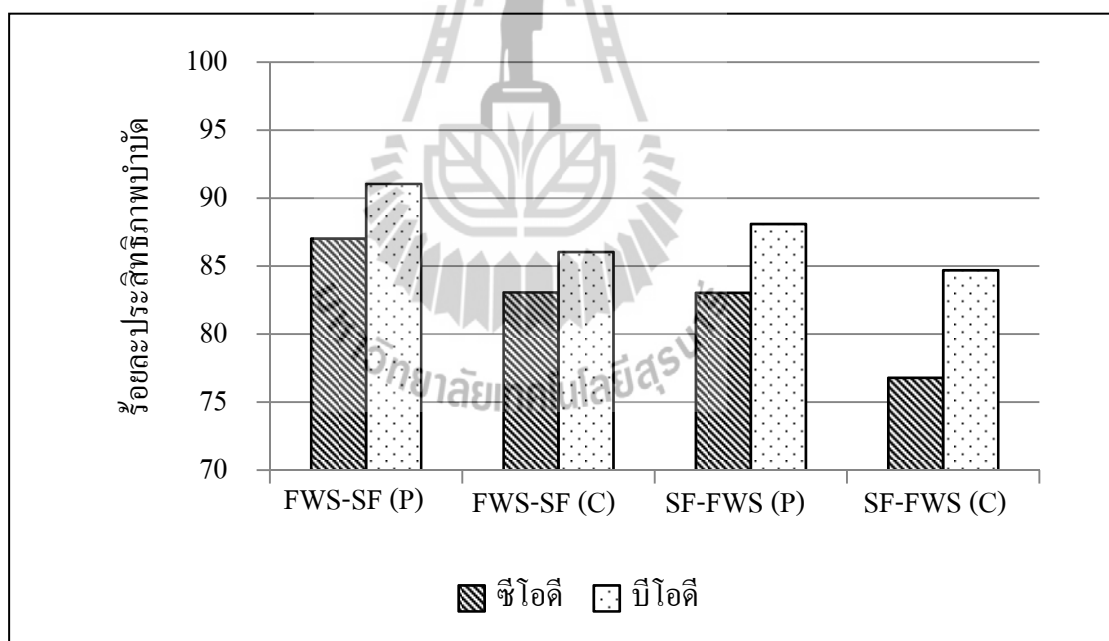
4.4.1.3 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอ้ด/(เฮกแตร์.วัน)

สำหรับชุดการทดลองที่ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมซีไอ้ด/(เฮกแตร์.วัน) 72 วันแล้ว ทำการเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็น 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอ้ด/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 100 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.12 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอ้ดของระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ FWS-SF (C) ระบบแบบ SF-FWS (P) และระบบแบบ SF-FWS (C) ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอ้ดร้อยละ 87.04 83.08 83.05 และ 76.80 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอ้ดของระบบแบบ FWS-SF (P) ลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 5 แต่ระบบแบบ SF-FWS (P) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอ้ดเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 5 อย่างไรก็ตามระบบแบบ FWS-SF (P) ก็ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอ้ด สูงกว่าระบบแบบ SF-FWS (P) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีไอ้ดนั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ

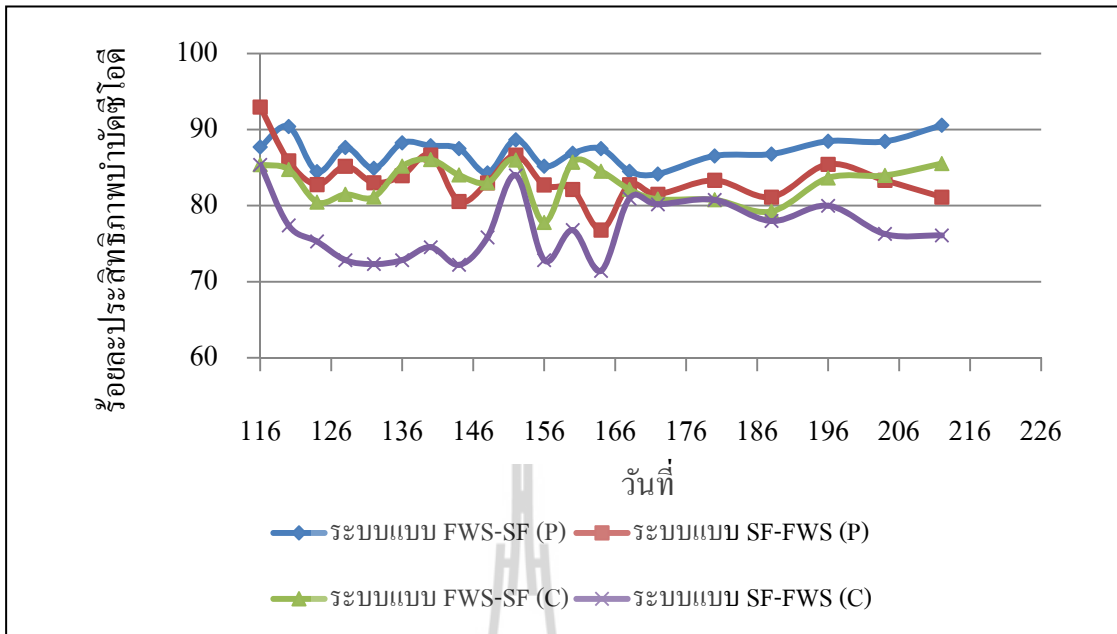
FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 91.06 88.11 86.05 และ 84.71 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีของระบบลดลงเล็กน้อย ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยระบบแบบ FWS-SF (P) ก็ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี สูงกว่าระบบอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) และจากตารางที่ 4.10 พบว่าคอลัมน์แบบ FWS มีอัตราการกำจัดชีโอดี และบีโอดี ประมาณ 0.944 และ 0.187 กรัมต่อวัน ซึ่งมากกว่าคอลัมน์แบบ SF ที่มีอัตราการกำจัดประมาณ 0.853 และ 0.180 กรัมต่อวัน และมากกว่าอัตราการกำจัดชีโอดี และบีโอดีที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) และที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ซึ่งการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของ U.S. EPA (2000) ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 45-60 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ควรมีระยะเวลาเก็บกักอยู่ในช่วง 2-3 วัน ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ที่มีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 18.52-78.33 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน)

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดซีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์
386.82-477.38 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกเตอร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 100 วัน

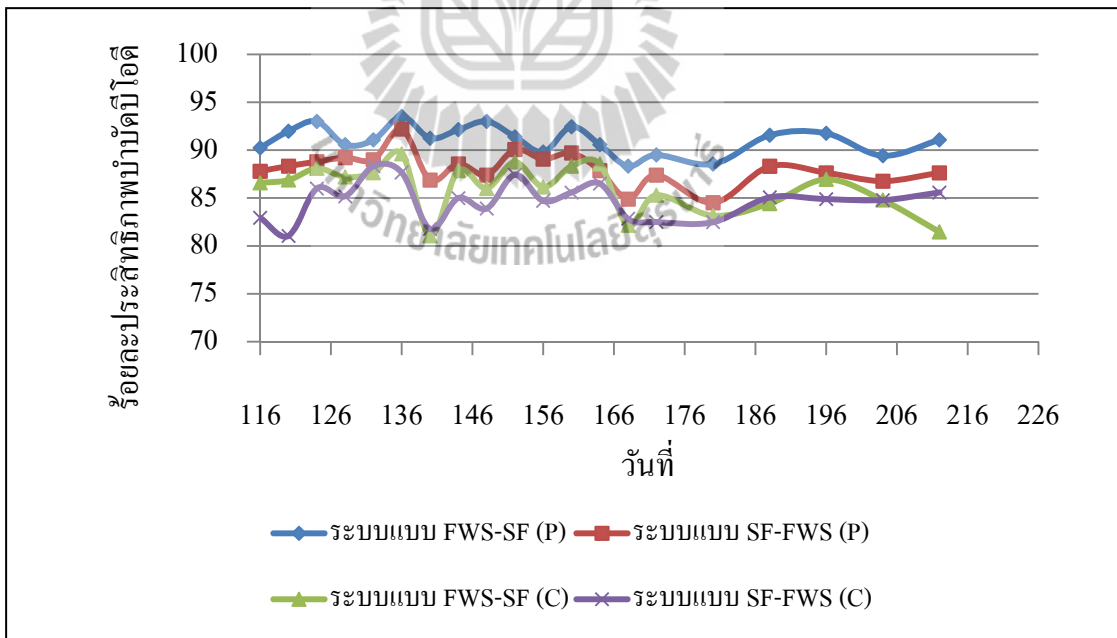
ระบบจำลอง พื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	ซีโอดี (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.	บีโอดี (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.
	เข้า min-max	ออก min-max		เข้า min-max	ออก min-max	
ระบบแบบ FWS-SF (P)	190.09-234.58	19.88-35.78	87.04 \pm 1.93	34.29-38.49	2.00-4.25	91.06 \pm 1.45
ระบบแบบ FWS-SF (C)		27.72-45.06	83.08 \pm 2.45		2.75-6.75	86.05 \pm 2.50
ระบบแบบ SF-FWS (P)		15.90-39.76	83.05 \pm 2.38		2.50-5.75	88.11 \pm 1.71
ระบบแบบ SF-FWS (C)		31.68-58.67	76.80 \pm 4.02		3.50-6.50	84.71 \pm 1.99



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และบีโอดี ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน
ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีโอดี/(เฮกเตอร์.วัน)



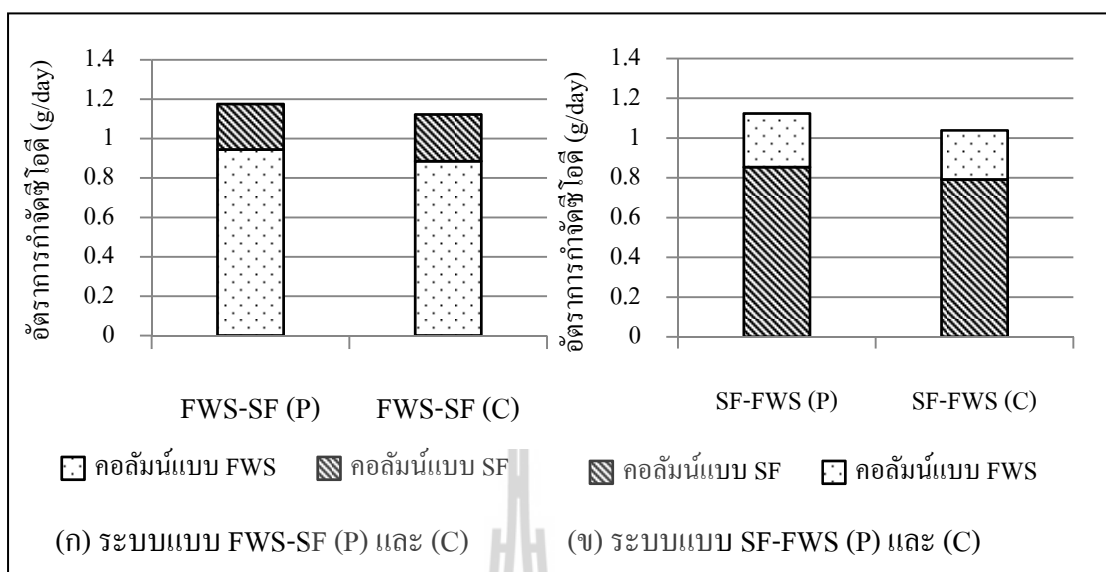
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมชีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน



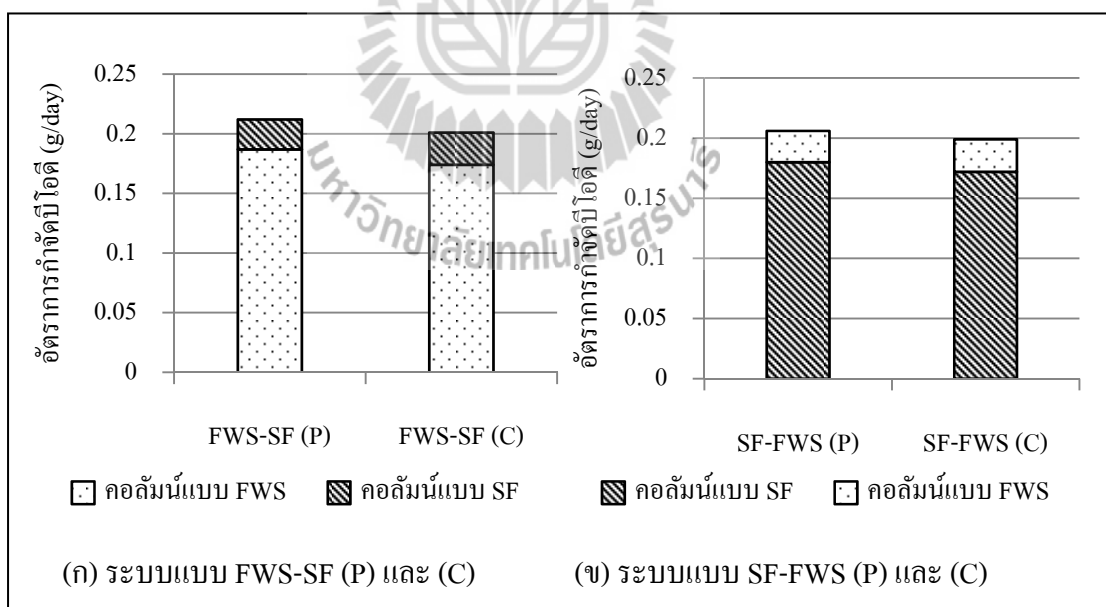
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 69.78-78.33 กิโลกรัมบีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และมีไอดี ระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ซีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	190.09-234.58	39.76-71.28	0.231	190.09-234.58	0.853	59.40-87.12	0.270
	น้ำออก (mg/l)	39.76-71.28	19.88-35.78		59.40-87.12			
บีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	34.29-38.49	6.00-8.75	0.025	34.29-38.49	0.180	6.50-10.75	0.026
	น้ำออก (mg/l)	6.00-8.75	2.00-4.25		6.50-10.75			
ระบบแบบ FWS-SF (C)								
พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (C)				ระบบแบบ SF-FWS (C)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ซีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	190.09-234.58	50.36-93.72	0.237	190.09-234.58	0.791	72.64-110.88	0.247
	น้ำออก (mg/l)	50.36-93.72	27.72-45.06		72.64-110.88			
บีไอดี	น้ำเข้า (mg/l)	34.29-38.49	7.00-11.00	0.027	34.29-38.49	0.172	7.50-11.50	0.027
	น้ำออก (mg/l)	7.00-11.00	2.75-6.75		7.50-11.50			



รูปที่ 4.15 อัตราการกำจัดซีไอดีของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

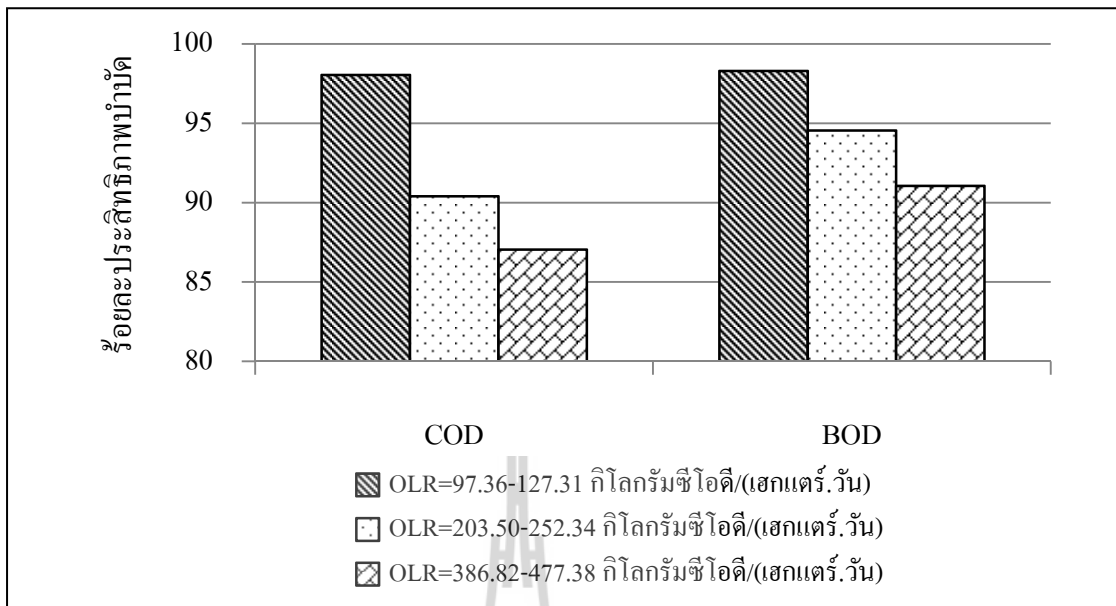


รูปที่ 4.16 อัตราการกำจัดบีไอดีของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 69.78-78.33 กิโลกรัมบีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

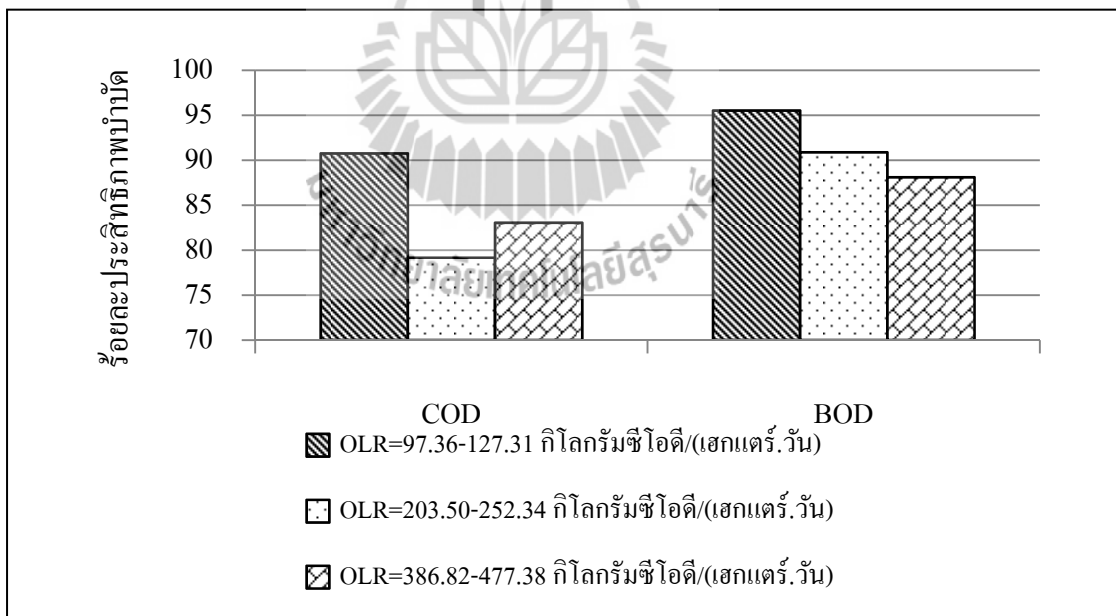
4.4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกันของแต่ละระบบ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ดังกล่าวข้างต้น เมื่อนำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA ดังแสดงภาคผนวก ก พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) ของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยระบบแบบ FWS-SF (P) มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีสูงสุด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.04 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีไอดี พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีไอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) ของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยระบบแบบ FWS-SF (P) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีไอดีสูงสุด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.30 ซึ่งให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีสำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีสูงสุด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 90.76 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีไอดีพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีไอดีสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 95.53 ดังแสดงในรูปที่ 4.18

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ระบบแบบ FWS-SF (P) และ ระบบแบบ SF-FWS (P) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีสูงสุด ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) ซึ่งมีค่าความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นอยู่ในช่วง 47.84-62.56 มิลลิกรัมต่อลิตร สอดคล้องกับการศึกษาของ Davies et al. (2005) ที่นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม ที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของน้ำเข้าอยู่ในช่วง 224-863 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีร้อยละ 64 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ การกรอง การตกตะกอน และการนำไปใช้โดยพืช เป็นต้น ดังนั้นภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะต้องมีอัตราที่เหมาะสมกับกลไกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกันของระบบแบบ FWS-SF (P)



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกันของระบบแบบ SF-FWS (P)

4.4.3 สรุปผลการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดี

จากผลการศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีของน้ำทิ้งสังเคราะห์ โรงงานฟอกย้อมสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. ระบบแบบ FWS-SF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีสูงกว่าระบบแบบ SF-FWS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกต้นอ้อ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่ปลูกต้นอ้ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2. จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดี ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 3 ค่า นั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF และ ระบบแบบ SF-FWS นั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีสูงสุดที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) ดังนั้นหากนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอสมาบำบัดโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต้องทำการเจือจางน้ำทิ้งให้มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์เท่ากับ 0.25 ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบเอเอส

3. การเพิ่มอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีของระบบลดลงประมาณร้อยละ 10

4. การเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 212 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 เดินระบบที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 60.00-100.00 และ 85.00-100.00 ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 เดินระบบที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-90.00 และ 80.00-95.00 ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 3 เดินระบบที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38 กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-90.00 และ 80.00-95.00 ซึ่งการเดินระบบต่อเนื่องส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ลดลงประมาณร้อยละ 10 เนื่องจากปัญหาการอุดตัน

4.5 การบำบัดสีย้อม

จากผลการตรวจวิเคราะห์น้ำเข้า-ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS ที่ความเข้มข้นของสีย้อมแตกต่างกัน 3 ค่า รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.5.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบจำลองแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS

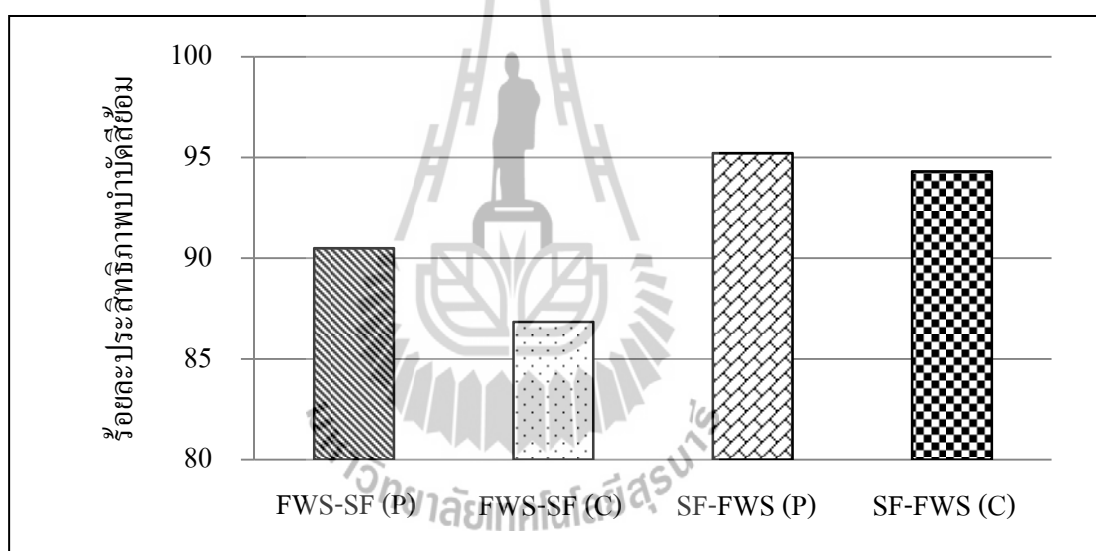
4.5.1.1 ที่ความเข้มข้นสียอม 56.48-63.65 Pt Co

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเดินระบบ ช่วง 0-40 วัน ของชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.19 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นสียอมอยู่ในช่วง 56.48-63.65 Pt Co หลังจากน้ำที่ผ่านระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าความเข้มข้นสียอมลดลงอยู่ในช่วง 2.72-17.05 Pt Co นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสียอมของระบบเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ SF-FWS (C) ระบบแบบ FWS-SF (P) และระบบแบบ FWS-SF (C) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 95.22 94.31 90.50 และ 86.84 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดสียอมของทุกระบบในช่วง 40 วันแรกของการเดินระบบ มีค่ามากกว่าร้อยละ 85 และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสียอมของทุกระบบ ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Independent Test พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสียอมของระบบแบบ SF-FWS (P) สูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ค ซึ่งการที่ระบบแบบ SF-FWS สามารถบำบัดสียอมได้ดีนั้น เนื่องจากเมื่อน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบ SF ซึ่งภายในคอลัมน์ดังกล่าวเกิดสภาวะมีออกซิเจนเล็กน้อยโดยมีค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 2.0-3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 45.6-66.7 มิลลิโวลต์ จึงมีโอกาสเกิดสภาวะการย่อยสลายทั้งแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน ในการบำบัดสียอมของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะสามารถทำลายพันธะเอโซของสี ทำให้ความเข้มข้นของสียอมลดลง และได้สารที่มีโมเลกุลเล็กลง คือ สารอะโรมาติกเอมีน ซึ่งมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของจุลินทรีย์ลดลง นอกจากนี้ภายในคอลัมน์แบบ SF ประกอบด้วยชั้นของตัวกลาง ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการกรอง การตกตะกอน และการดูดซับ ในการศึกษาครั้งนี้ตัวกลางที่ใช้ คือ หินดินดาน จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.2 (บทที่3) พบว่ามีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นสารโลหะออกไซด์ ได้แก่ SiO_2 Al_2O_3 CaO และ Fe_2O_3 เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับสียอมโดยโลหะออกไซด์ที่ผิวหน้าของหินดินดานเมื่ออยู่ในสารละลายสียอม ในสภาวะเป็นกรดที่ผิวหน้าของสารดูดซับจะถูกเติมโปรตอนด้วยไฮโดรเจนไอออนทำให้ผิวหน้าของหินดินดานแสดงประจุบวกซึ่งทำให้สามารถที่จะดูดซับโมเลกุลของสียอมซึ่งมีประจุลบได้ (Ozacar and Sengil, 2003) จากการศึกษาของ Al-Qodah (2000) ได้นำแก้วของหินดินดานมาใช้เป็นตัวดูดซับสียอมรีแอกทีฟ พบว่าสามารถดูดซับสียอมได้ดี และจากการศึกษาของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) พบว่าหินดินดานสามารถดูดซับสียอมรีแอกทีฟซึ่งเป็นสียอมในกลุ่มเอโซได้สูง โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 0.4479-1.1409 มิลลิกรัมต่อกรัม สอดคล้องกับผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสียอมของคอลัมน์

แบบ SF (ตารางที่ 4.12) สามารถกำจัดสีข้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 47.54-90.50 ซึ่งสูงกว่าคอลัมน์แบบ FWS ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 28.41-70.62 โดยเฉพาะในระบบที่มีคอลัมน์แบบ SF เป็นคอลัมน์แรก จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมสูง และสำหรับกลไกการกำจัดสีข้อมของระบบแบบ FWS-SF เมื่อน้ำทิ้งไหลเข้าไปในคอลัมน์แบบ FWS ซึ่งมีออกซิเจนมากกว่าคอลัมน์แบบ SF ดังนั้นจึงเกิดการบำบัดสีข้อมโดยกระบวนการแบบใช้ออกซิเจนซึ่งไม่สามารถสลายโครงสร้างสีข้อมเอโซได้ จึงไม่สามารถบำบัดสีข้อมได้อย่างรวดเร็ว ต้องมีระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้น จึงจะสามารถย่อยสลายได้ (Chung, 2000) และนอกจากนี้ในคอลัมน์แบบ FWS มีความสูงของชั้นตัวกลางหินดินดานน้อยกว่าคอลัมน์แบบ SF ดังนั้นกลไกการกำจัดด้วยกระบวนการดูดซับสีข้อมจึงเกิดขึ้นได้น้อยกว่าในคอลัมน์แบบ SF ความเข้มข้นของสีข้อมจึงถูกกำจัดไปได้ต่ำกว่า จากผลการศึกษาเมื่อใช้คอลัมน์แบบ SF เป็นคอลัมน์เริ่มต้นของระบบพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมร้อยละ 89.51-90.50 (ตารางที่ 4.12) ขณะที่ถ้าใช้คอลัมน์แบบ FWS เป็นคอลัมน์เริ่มต้นของระบบ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 68.62-70.62 ดังนั้นร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS จึงสูงกว่าระบบแบบ FWS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bulc and Ojstršek (2008) ที่นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม พบว่ามีประสิทธิภาพบำบัดสีข้อมมากกว่าร้อยละ 70 นอกจากนี้จากผลการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมระหว่างระบบแบบ SF-FWS (P) ซึ่งมีต้นอ้อ สูงกว่าระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีต้นอ้อปลูกอยู่ และเมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Independent Test พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมของระบบแบบ SF-FWS (P) สูงกว่าระบบแบบ SF-FWS (C) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) สอดคล้องกับการศึกษาของ Davies et al. (2009) ที่พบว่ากลไกของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัดสีข้อมเอโซเอซิด เนื่องจากต้นอ้อมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระจึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมได้ และต้นอ้อมีเอนไซม์ peroxidase (POD) ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสารอะโรมาติกเอมีน ฟีนอล และซัลโฟเนส ที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของสีข้อมเอโซ (Azevedo et al., 2003; Veitch, 2004) จึงทำให้สามารถกำจัดสีข้อมได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมร้อยละ 68

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้นของสีย้อม 56.48-63.65 Pt Co
ระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	N	ความเข้มข้นสีย้อม ของน้ำเข้า (Pt Co) min-max	ความเข้มข้นสีย้อม ของน้ำออก (Pt Co) min-max	mean \pm S.D.
ระบบแบบ FWS-SF (P)	30	56.48-63.65	2.72-9.88	90.50 \pm 4.43
ระบบแบบ FWS-SF (C)	30		2.72-17.05	86.84 \pm 7.47
ระบบแบบ SF-FWS (P)	27		2.72-5.11	95.22 \pm 0.89
ระบบแบบ SF-FWS (C)	30		2.72-6.30	94.31 \pm 2.21



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ภายในระยะเวลา
เดินระบบ 40 วัน ที่ความเข้มข้นสีย้อม 56.48-63.65 Pt Co

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดสีเขียวระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่ความเข้มข้นสีเขียว 56.48-63.65 PtCo

	ระบบแบบ FWS-SF (P)			ระบบแบบ SF-FWS (P)		
	FWS	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)
น้ำเข้า (PtCo)	56.48-63.65	0.013	11.08-24.22	0.003	56.48-63.65	2.72-8.69
น้ำออก (PtCo)	11.08-24.22		2.72-9.88		2.72-8.69	2.72-5.11
	ระบบแบบ FWS-SF (C)			ระบบแบบ SF-FWS (C)		
	FWS	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)
น้ำเข้า (PtCo)	56.48-63.65	0.012	13.47-24.22	0.003	56.48-63.65	2.72-9.88
น้ำออก (PtCo)	13.47-24.22		2.72-17.05		2.72-9.88	2.72-6.30

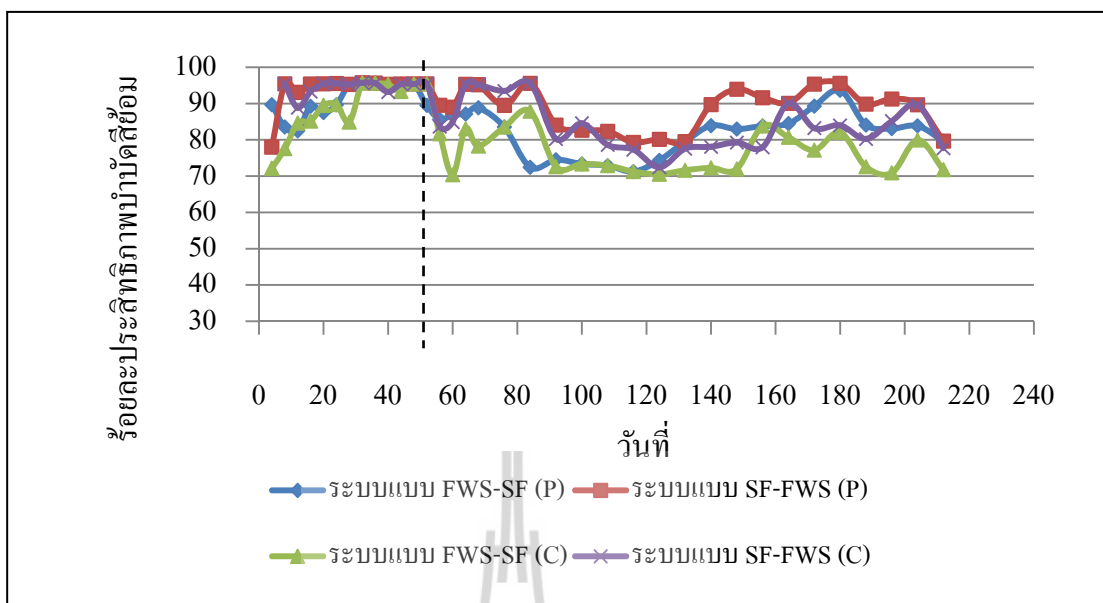
จากข้อมูลตารางที่ 4.12 แสดงอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็น อัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดสีของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ SF-FWS (C)

จากผลการทำสมดุลมวลของสีของสีที่แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.13 โดยน้ำเข้าระบบมีสีเข้มข้นเฉลี่ย 60.065 PtCo (มีความเข้มข้น 2.763 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.018 กรัมต่อวัน การคำนวณความเข้มข้นของสีแสดงในภาคผนวก ง) จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน และจุลินทรีย์ 0.015 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 93.75 รองลงมา ได้แก่ พืชซึ่งมีอัตราการกำจัดสี 0.001 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 6.25 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดสีเกิดจากหินดินดาน และจุลินทรีย์ 0.016 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 94.12 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.001 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 5.88 จากการทำสมดุลมวลทำให้ทราบว่า การกำจัดสีส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน ค่าความสามารถในการดูดซับสีของหินดินดานในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 40 วัน มีค่า 0.0019 มิลลิกรัมต่อกรัม รายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการศึกษานของ สายรุ้ง นพขุนทด (2554) ซึ่งหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีอยู่ในช่วง 0.0110-0.0252 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นจะเห็นว่าหินดินดานในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังคงมีความสามารถในการดูดซับสีได้อีก

ตารางที่ 4.13 สมดุลมวลของสีย้อมที่ความเข้มข้นสีย้อม 56.48-63.65 Pt Co

สีย้อมเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				สีย้อมออกจาก ระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.018	0.001	6.25	0.015	93.75	0.002
สีย้อมเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				สีย้อมออกจาก ระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.018	0.001	5.88	0.016	94.12	0.001

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 40 วันแล้วนั้น ในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมให้อยู่ในช่วง 118.61-130.55 Pt Co ส่วนชุดการทดลองที่ 1 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นของสีย้อมเท่าเดิม (56.48-63.65 Pt Co) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษาวิจัย เป็นเวลาทั้งหมด 212 วัน เพื่อศึกษาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง และเมื่อนำข้อมูลของชุดการทดลองที่ 1 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าในช่วง 48 วันแรก ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของชุดการทดลองอยู่ในช่วงร้อยละ 80.00-95.00 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-95.00 จนสิ้นสุดการศึกษา



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 56.48–63.65 Pt Co ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน

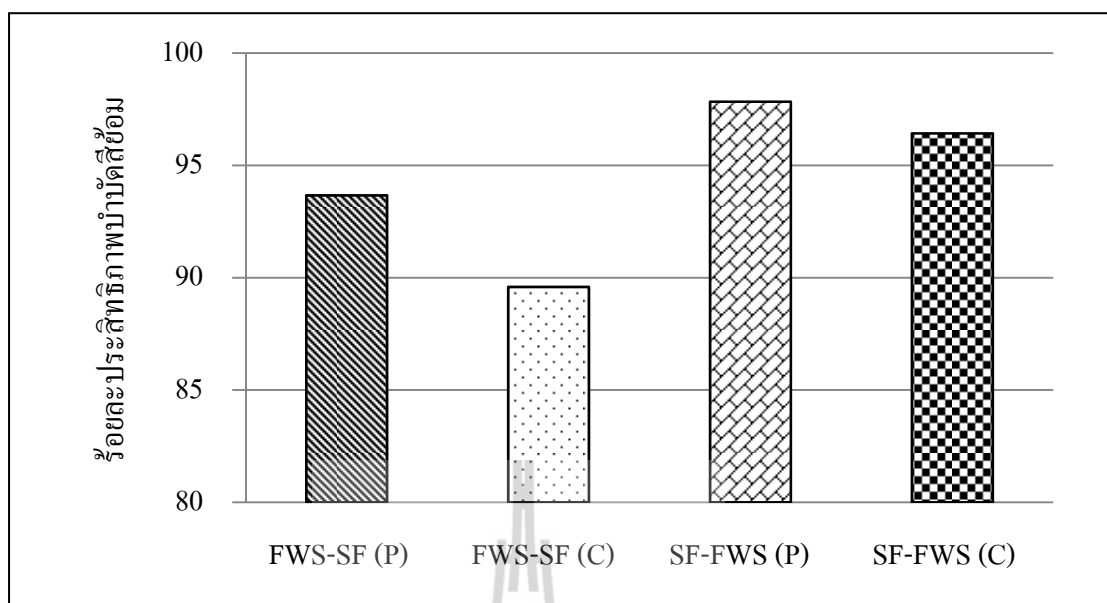
4.5.1.2 ที่ความเข้มข้นสีย้อม 118.61–130.55 Pt Co

สำหรับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยความเข้มข้นสีย้อม 56.48–63.65 Pt Co เป็นระยะเวลา 40 วันแล้ว ทำการเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมเป็น 118.61–130.55 Pt Co โดยทำการเดินระบบต่อเนื่องอีกเป็นระยะเวลา 72 วัน ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.21 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบแบบ SF-FWS (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (C) ระบบแบบ FWS-SF (P) และระบบแบบ FWS-SF (C) ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมร้อยละ 97.84 96.43 93.67 และ 89.59 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณร้อยละ 3 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของทุกระบบยังคงมีค่ามากกว่าร้อยละ 85 โดยระบบแบบ SF-FWS (P) ก็ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) และจากผลการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของแต่ละคอลัมน์ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ยังคงพบว่าคอลัมน์แบบ SF ยังคงมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงกว่าคอลัมน์แบบ FWS โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมมากกว่าร้อยละ 80 จากการศึกษาของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟ 5 ค่า จาก

ความเข้มข้น 100 Pt Co ถึง 700 Pt Co พบว่าหินดินดานมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มจาก 0.0546 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 0.2234 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความต้านทานการดูดซับมีค่าลดลง ส่งผลให้มีแรงขับเคลื่อนมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของสีย้อมเกิดการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น (Al-Qodah, 2000; Aydin and Baysal, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Al-Qodah (2000) ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวเข้าสู่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.0×10^{-11} เป็น 12.7×10^{-11} ตารางเมตรต่อนาทีก่อน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 380 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมกระจายตัวเข้าสู่ภายในรูพรุนของสารดูดซับได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมยังคงเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในคอลัมน์แบบ SF ทั้งในชุดการทดลองและชุดควบคุม

ตารางที่ 4.14 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้นของสีย้อม 118.61-130.55 Pt Co
ระยะเวลาการเดินระบบ 72 วัน

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	N	ความเข้มข้นสีย้อม ของน้ำเข้า (Pt Co) min-max	ความเข้มข้นสีย้อม ของน้ำออก (Pt Co) min-max	mean \pm S.D.
ระบบแบบ FWS-SF (P)	35	118.61-130.55	2.72-13.47	93.67 \pm 2.44
ระบบแบบ FWS-SF (C)	35		6.30-20.64	89.59 \pm 2.43
ระบบแบบ SF-FWS (P)	32		2.72-6.30	97.84 \pm 0.15
ระบบแบบ SF-FWS (C)	36		2.72-9.88	96.43 \pm 1.76



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ภายในระยะเวลาเดินระบบ 72 วัน ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 118.61-130.55 Pt Co

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 72 วันแล้วนั้น ชุดการทดลองที่ 3 ทำการเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมเป็น 239.28-258.39 Pt Co ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นสีย้อมเท่าเดิม (118.61-130.55 Pt Co) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาวิจัย ตั้งแต่วันที่ 40 จนถึงวันที่ 212 รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน จากระยะเวลาเดินระบบทั้งหมด 212 วัน นำข้อมูลผลการศึกษาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมกับเวลา ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของชุดการทดลองที่ 2 อยู่ในช่วงร้อยละ 75.00-98.00 จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพการบำบัดสีเขียวระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่ความเข้มข้นสีเขียว 118.61-130.55 Pt Co

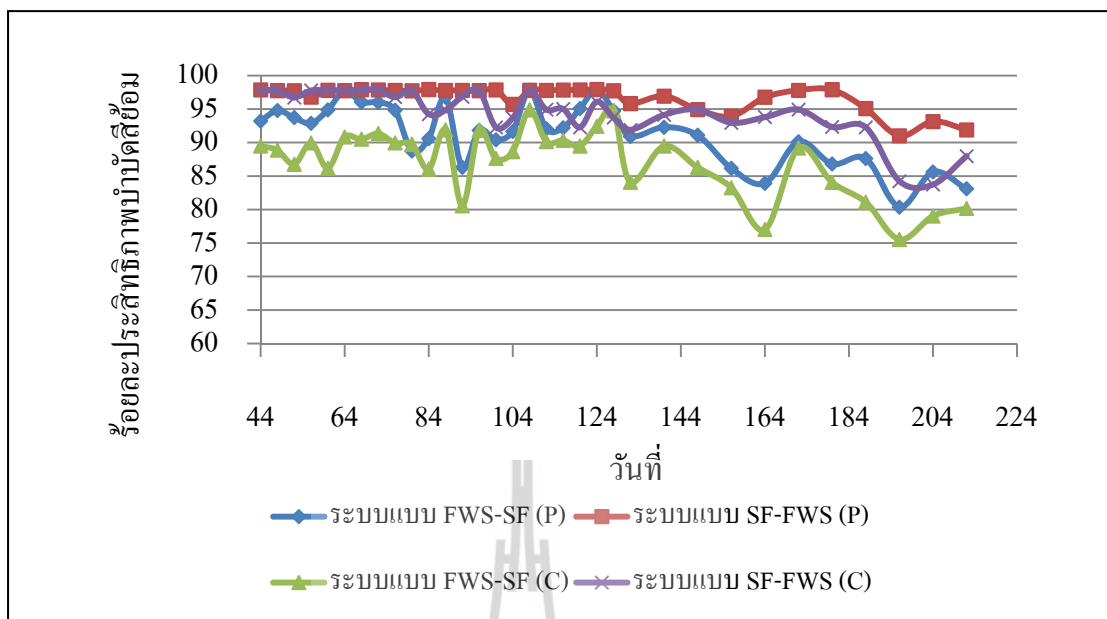
	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	FWS	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	FWS	อัตราการกำจัด (g/day)
น้ำเข้า (Pt Co)	118.61-130.55	0.021	46.92-64.84	0.014	118.61-130.55	0.034	2.72-18.25	0.002
น้ำออก (Pt Co)	46.92-64.84		2.72-13.47		2.72-18.25		2.72-6.30	
	ระบบแบบ FWS-SF (C)				ระบบแบบ SF-FWS (C)			
	FWS	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	FWS	อัตราการกำจัด (g/day)
น้ำเข้า (Pt Co)	118.61-130.55	0.017	60.06-79.18	0.016	118.61-130.55	0.033	2.72-24.22	0.002
น้ำออก (Pt Co)	60.06-79.18		6.30-20.64		2.72-24.22		2.72-9.88	

จากข้อมูลตารางที่ 4.15 แสดงอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดสีของโดย หินดินดาน และจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดสีของโดยพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดสีของโดยพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดสีของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดสีของโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

จากผลการทำสมดุลมวลของสีของดั่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.16 โดยน้ำเข้าระบบมีสีของเฉลี่ย 124.580 PtCo (มีความเข้มข้น 5.731 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.037 กรัมต่อวัน) จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดสีของโดยระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.033 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 94.29 รองลงมา ได้แก่ พืช ซึ่งมีอัตราการกำจัดสีของ 0.002 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 5.71 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดสีของเกิดจากหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.035 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 97.22 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.001 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 2.78 จากการทำสมดุลมวลทำให้ทราบว่า การกำจัดสีของส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน ค่าความสามารถในการดูดซับสีของของหินดินดานในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 72 วัน มีค่า 0.0042 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการศึกษาของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) ซึ่ง หินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีของอยู่ในช่วง 0.0110-0.0252 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหินดินดานยังคงมีความสามารถในการดูดซับสีของได้อีก

ตารางที่ 4.16 สมดุลมวลของสีของที่ความเข้มข้นสีของ 118.61-130.55 Pt Co

สีของเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				สีของออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.037	0.002	5.71	0.033	94.29	0.002
สีของเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				สีของออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.037	0.001	2.78	0.035	97.22	0.001



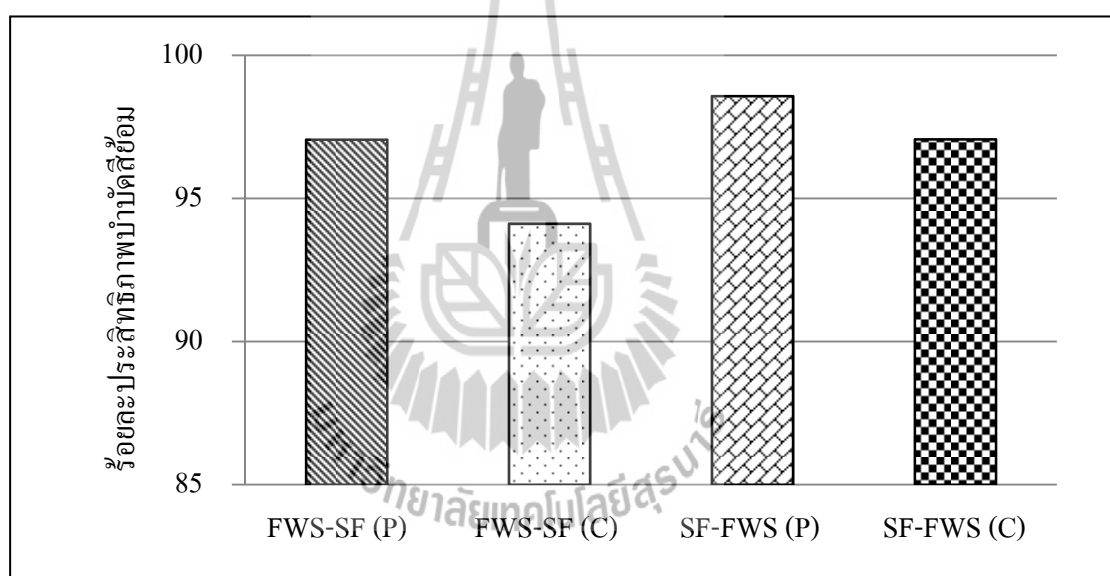
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการงอกของชุดการทดลองที่ 2 ที่ความเข้มข้น
 สีย้อม 118.61-130.55 Pt Co ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน

4.5.1.3 ที่ความเข้มข้นสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co

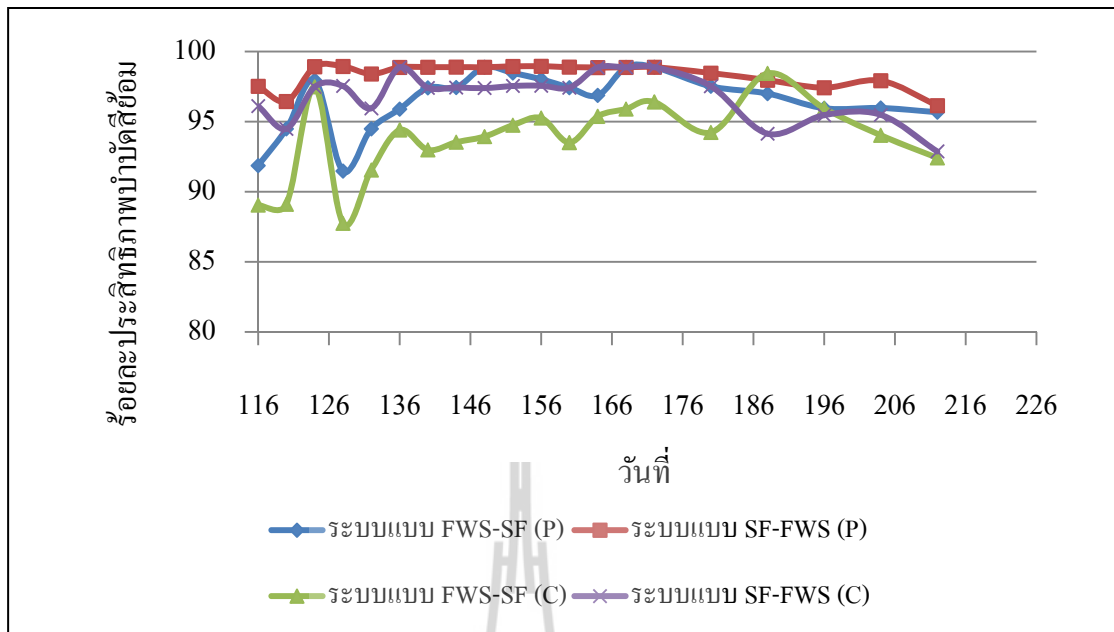
สำหรับชุดการทดลองที่ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยความเข้มข้นสีย้อม 118.61-130.55 Pt Co เป็นระยะเวลา 72 วันแล้ว ทำการเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมเป็น 239.28-258.39 Pt Co เป็นระยะเวลา 100 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.23 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการงอกยังคงมีแนวโน้มเหมือนเดิม โดยระบบแบบ SF-FWS (P) มีค่าสูงสุด รองลงมา ได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (C) ระบบแบบ FWS-SF (P) และระบบแบบ FWS-SF (C) ตามลำดับ มีค่าประสิทธิภาพการงอกร้อยละ 98.58 97.07 97.06 และ 94.12 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการงอกของทุกระบบเพิ่มขึ้นร้อยละ 1-5 โดยมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 และระบบแบบ SF-FWS (P) ยังคงให้ประสิทธิภาพในการงอกสูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) และจากตารางที่ 4.18 พบว่าคอลัมน์แบบ SF ก็ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมากกว่าคอลัมน์แบบ FWS

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดสีย้อม ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co
ระยะเวลาการเดินระบบ 100 วัน

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	N	ความเข้มข้นสีย้อม ของน้ำเข้า (Pt Co) min-max	ความเข้มข้นสีย้อม ของน้ำออก (Pt Co) min-max	mean \pm S.D.
ระบบแบบ FWS-SF (P)	18	239.28 – 258.39	2.72-13.47	97.06 \pm 1.40
ระบบแบบ FWS-SF (C)	19		6.30-27.81	94.12 \pm 2.44
ระบบแบบ SF-FWS (P)	18		2.72-9.88	98.58 \pm 0.52
ระบบแบบ SF-FWS (C)	19		2.72-14.66	97.07 \pm 1.44



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ภายในระยะเวลาเดินระบบ
100 วัน ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของชุดการทดลองที่ 3 ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน



ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดสีเขียวระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่ความเข้มข้นสีเขียว 239.28-258.39 Pt Co

	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	อัตราการกำจัด (g/day)	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	อัตราการกำจัด (g/day)
น้ำเข้า (Pt Co)	239.28-258.39	74.40-128.16	74.40-128.16	0.028	239.28-258.39	239.28-258.39	0.071	2.72-13.47
น้ำออก (Pt Co)	74.40-128.16	2.72-13.47	2.72-13.47		2.72-13.47	2.72-13.47		2.72-9.88
	ระบบแบบ FWS-SF (C)				ระบบแบบ SF-FWS (C)			
	อัตราการกำจัด (g/day)	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	อัตราการกำจัด (g/day)	SF	อัตราการกำจัด (g/day)	อัตราการกำจัด (g/day)
น้ำเข้า (Pt Co)	239.28-258.39	92.32-146.09	92.32-146.09	0.030	239.28-258.39	239.28-258.39	0.069	2.72-27.81
น้ำออก (Pt Co)	92.32-146.09	6.30-27.81	6.30-27.81		6.30-27.81	6.30-27.81		2.72-14.66

จากข้อมูลตารางที่ 4.18 แสดงอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดสีของดินดินดานและจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดสีของพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดสีของพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดสีของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดสีโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

จากผลการทำสมดุลมวลของสีของดินแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.19 โดยน้ำเข้าระบบมีสีของดินเฉลี่ย 248.835 PtCo (มีความเข้มข้น 11.446 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.073 กรัมต่อวัน) จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดสีของระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของดินดินดานและจุลินทรีย์ 0.068 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 95.77 รองลงมา ได้แก่ พืช ซึ่งมีอัตราการกำจัดสี 0.003 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 4.23 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดสีของดินดินดานและจุลินทรีย์ 0.071 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 98.61 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.001 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 1.39 จากการทำสมดุลมวลทำให้ทราบว่า การกำจัดสีส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของดินดินดาน ค่าความสามารถในการดูดซับสีของดินดินดานในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 100 วัน มีค่า 0.0084 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการศึกษาของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) ซึ่งดินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีอยู่ในช่วง 0.0110-0.0252 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าดินดินดานยังคงมีความสามารถในการดูดซับสีได้อีก

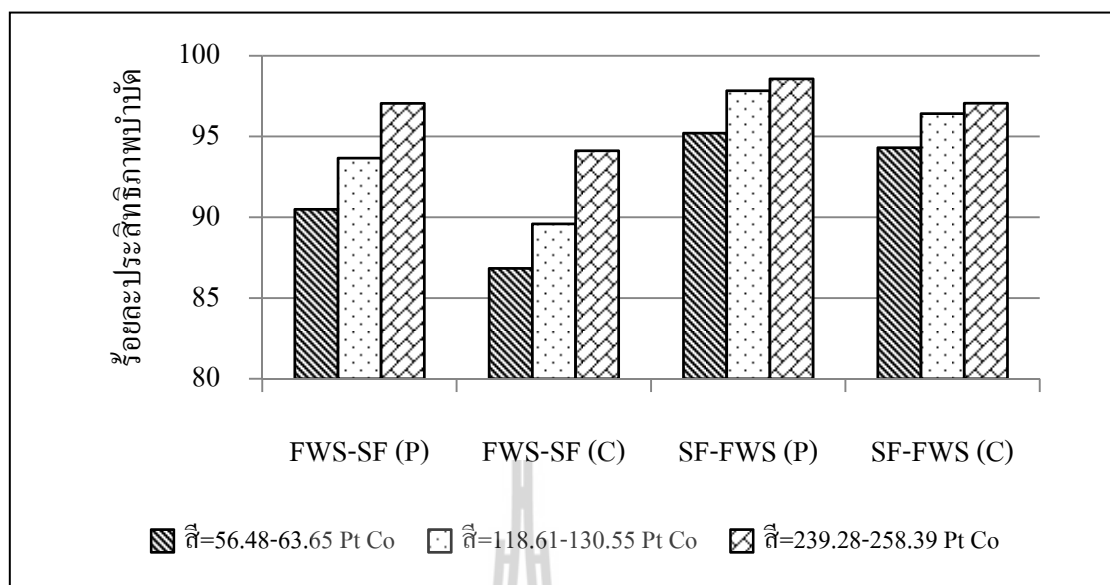
ตารางที่ 4.19 สมดุลมวลของสีของดินที่ความเข้มข้นสี 239.28-258.39 Pt Co

สีข้อมเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				สีข้อมออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ ดินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.073	0.003	4.23	0.068	95.77	0.002
สีข้อมเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				สีข้อมออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ ดินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.073	0.001	1.39	0.071	98.61	0.001

4.5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ที่ความเข้มข้นสีย้อมแตกต่างกันของแต่ละระบบ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้นแตกต่างกันทั้ง 3 ค่า นำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA ดังแสดงภาคผนวก ก พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของระบบทั้ง 4 แบบ ที่ระดับความเข้มข้นสีย้อมแตกต่างกัน 3 ค่า นั้น พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยทุกระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงที่สุด ที่ระดับความเข้มข้นสีย้อมเท่ากับ 239.28-258.39 Pt Co ดังแสดงในรูปที่ 4.25 สอดคล้องกับงานวิจัยของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) นำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสมาบำบัด พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟของคอลัมน์หินดินดานมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งน้ำทิ้งดังกล่าวมีค่าความเข้มข้นสีย้อมประมาณ 420 Pt Co ซึ่งใกล้เคียงกับความเข้มข้นสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นสีย้อมเท่ากับ 239.28-258.39 Pt Co มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงที่สุด ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้แม้ว่าสามารถนำน้ำทิ้งจากระบบเอเอสมาผ่านระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงที่สุด และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอายุการใช้งานของระบบ เพื่อนำไปพิจารณา ร่วมกับประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจเกิดปัญหาการอุดตัน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง จากการศึกษาของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) ทำการศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์ ทำการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีจากน้ำเสีย 3 จุด ได้แก่ น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ และน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ พบว่าระบบในการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมีอายุการใช้งานของระบบนานกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพประมาณ 7 และ 4 เท่า ตามลำดับ และสรุปได้ว่าควรนำกระบวนการดูดซับด้วยหินดินดานไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม ที่ความเข้มข้นสีข้อมแตกต่างกัน
ของระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS

4.5.3 สรุปผลการบำบัดสีข้อม

จากผลการศึกษาการบำบัดสีข้อมของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกข้อมสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ระบบแบบ SF-FWS มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมสูงกว่าระบบแบบ FWS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกต้นอ้อ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่ปลูกต้นอ้ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
2. จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม ที่ความเข้มข้นของสีข้อมแตกต่างกัน 3 ค่า นั้น พบว่าระบบแบบ SF-FWS และ ระบบแบบ FWS-SF นั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมสูงสุดที่ความเข้มข้นสีข้อมเท่ากับ 239.28-258.39 Pt Co ซึ่งเท่ากับความเข้มข้นของสีข้อมในน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอส ดังนั้นในการบำบัดสีข้อมให้มีประสิทธิภาพสามารถนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอสเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้โดยตรง
3. การเพิ่มความเข้มข้นของสีข้อมส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมของระบบเพิ่มขึ้น
4. การเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 212 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 เติมน้ำที่ความเข้มข้นสีข้อม 56.48-63.65 Pt Co มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-95.00 สำหรับชุดการทดลองที่ 2 เติมน้ำที่ความเข้มข้นสีข้อม 118.61-130.55 Pt Co เป็น

ระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 75.00-98.00 ส่วนชุดการทดลองที่ 3 เติมน้ำที่ความเข้มข้นสีข้อม 239.28-258.39 Pt Co เป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 90.00-98.00 ซึ่งการเดินระบบต่อเนื่อง 212 วัน ไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมลดลง

4.6 การบำบัดฟอสฟอรัส

จากผลการตรวจวิเคราะห์น้ำเข้า-ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS ที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัสแตกต่างกัน 3 ค่า รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.6.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS

4.6.1.1 ที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

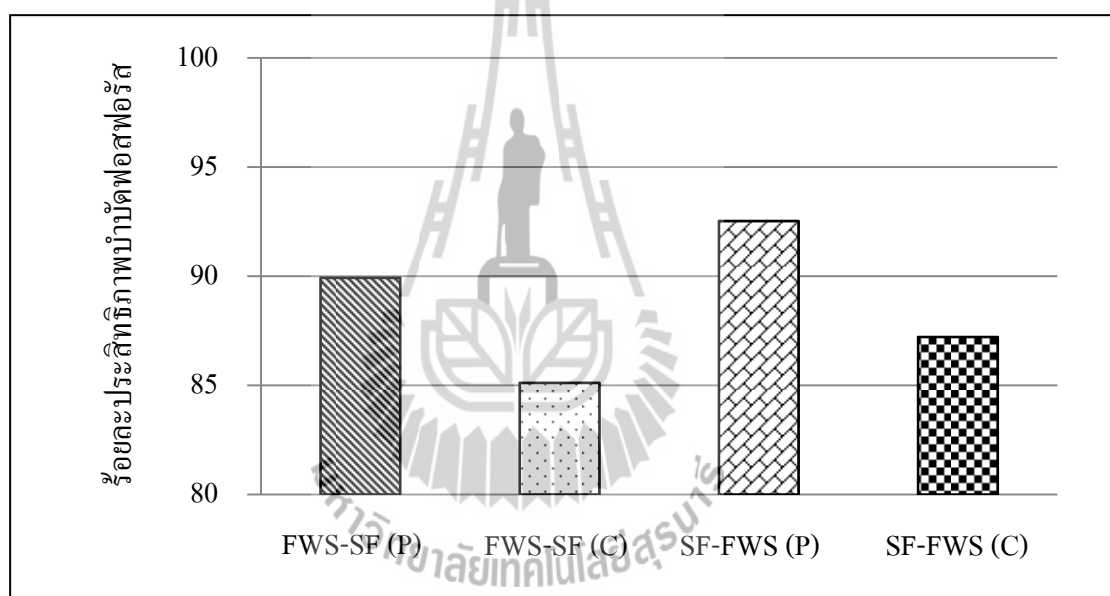
ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเดินระบบ ช่วง 0-40 วัน ของชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.20 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 8.88-10.52 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากน้ำที่ผ่านระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสของน้ำออก อยู่ในช่วง 0.86-1.73 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบพบว่ามีความเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (P) ระบบแบบ SF-FWS (C) และระบบแบบ FWS-SF (C) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 92.53 89.93 87.22 และ 85.12 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของทุกระบบ ภายในช่วง 40 วันแรก มีค่ามากกว่าร้อยละ 85 (รูปที่ 4.26) และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของทุกระบบ ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Independent Test พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ SF-FWS (P) สูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ค นั้น เนื่องจากเมื่อน้ำที่ไหลเข้าไปในคอลัมน์แบบ SF ซึ่งภายในคอลัมน์มีปริมาตรของชั้นตัวกลางมากกว่าคอลัมน์แบบ FWS ดังนั้นฟอสฟอรัสถูกกำจัดไปโดยกลไกการตกตะกอน การดูดซับ และการกรองที่ตัวกลาง จะเห็นได้จากค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.053 กรัมต่อวัน (ตารางที่ 4.21) จึงเหลือปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำที่เพียงเล็กน้อย ก่อนจะถูกส่งต่อไปยังคอลัมน์แบบ FWS เพื่อช่วยกำจัดฟอสฟอรัสที่เหลือ และพบว่ามีความอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.004 กรัมต่อวัน และสำหรับระบบแบบ FWS-SF เมื่อน้ำที่ไหลเข้าไปในคอลัมน์แบบ FWS ซึ่งมีปริมาตรของชั้นตัวกลางน้อยกว่าคอลัมน์แบบ SF ซึ่งจะเห็นได้จาก

ค่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.047 กรัมต่อวัน ทำให้ฟอสฟอรัสถูกกำจัดไปได้น้อยกว่า คอลัมน์แบบ SF ของระบบแบบ SF-FWS สอดคล้องกับผลการศึกษานี้ของ Drizo et al. (1997) พบว่า กลไกหลักของการกำจัดฟอสฟอรัส ได้แก่ การตกตะกอน การดูดซับ และการกรองที่ตัวกลาง และจากการศึกษาสมดุลมวลสารในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว ตัวกลางมีตัวกลางเป็นหินดินดานของปีดิพร มโนคูน (2554) พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยกลไกของตัวกลางหินดินดานอยู่ในช่วงร้อยละ 68.41-99.71 ยังมีการสะสม ในพีชอ้อร้อยละ 4.58-20.27 อีกด้วย กลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ตัวกลาง โดยการตรึงหรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การดูดซับผิว และการ ตกตะกอนกับเหล็กออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์บนผิวของตัวกลาง หินดินดาน (Drizo et al., 1999; Bubba, Arias, and Brix, 2003; Forbes et al., 2005) ดังนั้นกลไก ในการกำจัดฟอสฟอรัสของการศึกษานี้ มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการดูดซับระหว่าง องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดานกับฟอสฟอรัส นอกจากนี้ยังพบว่าระบบที่ปลูกต้นอ้อมี ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่ได้ปลูกต้นอ้อประมาณร้อยละ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดจาก หินดินดานจะตรึงฟอสฟอรัสไว้ และพีชจะนำฟอสฟอรัสไปใช้ต่อไป ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหาร หลักที่จำเป็นต่อพีช โดยพีชสามารถนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อและเจริญเติบโต

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 40 วัน แล้วนั้นในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเพิ่มอัตราการระบรทุกฟอสฟอรัสให้อยู่ในช่วง 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์. วัน) ส่วนชุดการทดลองที่ 1 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัสเท่าเดิม (18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาการศึกษาวิจัย 212 วัน เพื่อศึกษาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส สำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง และเมื่อนำข้อมูลของชุดการทดลองที่ 1 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด ฟอสฟอรัสกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ในช่วง วันที่ 0-40 อยู่ในช่วงร้อยละ 85.12-92.53 และหลังจากเดินระบบต่อไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 75.00-90.00 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน มีประสิทธิภาพลดลง ประมาณร้อยละ 10 สอดคล้องกับการศึกษาของ Richardson and Marshall (1986) ที่พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จะลดลงเมื่อเดิน ระบบเป็นระยะเวลานาน

ตารางที่ 4.20 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกเตอร์.วัน) ภายในระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน

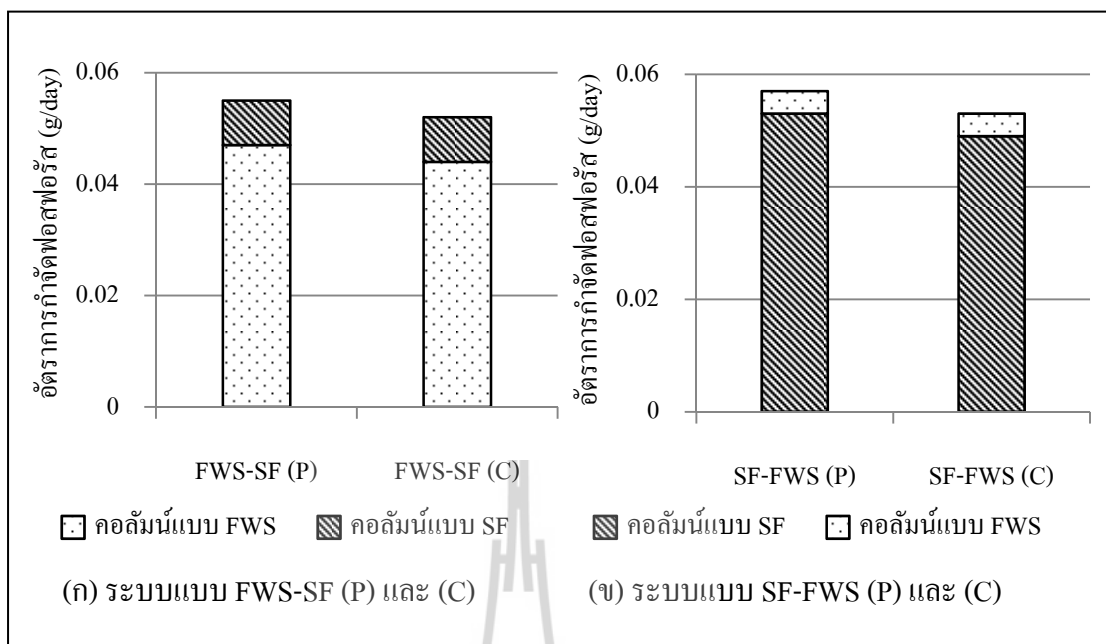
ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	N	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัสของน้ำ เข้า (mg/l)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัสของน้ำ ออก (mg/l)	mean \pm S.D.
ระบบแบบ FWS-SF (P)	30	8.88-10.52	0.86-1.09	89.93 \pm 0.71
ระบบแบบ FWS-SF (C)	27		1.32-1.73	85.12 \pm 0.59
ระบบแบบ SF-FWS (P)	30		0.59-0.88	92.53 \pm 0.75
ระบบแบบ SF-FWS (C)	30		0.95-1.43	87.22 \pm 1.20



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ภายในระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกเตอร์.วัน)

ตารางที่ 4.21 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการระบบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)			ระบบแบบ SF-FWS (P)		
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ฟอสฟอรัส	น้ำเข้า (mg/l)	8.88-10.52	2.04-2.45	8.88-10.52	1.09-1.77	1.09-1.77
	น้ำออก (mg/l)	2.04-2.45	0.86-1.09	1.09-1.77	0.59-0.88	0.004
		0.047	0.008			
ระบบแบบ FWS-SF (C)						
ระบบแบบ SF-FWS (C)						
พารามิเตอร์	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
	น้ำเข้า (mg/l)	8.88-10.52	2.39-2.96	8.88-10.52	1.50-2.04	1.50-2.04
ฟอสฟอรัส	น้ำออก (mg/l)	2.39-2.96	1.32-1.73	1.50-2.04	0.95-1.43	0.004
		0.044	0.008			



รูปที่ 4.27 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตรากระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

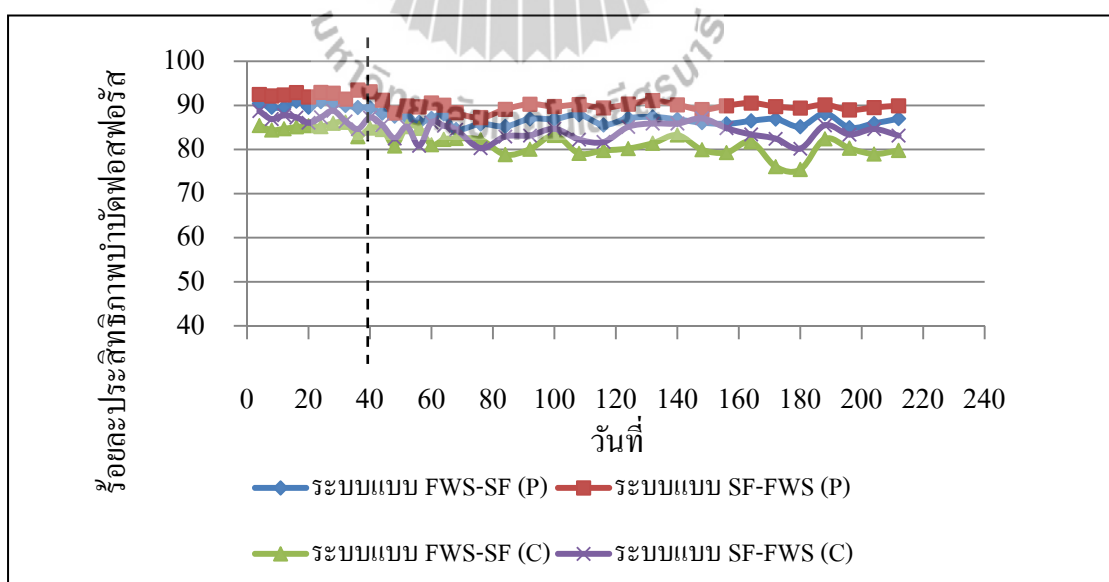
จากข้อมูลตารางที่ 4.21 แสดงอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดานและจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

จากผลการทำสมดุลมวลของฟอสฟอรัสดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.22 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเฉลี่ย 9.552 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.061 กรัมต่อวัน จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.052 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 94.55 รองลงมา ได้แก่ พืชซึ่งมีอัตราการกำจัดฟอสฟอรัส 0.003 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 5.45 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดจากหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.053 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 92.98 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.004 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 7.02 จากการทำ

สมศุลมวลทำให้ทราบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อเดินระบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 40 วัน มีค่า 0.0067 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการศึกษาของ ปีติพร มโนคูน (2554) ซึ่งหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.128 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น จะเห็นได้ว่าหินดินดานยังคงมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้อีก

ตารางที่ 4.22 สมศุลมวลของฟอสฟอรัสที่อัตราการระบบรทุกฟอสฟอรัส 18.07- 21.41 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

ฟอสฟอรัส เข้าระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ฟอสฟอรัส ออกจาก ระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.061	0.003	5.45	0.052	94.55	0.006
ฟอสฟอรัส เข้าระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				ฟอสฟอรัส ออกจาก ระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.061	0.004	7.02	0.053	92.98	0.004



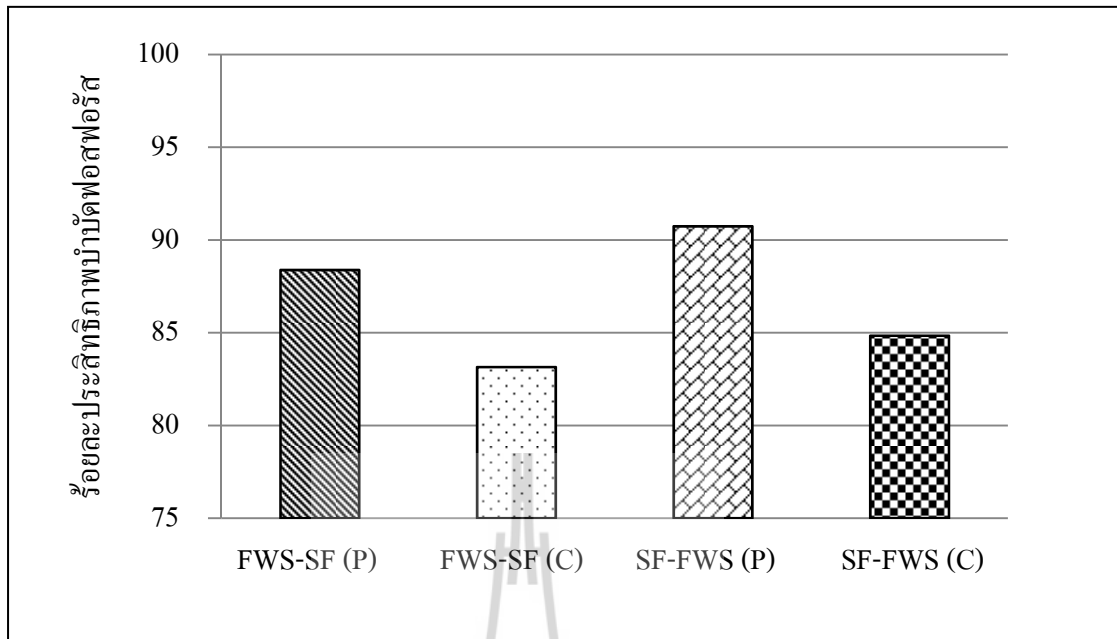
รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการระบบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน

4.6.1.2 ที่อัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

สำหรับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยอัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 40 วันแล้ว ทำการเพิ่มอัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัสเป็น 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) โดยทำการเดินระบบต่อมาอีกเป็นระยะเวลา 72 วัน ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.29 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ SF-FWS (P) มีค่าสูงสุด รองลงมา ได้แก่ ระบบแบบ FWS-SF (P) ระบบแบบ SF-FWS (C) และระบบแบบ FWS-SF (C) โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสร้อยละ 90.74 88.38 84.84 และ 83.15 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัสเข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบลดลงประมาณร้อยละ 3 อย่างไรก็ตามระบบแบบ SF-FWS (P) ยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส สูงกว่าระบบอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสที่อัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) จากตารางที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าคอลัมน์แบบ SF มีอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.098 กรัมต่อวัน ซึ่งมากกว่าคอลัมน์แบบ FWS ที่มีอัตราการกำจัดเท่ากับ 0.074 กรัมต่อวัน และมีค่ามากกว่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา คาวไชสง (2550) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของฟอสฟอรัสตั้งแต่ 5-30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของฟอสฟอรัสมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานเพิ่มขึ้นจาก 0.07 มิลลิกรัมต่อกรัมเป็น 1.08 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 4.23 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการบำบัดทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 72 วัน

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	N	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสของน้ำเข้า (mg/l)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสของน้ำออก (mg/l)	mean \pm S.D.
ระบบแบบ FWS-SF (P)	36	19.14-20.44	2.02-2.50	88.38 \pm 0.71
ระบบแบบ FWS-SF (C)	36		2.66-3.91	83.15 \pm 1.93
ระบบแบบ SF-FWS (P)	34		1.63-2.04	90.74 \pm 0.65
ระบบแบบ SF-FWS (C)	36		2.73-3.32	84.84 \pm 0.89

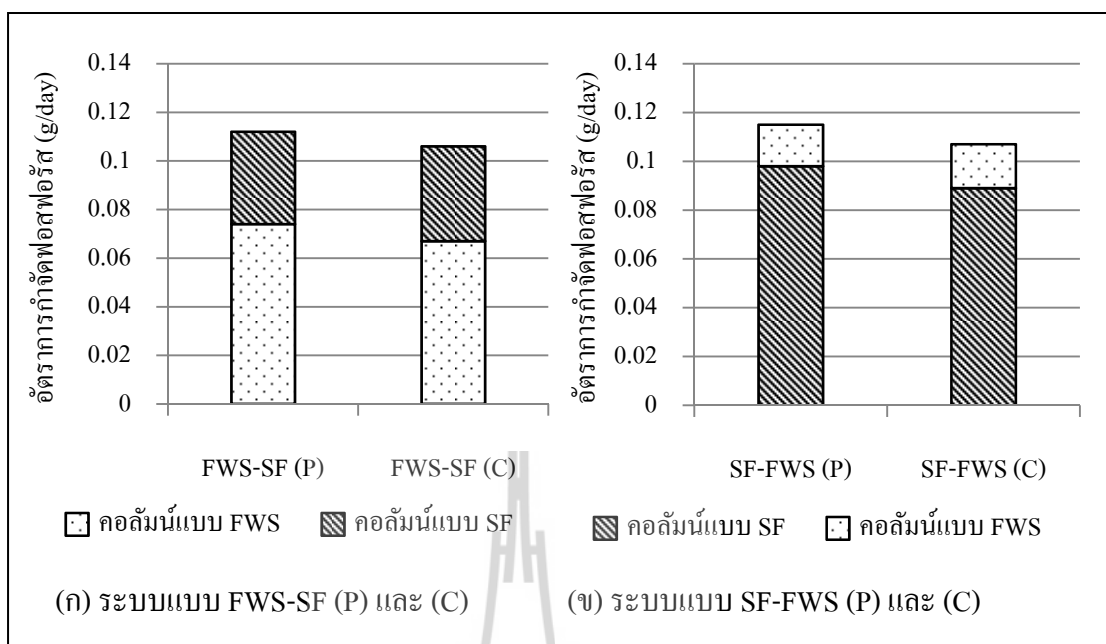


รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ภายในระยะเวลาเดินระบบ 72 วัน
ที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกเตอร์.วัน)



ตารางที่ 4.24 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)				
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	
ฟอสฟอรัส	น้ำเข้า (mg/l)	19.14-20.44	7.65-9.16	0.038	19.14-20.44	0.098	4.10-4.85	0.017	
	น้ำออก (mg/l)	7.65-9.16	2.02-2.50		4.10-4.85				
ระบบแบบ FWS-SF (C)									
พารามิเตอร์	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	
	น้ำเข้า (mg/l)	19.14-20.44	8.95-10.32	0.039	19.14-20.44	0.089	5.53-6.22	0.018	
น้ำออก (mg/l)	8.95-10.32	2.66-3.91	5.53-6.22						



รูปที่ 4.30 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราบรรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

จากข้อมูลตารางที่ 4.24 แสดงอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดานและจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

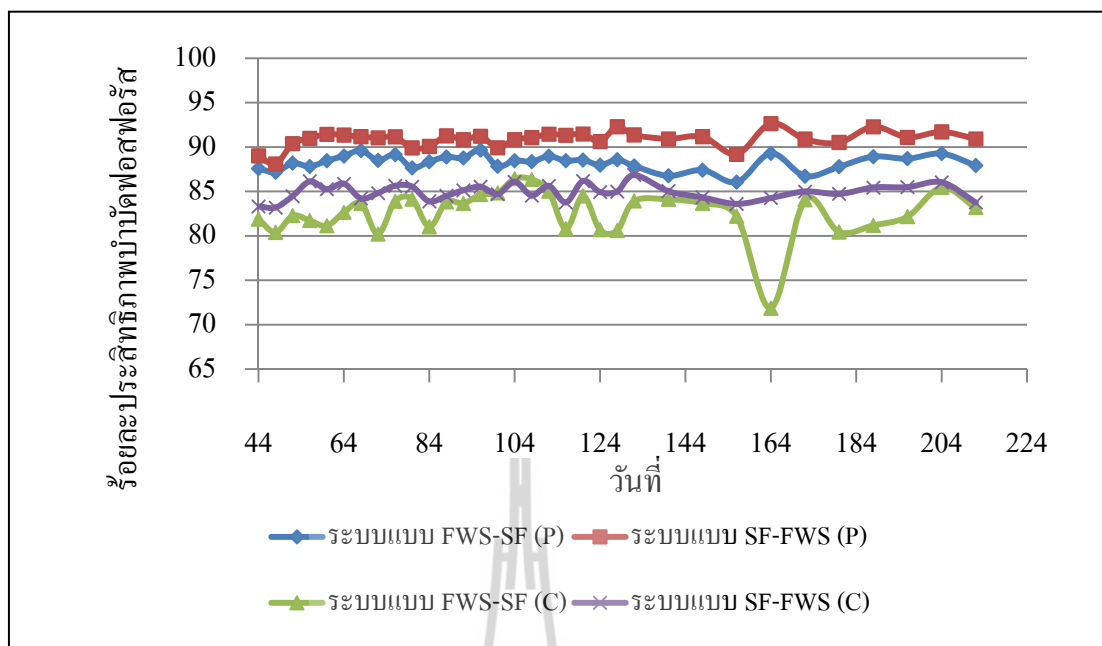
จากผลการทำสมดุลมวลของฟอสฟอรัสดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.25 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเฉลี่ย 19.857 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.127 กรัมต่อวัน จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.106 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 94.64 รองลงมา ได้แก่ พืช ซึ่งมีอัตราการกำจัดฟอสฟอรัส 0.006 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 5.36 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดจากหินดินดาน และจุลินทรีย์ 0.107 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 93.04 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.008 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 6.96 จากการทำ

สมมูลมวลทำให้ทราบว่า การกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อเดินระบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 72 วัน มีค่า 0.0136 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการศึกษาของ ปีติพร มโนคูน (2554) ซึ่งหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.128 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น จะเห็นได้ว่าหินดินดานยังคงมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้อีก

ตารางที่ 4.25 สมมูลมวลของฟอสฟอรัสที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

ฟอสฟอรัสเข้าระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ฟอสฟอรัสออกจากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัดของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของหินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
0.127	0.006	5.36	0.106	94.64	0.015
ฟอสฟอรัสเข้าระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				ฟอสฟอรัสออกจากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัดของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของหินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
0.061	0.008	6.96	0.107	93.04	0.012

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 72 วันแล้วนั้น ชุดการทดลองที่ 3 ทำการเพิ่มอัตราการบรรทุกฟอสฟอรัสเป็น 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัสเท่าเดิม (38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาวิจัย ตั้งแต่วันที่ 40 จนถึงวันที่ 212 รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน จากระยะเวลาเดินระบบทั้งหมด 212 วัน นำข้อมูลผลการศึกษา แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสกับเวลา แสดงในกราฟรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ภายในระยะเวลา 172 วัน ตั้งแต่วันที่ 40 จนถึงวันที่ 212 อยู่ในช่วงร้อยละ 80.00-90.00 โดยประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสมีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังคงสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ดี



รูปที่ 4.31 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน

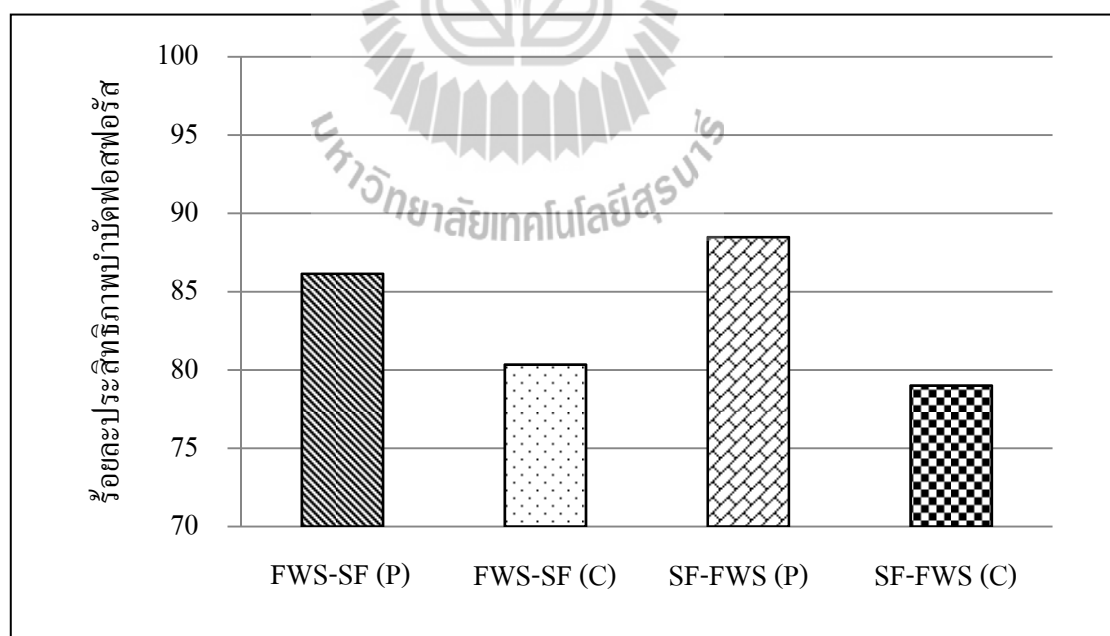
4.6.1.3 ที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

สำหรับชุดการทดลองที่ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยอัตราการบรรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) 72 วันแล้ว ทำการเพิ่มอัตราการบรรทุกฟอสฟอรัสเป็น 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 100 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.32 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ SF-FWS (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ FWS-SF (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสร้อยละ 88.48 86.14 80.34 และ 79.00 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกฟอสฟอรัสเข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสลดลงเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 3 โดยระบบแบบ SF-FWS (P) ก็ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส สูงกว่าระบบอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) และจากตารางที่ 4.27 พบว่าคอลัมน์แบบ SF มีอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสประมาณ 0.180 กรัมต่อวัน ซึ่งมากกว่าคอลัมน์แบบ FWS ที่มีอัตราการกำจัดประมาณ 0.145 กรัมต่อวัน และมากกว่าอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสที่อัตราการบรรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) และที่อัตราการบรรทุก

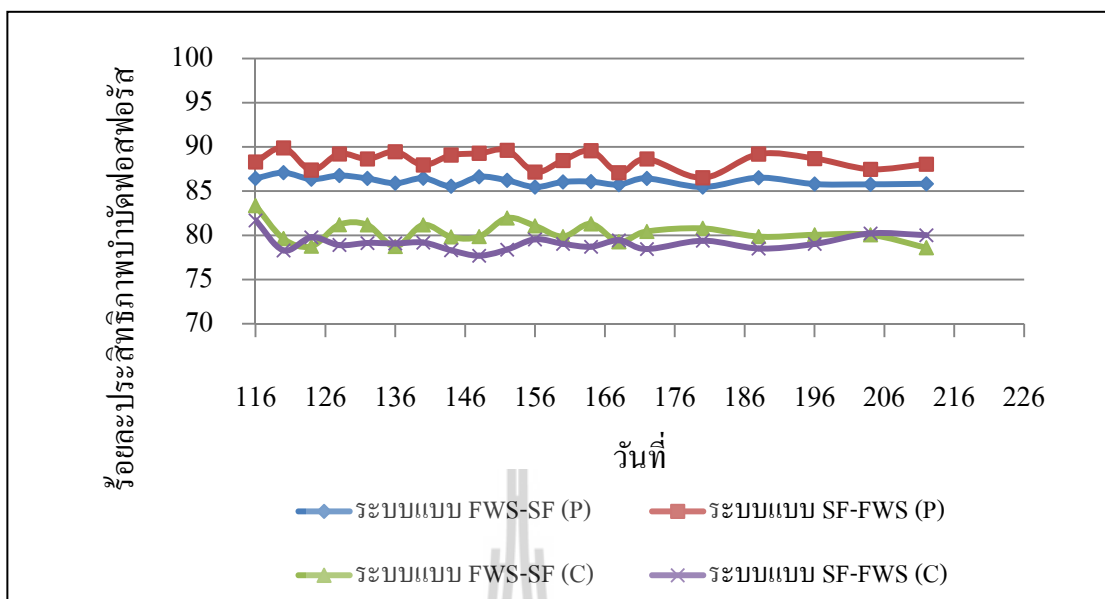
ฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) สอดคล้องกับการศึกษาของ Lin et al. (2002) ที่พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF จะมีกระบวนการดูดซับฟอสฟอรัสเอาไว้ที่ตัวกลางและพืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเนื้อเยื่อและเจริญเติบโต ดังนั้นระบบแบบ SF ซึ่งมีปริมาณของตัวกลางมากกว่าระบบแบบ FWS จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่า

ตารางที่ 4.26 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 100 วัน

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	N	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสของน้ำเข้า (mg/l)	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสของน้ำออก (mg/l)	mean \pm S.D.
ระบบแบบ FWS-SF (P)	20	39.45-42.05	5.33-5.90	86.14 \pm 0.45
ระบบแบบ FWS-SF (C)	20		6.90-8.61	80.34 \pm 1.18
ระบบแบบ SF-FWS (P)	20		4.16-5.33	88.48 \pm 0.97
ระบบแบบ SF-FWS (C)	19		7.99-9.22	79.00 \pm 0.64



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

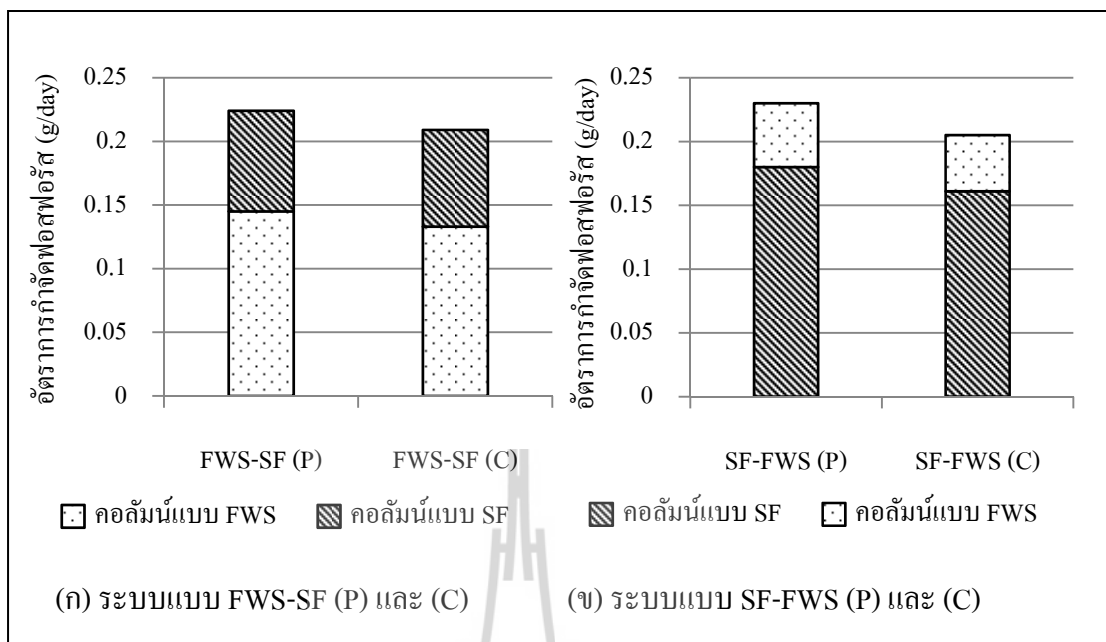


รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตรากระบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน



ตารางที่ 4.27 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอไรต์ 80.28-85.57 กิโลกรัม ฟอสฟอไรต์/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ฟอสฟอไรต์	น้ำเข้า (mg/l)	39.45-42.05	16.72-19.00	0.079	39.45-42.05	0.180	12.10-13.53	0.050
	น้ำออก (mg/l)	16.72-19.00	5.33-5.9		12.10-13.53		4.16-5.33	
ระบบแบบ FWS-SF (C)								
พารามิเตอร์	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
	น้ำเข้า (mg/l)	39.45-42.05	18.82-21.94	0.133	0.076	39.45-42.05	0.161	14.08-16.13
ฟอสฟอไรต์	น้ำออก (mg/l)	18.82-21.94	6.90-8.61		14.08-16.13		7.99-9.22	0.044



รูปที่ 4.34 อัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตราบรรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

จากข้อมูลตารางที่ 4.27 แสดงอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยหินดินดานและจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดฟอสฟอรัสโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

จากผลการทำสมดุลมวลของฟอสฟอรัสดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.28 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเฉลี่ย 40.700 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.260 กรัมต่อวัน จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดฟอสฟอรัสโดยระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.209 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 93.30 รองลงมา ได้แก่ พืชซึ่งมีอัตราการกำจัดฟอสฟอรัส 0.015 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 6.70 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดจากหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.205 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 89.13 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.025 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 10.87 จากการทำ

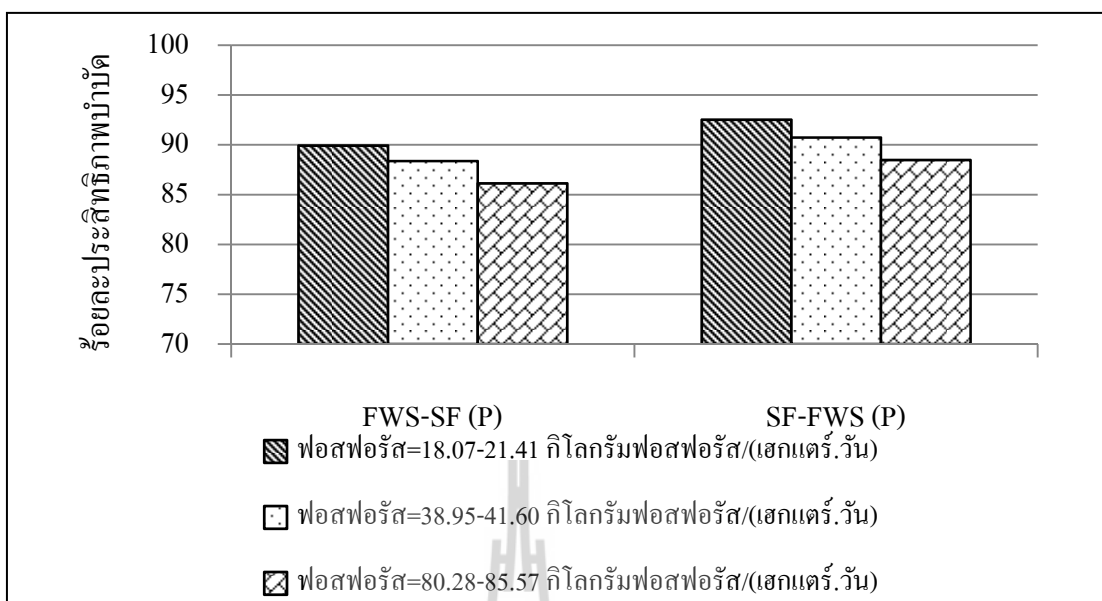
สมมูลมวลทำให้ทราบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 100 วัน มีค่า 0.0271 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการศึกษาของ ปิติพร มโนคูน (2554) ซึ่งหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.128 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น จะเห็นได้ว่าหินดินดานยังคงมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้อีก

ตารางที่ 4.28 สมมูลมวลของฟอสฟอรัสที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

ฟอสฟอรัสเข้าระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ฟอสฟอรัสออกจากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัดของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของหินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
0.260	0.015	6.70	0.209	93.30	0.036
ฟอสฟอรัสเข้าระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				ฟอสฟอรัสออกจากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัดของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของหินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	
0.260	0.025	10.87	0.205	89.13	0.030

4.6.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัสแตกต่างกันของแต่ละระบบ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัสดังกล่าวข้างต้น นำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA ดังแสดงภาคผนวก ค พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบแบบ FWS-SF (P) ของแต่ละอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) โดยระบบแบบ FWS-SF (P) และแบบ SF-FWS (P) มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงที่สุด ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 89.93 และ 92.53 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส
แตกต่างกันของระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS

4.6.3 สรุปผลการบำบัดฟอสฟอรัส

จากผลการศึกษการบำบัดฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ระบบแบบ SF-FWS มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงกว่าระบบแบบ FWS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกต้นอ้อ มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่ปลูกต้นอ้ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัสแตกต่างกัน 3 ค่า นั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF และ ระบบแบบ SF-FWS นั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุดที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) ดังนั้นหากนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอสมาบำบัดโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต้องทำการเจือจางน้ำทิ้งให้มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.25 ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบเอเอส
3. การเพิ่มอัตราการระบรทุกฟอสฟอรัสส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบลดลงประมาณร้อยละ 5
4. การเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 212 วัน พบว่าชุดการทดลองที่ 1 เดินระบบที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) มี

ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสในช่วงร้อยละ 75.00-95.00 สำหรับชุดการทดลองที่ 2 เติบโตระบบที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 80.00-90.00 ส่วนชุดการทดลองที่ 3 เติบโตระบบที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 80.00-90.00 ซึ่งการเติบโตระบบเป็นระยะเวลานาน อาจทำให้เกิดปัญหาการอึดตัวของตัวกลาง ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสลดลง

4.7 การบำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจน

จากผลการตรวจวิเคราะห์น้ำเข้า-ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนเพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS ที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ค่า รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.7.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของระบบแบบ FWS-SF และแบบ SF-FWS

4.7.1.1 ที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

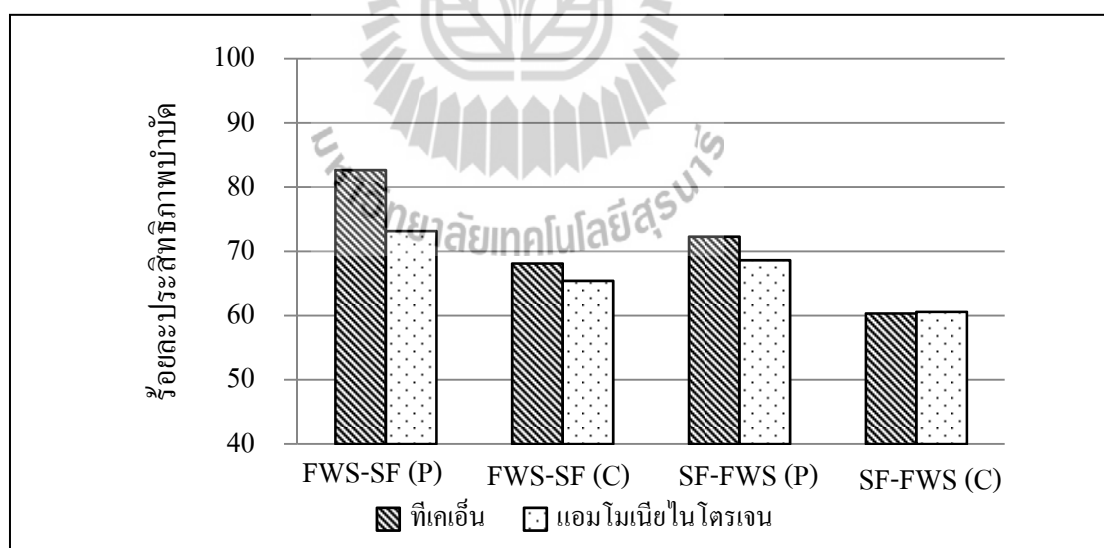
ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเติบโตระบบ ช่วง 0-40 วัน ของชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.29 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นทีเคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจนอยู่ในช่วง 37.13-41.16 และ 21.28-24.99 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากน้ำที่ผ่านระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าค่าความเข้มข้นทีเคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจนของน้ำออก อยู่ในช่วง 5.19-16.93 และ 4.76-10.64 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นและแอมโมเนียในโตรเจนของระบบ เรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ ระบบแบบ FWS-SF (P) ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นเท่ากับร้อยละ 82.66 72.30 68.12 และ 60.34 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในโตรเจนเท่ากับร้อยละ 73.17 68.62 65.41 และ 60.59 ตามลำดับ (รูปที่ 4.36) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นและแอมโมเนียในโตรเจน ในช่วง 40 วันแรกของการเติบโตระบบ มีค่ามากกว่าร้อยละ 60 และเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นและแอมโมเนียในโตรเจนของทุกระบบ ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Independent Test พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นและแอมโมเนียในโตรเจนของระบบแบบ FWS-SF (P) สูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในภาคผนวก ค โดยค่าทีเคเอ็นนั้นเป็นผลรวมของสารอินทรีย์

ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งจากค่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดเอเอส พบว่า ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนสูงกว่าสารอินทรีย์ไนโตรเจน แสดงให้เห็นว่าการบำบัดไนโตรเจนของระบบเอเอสสามารถเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนไปบางส่วนทำให้เกิดแอมโมเนียไนโตรเจนมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะช่วยในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนเหล่านี้ต่อไป โดยสารอินทรีย์ไนโตรเจนถูกย่อยสลายให้กลายเป็นแอมโมเนียได้ง่ายโดยอาศัยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ส่วนแอมโมเนียอาจถูกกำจัดได้ 2 ทาง คือ ถูกจุลินทรีย์ดึงไปใช้เป็นสารอาหาร และใช้ในการสร้างเซลล์ หรือถูกแบคทีเรียออกโตโทรบเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ และไนเตรท โดยระบบแบบ FWS-SF สามารถบำบัดที่เคเอ็นได้ดีเนื่องจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน พืช และจุลินทรีย์ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปบีโอดีของระบบแบบ FWS-SF เท่ากับ 0.059 กรัมต่อวัน เมื่อนำมาคิดอัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนซึ่งมีค่าเท่ากับ 100:5 ดังนั้นการกำจัดไนโตรเจนโดยผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน จะมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 0.003 กรัมต่อวัน แต่จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบมีค่าเท่ากับ 0.207 กรัมต่อวัน ดังนั้น กลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นส่วนที่เหลือนั้นจะถูกกำจัดโดยกลไกอื่นๆ ได้แก่ พืช ซึ่งพบว่าพืชสามารถช่วยกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเท่ากับ 0.036 กรัมต่อวัน และกลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยหินดินดานมีอัตราการกำจัดเท่ากับ 0.168 กรัมต่อวัน (0.207-0.036-0.003) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบนั้นส่วนใหญ่จึงเกิดจากการกำจัดของหินดินดาน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของอมรา คาวไชสง (2550) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนเกิดจากตัวกลางถึงร้อยละ 60.55-69.06 จากตารางที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าอัตราการกำจัดที่เคเอ็นและแอมโมเนียไนโตรเจนของคอลัมน์แบบ FWS มีค่าเท่ากับ 0.141 และ 0.090 กรัมต่อวัน ตามลำดับ สำหรับระบบแบบ SF-FWS เมื่อน้ำทิ้งไหลเข้าไปในคอลัมน์แบบ SF ซึ่งมีออกซิเจนน้อยกว่าคอลัมน์แบบ FWS ดังนั้นจึงเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้น้อยกว่า ทำให้สารอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนถูกกำจัดไปได้ได้น้อยกว่าระบบแบบ FWS-SF ซึ่งจะเห็นได้จากค่าอัตราการกำจัดที่เคเอ็นและแอมโมเนียไนโตรเจนเท่ากับ 0.124 และ 0.082 กรัมต่อวัน ตามลำดับ นอกจากนี้ในการบำบัดไนโตรเจนต้องใช้เวลาานพอสมควร โดยระยะเวลาเก็บกักของคอลัมน์แบบ FWS สูงกว่า คอลัมน์แบบ SF ส่งผลทำให้ไนโตรเจนถูกกำจัดไปได้ดีกว่าอีกด้วย ระบบแบบ FWS-SF มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นและแอมโมเนียไนโตรเจนสูงสุด และจากผลการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าระบบที่ปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน สูงกว่าระบบที่ไม่ได้ปลูกต้นอ้อประมาณร้อยละ 10 เนื่องจากต้นอ้อสามารถนำพาออกซิเจนเข้าไปในระบบด้วยส่วนหนึ่ง และยังมี

การนำไนโตรเจนไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืชเอง เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืช (Lin et al., 2002)

ตารางที่ 4.29 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดทีเคเอ็น และแอมโมเนีย ที่อัตรากระบรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน

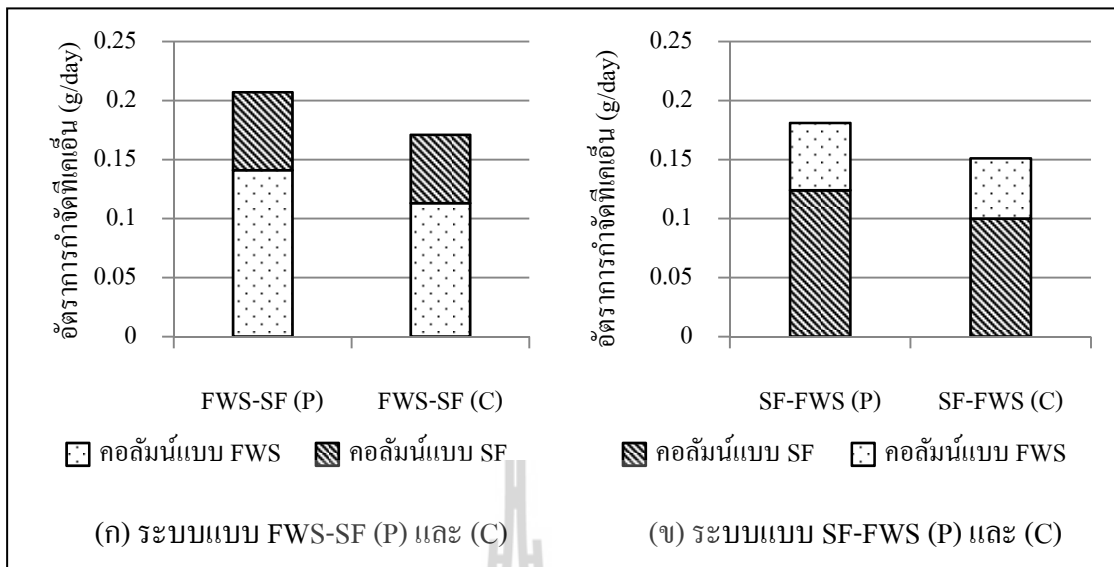
ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	ทีเคเอ็น (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.	แอมโมเนีย (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.
	เข้า min-max	ออก min-max		เข้า min-max	ออก min-max	
ระบบแบบ FWS-SF (P)	37.13-41.16	5.19-8.40	82.66 \pm 2.20	21.28-24.99	4.76-7.56	73.17 \pm 2.13
ระบบแบบ FWS-SF (C)		9.71-13.91	68.12 \pm 2.24		6.81-9.24	65.41 \pm 2.79
ระบบแบบ SF-FWS (P)		8.21-13.10	72.30 \pm 3.58		6.64-8.74	68.62 \pm 2.14
ระบบแบบ SF-FWS (C)		13.65-16.93	60.34 \pm 2.26		8.12-10.64	60.59 \pm 2.40



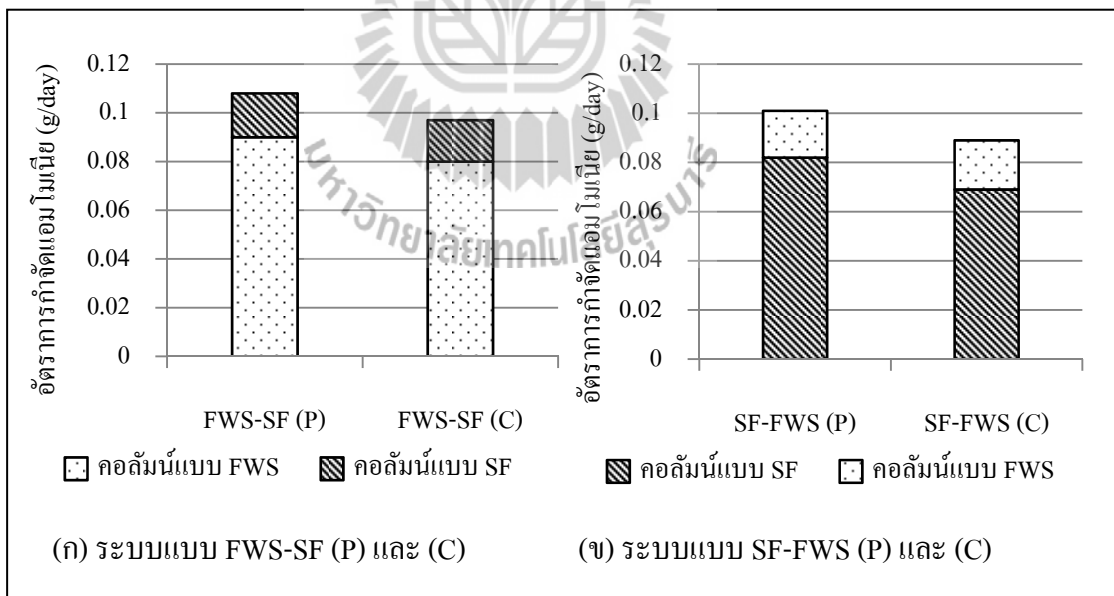
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ภายในระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน ที่อัตรากระบรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ตารางที่ 4.30 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจน ระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (F)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ทีเคเอ็น	น้ำเข้า (mg/l)	37.13-41.16	15.68-18.93	0.066	37.13-41.16	0.124	17.84-21.65	0.057
	น้ำออก (mg/l)	15.68-18.93	5.19-8.40		17.84-21.65			
แอมโมเนีย	น้ำเข้า (mg/l)	21.28-24.99	8.12-10.64	0.018	21.28-24.99	0.082	9.15-13.07	0.019
	น้ำออก (mg/l)	8.12-10.64	4.76-7.56		9.15-13.07			
ระบบแบบ FWS-SF (C)								
พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (C)				ระบบแบบ SF-FWS (C)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ทีเคเอ็น	น้ำเข้า (mg/l)	37.13-41.16	19.66-24.08	0.058	37.13-41.16	0.100	21.28-25.20	0.051
	น้ำออก (mg/l)	19.66-24.08	9.71-13.91		21.28-25.20			
แอมโมเนีย	น้ำเข้า (mg/l)	21.28-24.99	9.05-12.51	0.017	21.28-24.99	0.069	11.47-14.56	0.020
	น้ำออก (mg/l)	9.05-12.51	6.81-9.24		11.47-14.56			



รูปที่ 4.37 อัตราการกำจัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตรากระบรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)



รูปที่ 4.38 อัตราการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตรากระบรทุกไนโตรเจน 43.30-50.86 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

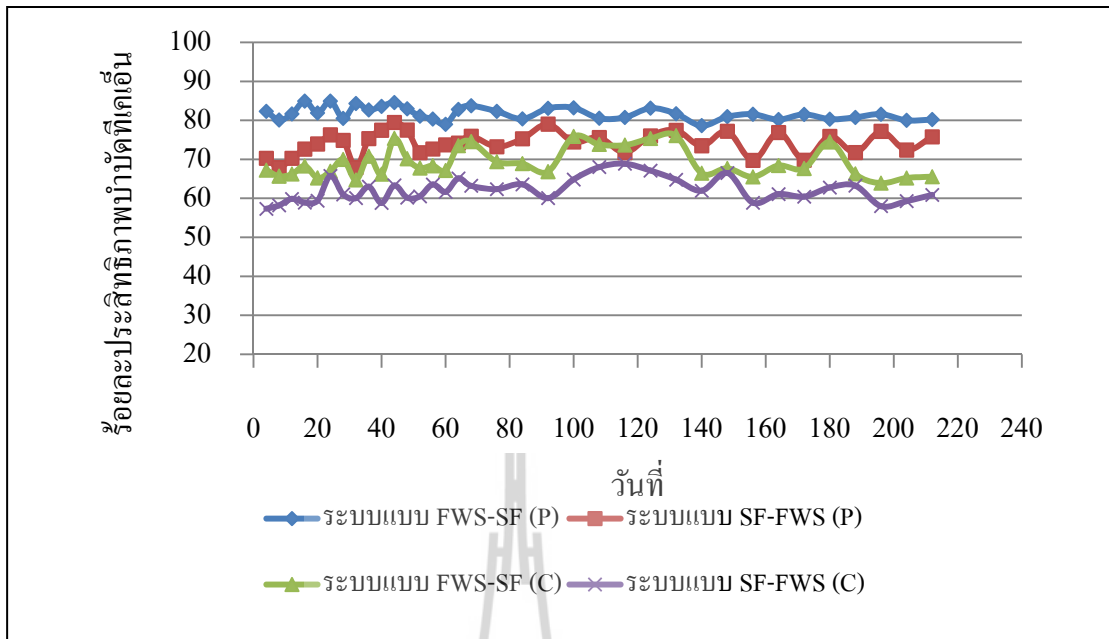
จากข้อมูลตารางที่ 4.30 แสดงอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดไนโตรเจนโดยหินดินดาน และจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

จากผลการทำสมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.31 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเฉลี่ย 39.232 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.250 กรัมต่อวัน และมีไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียร้อยละ 59.10 จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น โดยระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน และจุลินทรีย์ 0.171 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 82.61 รองลงมา ได้แก่ พืช ซึ่งมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น 0.036 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 17.39 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดไนโตรเจนเกิดจากหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.151 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 83.43 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.030 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 16.57 ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) เท่ากับ 0.059 กรัมต่อวัน เมื่อนำมาคิดอัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนซึ่งมีค่าเท่ากับ 100:5 ดังนั้นการกำจัดไนโตรเจนโดยผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน จะมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 0.003 กรัมต่อวัน แต่จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบมีค่าเท่ากับ 0.207 กรัมต่อวัน ดังนั้นกลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นส่วนที่เหลือนั้นจะถูกกำจัดโดยกลไกอื่น ๆ ได้แก่ พืช ซึ่งพบว่าพืชสามารถช่วยกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเท่ากับ 0.036 กรัมต่อวัน และกลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยหินดินดานมีอัตราการกำจัดเท่ากับ 0.168 กรัมต่อวัน (0.207-0.036-0.003) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบนั้นส่วนใหญ่จึงเกิดจากการกำจัดของหินดินดาน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวไชสง (2554) พบว่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของหินดินดานอยู่ในช่วง 0.042-0.166 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการศึกษาครั้งนี้เมื่อคิดค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของหินดินดาน เมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 40 วัน พบว่ามีค่า 0.0244 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งน้อยกว่าผลการศึกษาของ อมรา ดาวไชสง (2554) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหินดินดานในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังคงมีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนได้อีก

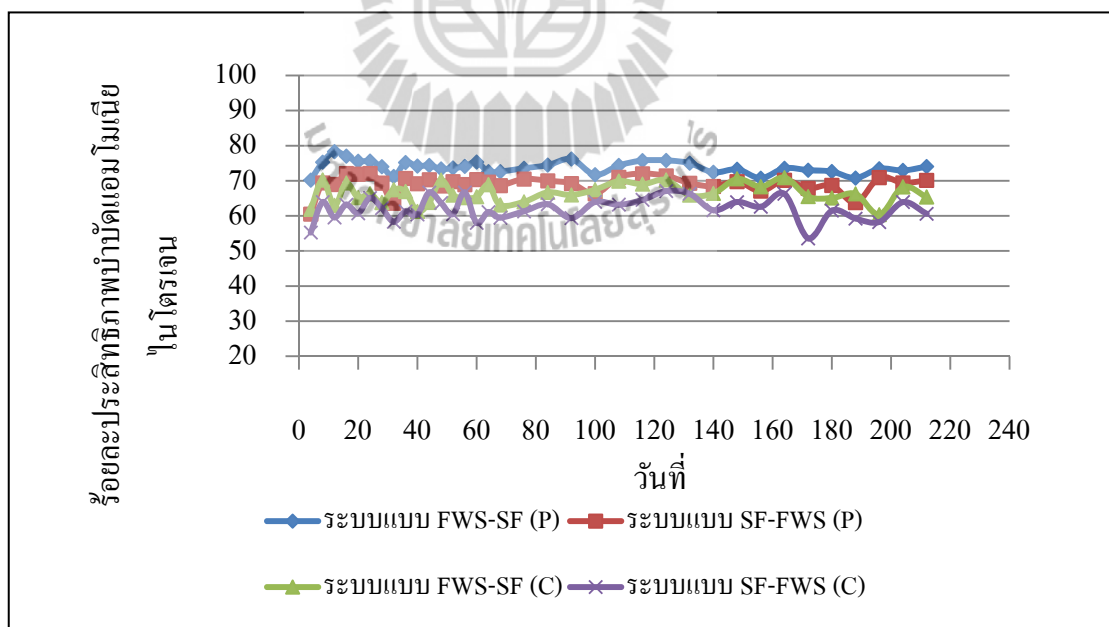
ตารางที่ 4.31 สมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ไนโตรเจนเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ไนโตรเจนออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัด ของหินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.250	0.036	17.39	0.171	82.61	0.043
ไนโตรเจนเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				ไนโตรเจนออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัด ของหินดินดาน และจุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.250	0.030	16.57	0.151	83.43	0.069

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 40 วันแล้วนั้น ในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเพิ่มอัตราการระบรทุกไนโตรเจนให้อยู่ในช่วง 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ส่วนชุดการทดลองที่ 1 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนเท่าเดิม (75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาวิจัย ตลอดระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน เพื่อศึกษาแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น สำหรับการเดินระบบเป็นระยะเวลานาน และเมื่อนำข้อมูลของชุดการทดลองที่ 1 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น ตั้งแต่วันที่ 0-212 อยู่ในช่วงร้อยละ 60.00-80.00 สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.40 โดยในช่วงวันที่ 0-212 มีประสิทธิภาพร้อยละ 60.00-75.00 ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ตลอดเวลาเดินระบบ 212 วัน มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตรากระบรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน



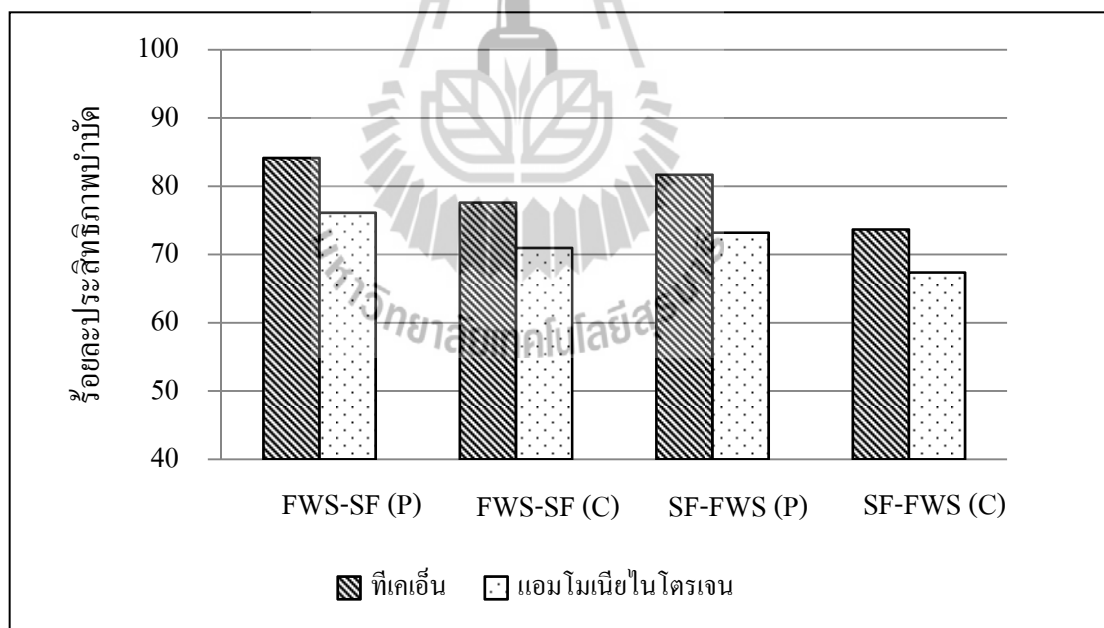
รูปที่ 4.40 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตรากระบรทุกไนโตรเจน 43.30-50.86 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 212 วัน

4.7.1.2 ที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

สำหรับชุดการทดลองที่ 2 และ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยอัตราการบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 40 วันแล้ว ทำการเพิ่มอัตราการบรรทุกไนโตรเจนเป็น 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) โดยทำการเดินระบบต่อมาอีกเป็นระยะเวลา 72 วัน ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.32 และรูปที่ 4.41 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมา ได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นร้อยละ 84.14 81.69 77.61 และ 73.67 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกไนโตรเจนเข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นของระบบเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2-13 ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 สำหรับผลการศึกษาประสิทธิภาพบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนนั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมา ได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 76.12 73.20 70.96 และ 67.36 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกไนโตรเจนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของระบบเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2-8 โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 65 อย่างไรก็ตามระบบแบบ FWS-SF (P) ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน สูงกว่าระบบอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) จากผลการกำจัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนในตารางที่ 4.33 พบว่าคอลัมน์แบบ FWS มีอัตราการกำจัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนเท่ากับ 0.344 และ 0.202 กรัมต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าคอลัมน์แบบ SF ที่มีอัตราการกำจัดเท่ากับ 0.315 และ 0.192 กรัมต่อวัน ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ ศศิวิมล สุดแสน (2554) ในการบำบัดที่เคเอ็นของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 0.32 0.64 และ 1.28 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ก็มีขีดจำกัด เพราะเมื่อถึงที่อัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์ที่มากเกินไปประสิทธิภาพของระบบจะรับได้นั้น ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นจะลดลง

ตารางที่ 4.32 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุก
ไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดิน
ระบบ 72 วัน

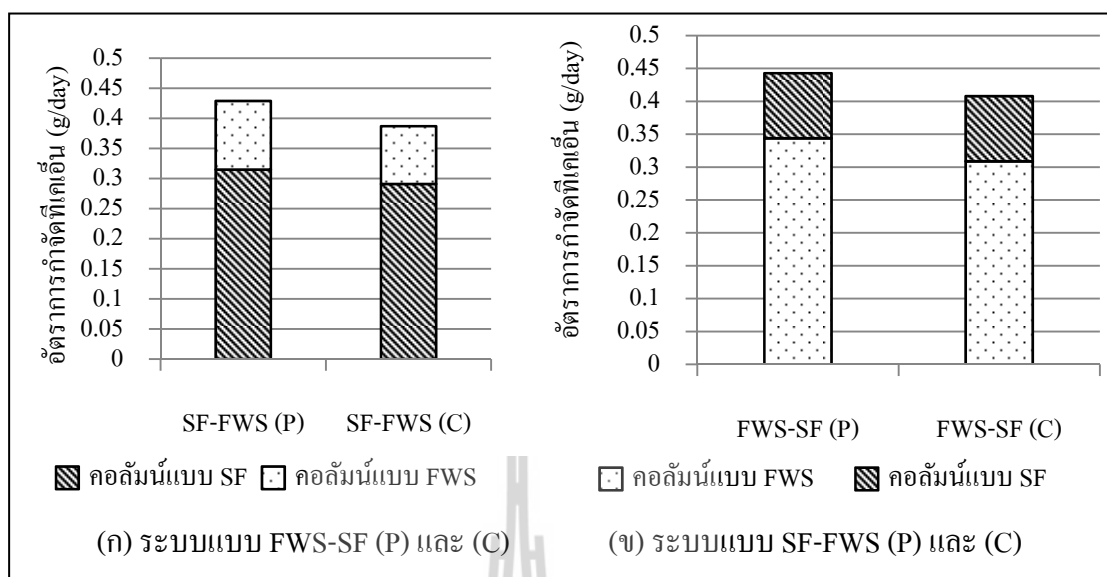
ระบบจำลอง พื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	ทีเคเอ็น (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.	แอมโมเนีย (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.
	เข้า min-max	ออก min-max		เข้า min-max	ออก min-max	
ระบบแบบ FWS-SF (P)	79.90-85.12	10.37-15.96	84.14 \pm 1.83	46.32-49.78	10.36-12.92	76.12 \pm 1.31
ระบบแบบ FWS-SF (C)		15.56-22.03	77.61 \pm 1.68		12.56-15.56	70.96 \pm 1.35
ระบบแบบ SF-FWS (P)		12.56-19.04	81.69 \pm 2.03		11.95-14.09	73.20 \pm 1.03
ระบบแบบ SF-FWS (C)		18.84-25.57	73.67 \pm 2.16		14.47-17.75	67.36 \pm 1.70



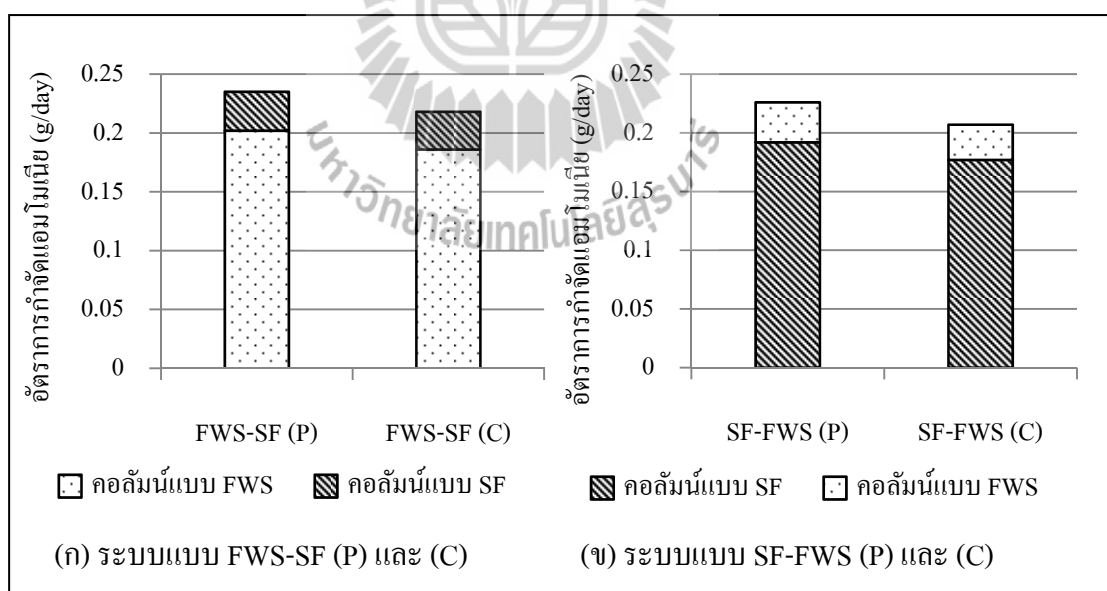
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ภายในระยะเวลา
เดินระบบ 72 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัม
ไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ตารางที่ 4.33 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ทีเคเอ็น	น้ำเข้า (mg/L)	79.90-85.12	25.66-30.24	79.90-85.12	0.099	30.76-35.37	30.76-35.37	0.114
	น้ำออก (mg/L)	25.66-30.24	10.37-15.96	30.76-35.37	0.315	12.56-19.04	12.56-19.04	0.034
แอมโมเนีย	น้ำเข้า (mg/L)	46.32-49.78	14.74-17.93	46.32-49.78	0.033	16.38-21.84	16.38-21.84	0.034
	น้ำออก (mg/L)	14.74-17.93	10.36-12.92	16.38-21.84	0.192	11.95-14.09	11.95-14.09	
ระบบแบบ FWS-SF (C)								
พารามิเตอร์	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
	น้ำเข้า (mg/L)	79.90-85.12	30.24-36.96	79.90-85.12	0.099	26.12-40.13	26.12-40.13	0.096
ทีเคเอ็น	น้ำออก (mg/L)	30.24-36.96	15.56-22.03	26.12-40.13	0.309	18.84-25.57	18.84-25.57	0.030
	น้ำเข้า (mg/L)	46.32-49.78	17.29-20.16	46.32-49.78	0.032	18.66-22.87	18.66-22.87	
แอมโมเนีย	น้ำออก (mg/L)	17.29-20.16	12.56-15.56	18.66-22.87	0.186	14.47-17.75	14.47-17.75	



รูปที่ 4.42 อัตราการกำจัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการบรรทุกใน ไตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)



รูปที่ 4.43 อัตราการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการบรรทุกใน ไตรเจน 94.26-101.30 กิโลกรัมแอมโมเนียไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

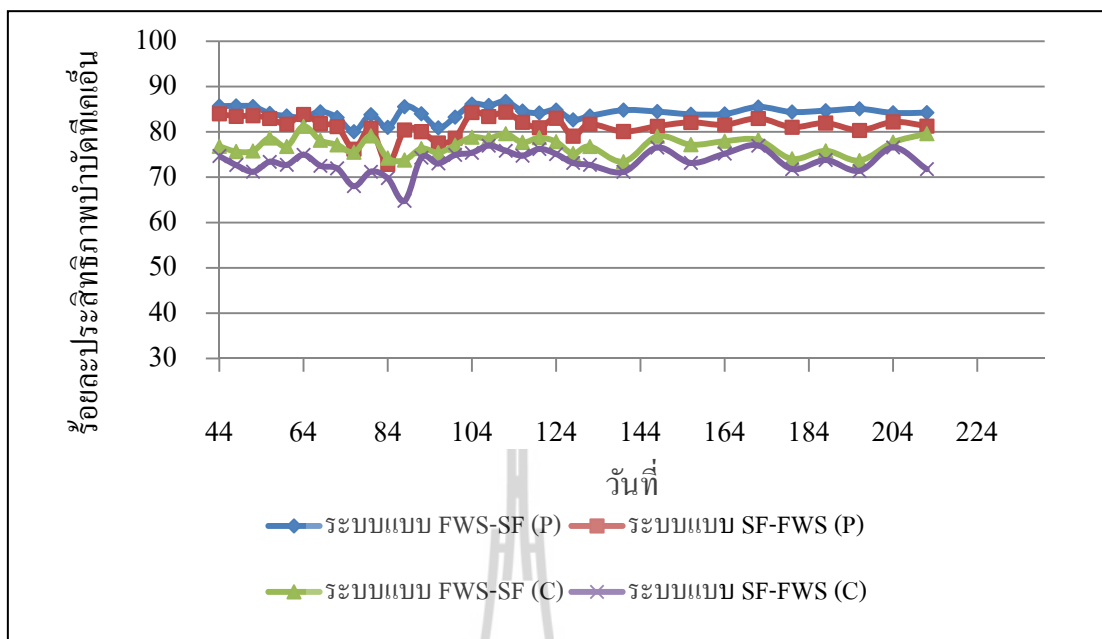
จากข้อมูลตารางที่ 4.33 แสดงอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยหินดินดานและจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

จากผลการทำสมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.34 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเฉลี่ย 82.228 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.525 กรัมต่อวัน และมีไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียร้อยละ 58.24 จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดาน และจุลินทรีย์ 0.407 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 92.08 รองลงมา ได้แก่ พืชซึ่งมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น 0.035 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 7.92 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเกิดจากหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.387 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 90.21 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.042 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 9.79 ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) เท่ากับ 0.120 กรัมต่อวัน เมื่อนำมาคิดอัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนซึ่งมีค่าเท่ากับ 100:5 ดังนั้นการกำจัดไนโตรเจนโดยผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน จะมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 0.006 กรัมต่อวัน แต่จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบมีค่าเท่ากับ 0.442 กรัมต่อวัน ดังนั้นกลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นส่วนที่เหลือนั้นจะถูกกำจัดโดยกลไกอื่น ๆ ได้แก่ พืช ซึ่งพบว่าพืชสามารถช่วยกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเท่ากับ 0.035 กรัมต่อวัน และกลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยหินดินดานมีอัตราการกำจัดเท่ากับ 0.401 กรัมต่อวัน (0.442-0.035-0.006) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบนั้นส่วนใหญ่จึงเกิดจากการกำจัดของหินดินดาน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรตง (2554) พบว่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของหินดินดานอยู่ในช่วง 0.042-0.166 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการศึกษาครั้งนี้เมื่อคิดค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของหินดินดาน เมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 72 วัน พบว่ามีค่า 0.0521 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งน้อยกว่าผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรตง (2554) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าหินดินดานในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังคงมีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนได้อีก

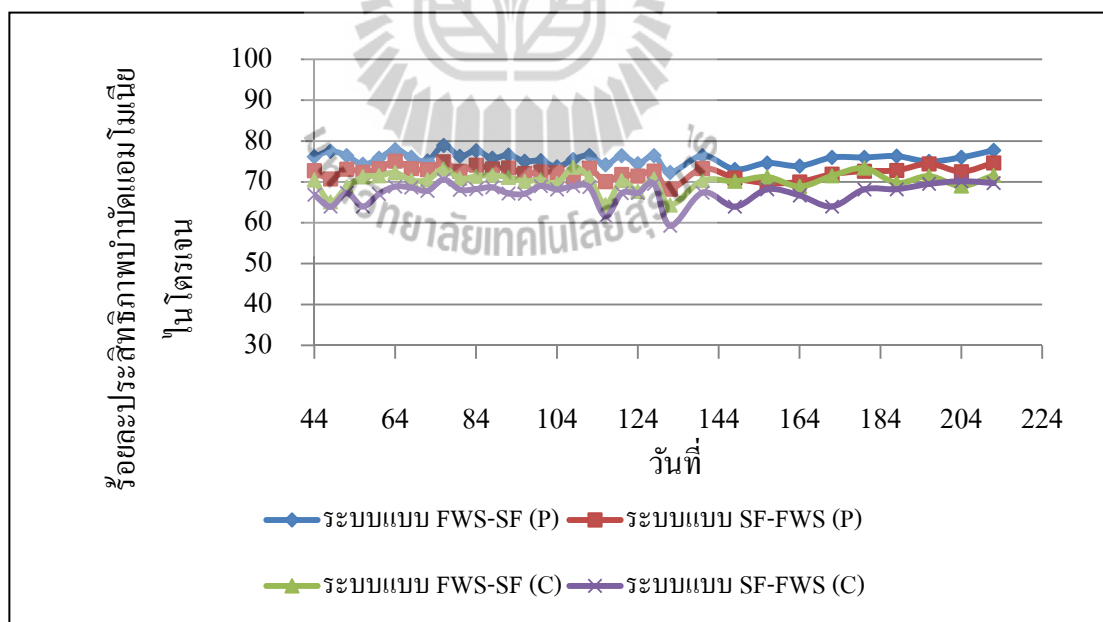
ตารางที่ 4.34 สมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น
162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ไนโตรเจนเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ไนโตรเจนออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการ กำจัดของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.525	0.035	7.92	0.407	92.08	0.083
ไนโตรเจนเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				ไนโตรเจนออก จากระบบ (g/day)
	อัตราการ กำจัดของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
0.525	0.042	9.79	0.387	90.21	0.096

หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลา 72 วันแล้วนั้น ชุดการทดลองที่ 3 ทำการ
เพิ่มอัตราการระบรทุกไนโตรเจนเป็น 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ส่วนชุดการ
ทดลองที่ 2 ยังคงทำการเดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนเท่าเดิม (162.60-173.22
กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)) ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาวิจัย ตั้งแต่วันที่ 40 จนถึงวันที่ 212
รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน จากระยะเวลาเดินระบบทั้งหมด 212 วัน นำข้อมูลผลการศึกษา
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน กับเวลา
แสดงในกราฟรูปที่ 4.44 และ 4.45 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นตั้งแต่วันที่ 44-212
อยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-85.00 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ
60.00-80.00 จนกระทั่งสิ้นสุดการเดินระบบ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และ
แอมโมเนียไนโตรเจนค่อนข้างคงที่



รูปที่ 4.44 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกในโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมในโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน



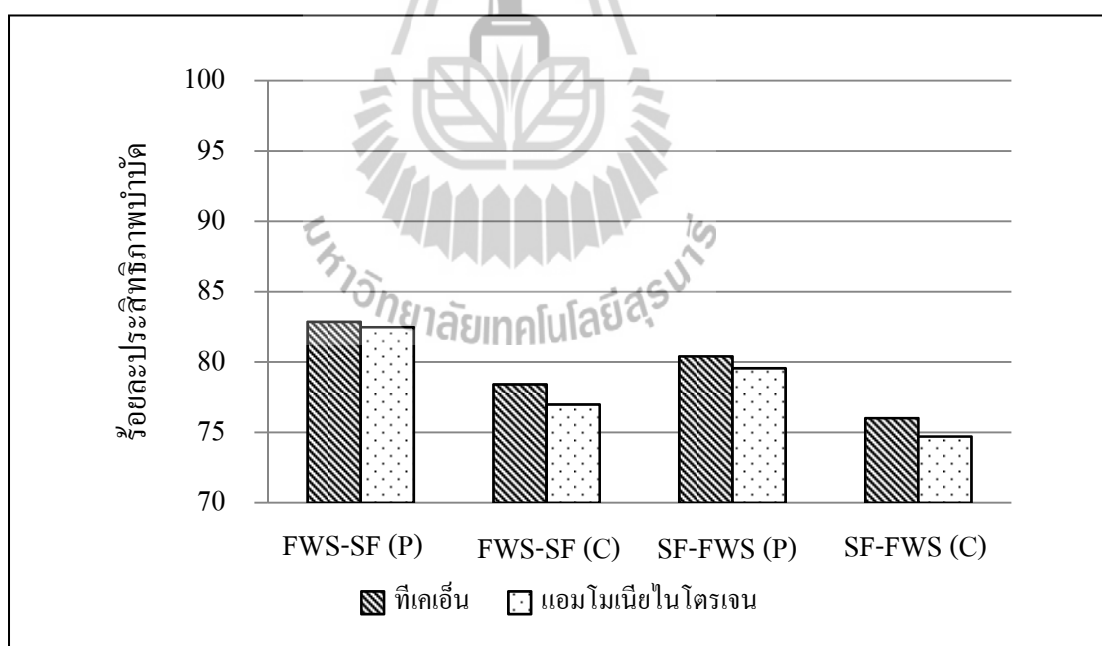
รูปที่ 4.45 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในโตรเจนของชุดการทดลองที่ 2 ที่อัตราการระบรทุกในโตรเจน 94.26-101.30 กิโลกรัมแอมโมเนียในโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 172 วัน

4.7.1.3 ที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

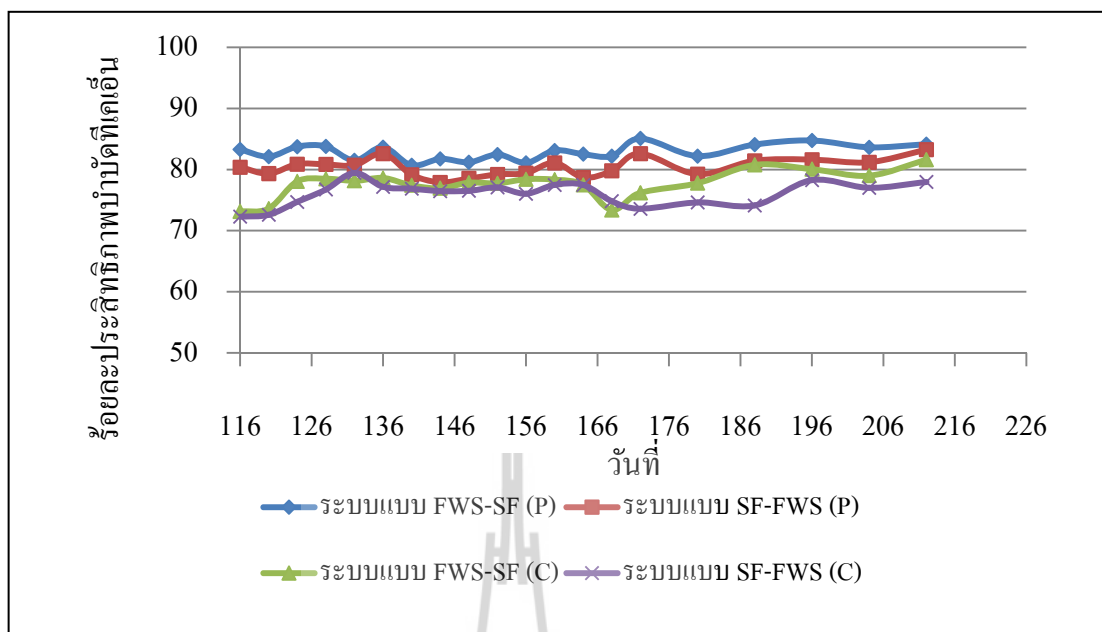
สำหรับชุดการทดลองที่ 3 หลังจากการเดินระบบด้วยอัตราการบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) 72 วันแล้ว ทำการเพิ่มอัตราการบรรทุกไนโตรเจนเป็น 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 100 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.35 และรูปที่ 4.46 พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นร้อยละ 82.86 80.41 78.41 และ 76.02 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกไนโตรเจนเข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 2 อย่างไรก็ตามระบบแบบ FWS-SF (P) ก็ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น สูงกว่าทุกระบบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนนั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF (P) มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบแบบ SF-FWS (P) ระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 82.48 79.56 76.99 และ 74.71 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกไนโตรเจนเข้าไปในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของระบบเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 6-7 โดยระบบแบบ FWS-SF (P) ก็ยังคงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน สูงกว่าระบบอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) และจากตารางที่ 4.36 พบว่าคอลัมน์แบบ FWS มีอัตราการกำจัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ประมาณ 0.614 และ 0.505 กรัมต่อวัน ซึ่งมากกว่าคอลัมน์แบบ SF ที่มีอัตราการกำจัดประมาณ 0.852 และ 0.488 กรัมต่อวัน และมากกว่าอัตราการกำจัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) และที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ตารางที่ 4.35 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการบำบัดทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุก
ไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ระยะเวลาการเดิน
ระบบ 100 วัน

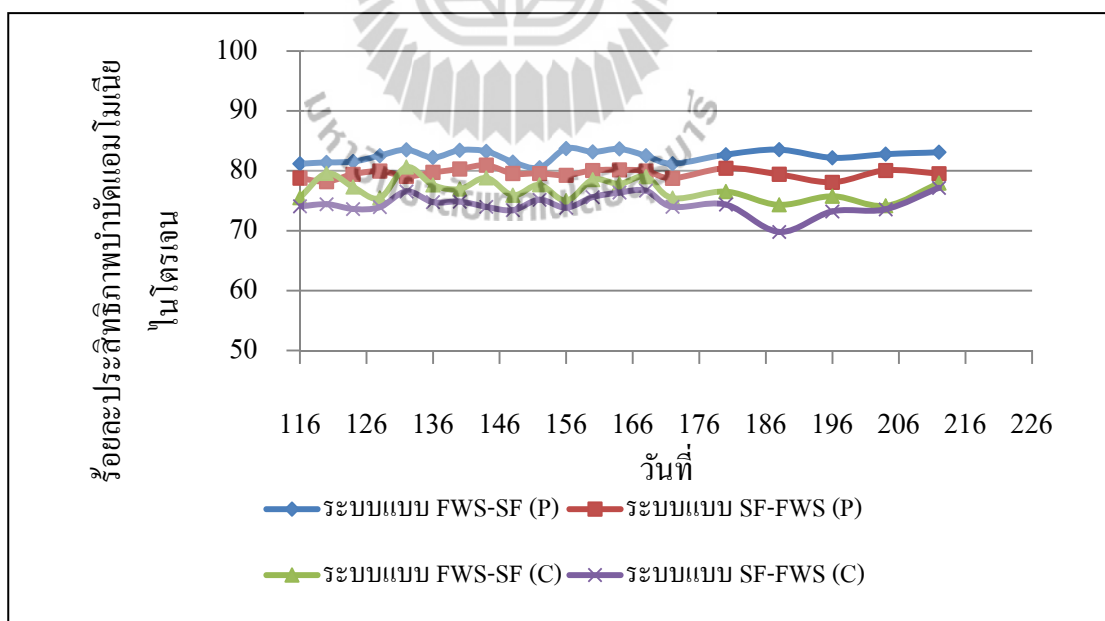
ระบบจำลอง พื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์	ทีเคเอ็น (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.	แอมโมเนีย (mg/l)		% Removal mean \pm S.D.
	เข้า min-max	ออก min-max		เข้า min-max	ออก min-max	
ระบบแบบ FWS-SF (P)	155.96-172.76	24.64-32.21	82.86 \pm 1.26	94.36-97.72	15.68-18.56	82.48 \pm 0.97
ระบบแบบ FWS-SF (C)		31.08-39.31	78.41 \pm 1.35		18.76-24.92	76.99 \pm 1.79
ระบบแบบ SF-FWS (P)		27.30-37.67	80.41 \pm 1.48		18.02-21.00	79.56 \pm 0.73
ระบบแบบ SF-FWS (C)		32.01-47.88	76.02 \pm 2.03		21.56-25.67	74.71 \pm 1.21



รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ภายในระยะเวลา
เดินระบบ 100 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัม
ไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)



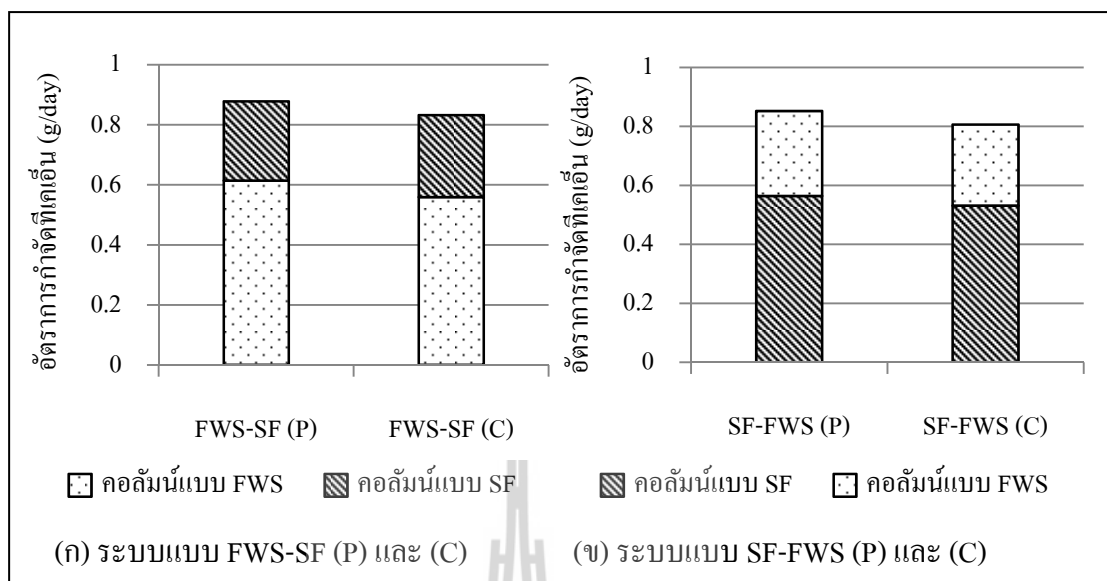
รูปที่ 4.47 ประสิทธิภาพการงอกของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบรทุกในโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมในโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน



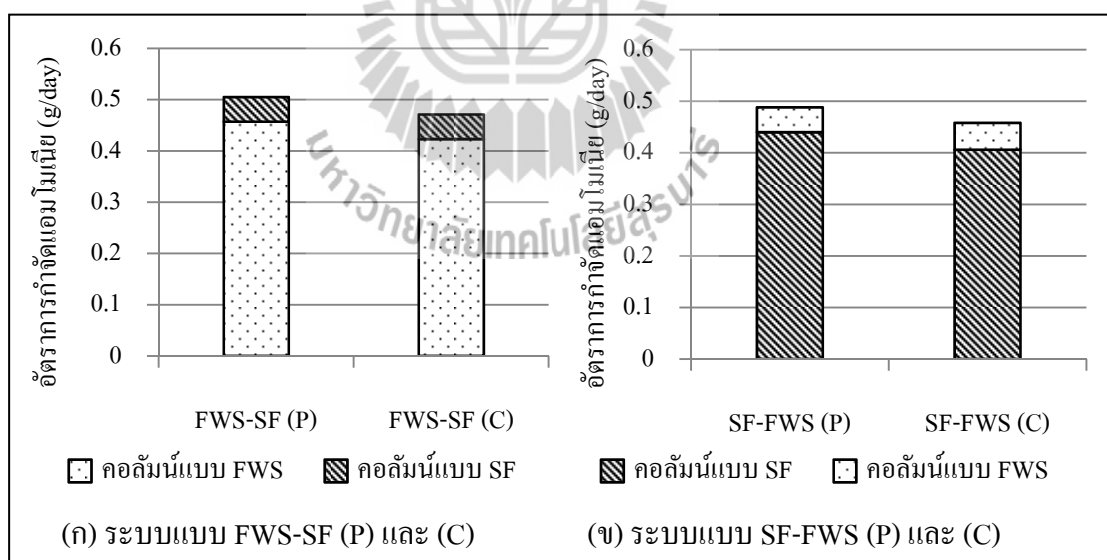
รูปที่ 4.48 ประสิทธิภาพการงอกแอมโมเนียในโตรเจนของชุดทดลองที่ 3 ที่อัตราการระบรทุกในโตรเจน 192.02-198.86 กิโลกรัมแอมโมเนียในโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ภายในระยะเวลาเดินระบบ 100 วัน

ตารางที่ 4.36 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ระหว่างคอลัมน์แบบ FWS และคอลัมน์แบบ SF ที่อัตราการบรรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

พารามิเตอร์	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ระบบแบบ SF-FWS (P)			
	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
ทีเคเอ็น	น้ำเข้า (mg/l)	155.96-172.76	63.84-77.56	155.96-172.76	72.15-84.99	0.564	72.15-84.99	0.288
	น้ำออก (mg/l)	63.84-77.56	24.64-32.21	72.15-84.99	27.30-37.67			
แอมโมเนีย	น้ำเข้า (mg/l)	94.36-97.72	23.15-26.04	94.36-97.72	25.30-30.52	0.440	25.30-30.52	0.048
	น้ำออก (mg/l)	23.15-26.04	15.68-18.56	25.30-30.52	18.02-21.00			
ระบบแบบ FWS-SF (C)								
พารามิเตอร์	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	SF	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)	FWS	อัตราการกำจัดเฉลี่ย (g/day)
	น้ำเข้า (mg/l)	155.96-172.76	74.20-83.36	155.96-172.76	77.17-86.81	0.531	77.17-86.81	0.275
น้ำออก (mg/l)	74.20-83.36	31.08-39.31	77.17-86.81	32.01-47.88				
แอมโมเนีย	น้ำเข้า (mg/l)	94.36-97.72	26.60-30.89	94.36-97.72	31.08-34.40	0.406	31.08-34.40	0.052
	น้ำออก (mg/l)	26.60-30.89	18.76-24.92	31.08-34.40	21.56-25.67			



รูปที่ 4.49 อัตราการกำจัดที่เคเอ็นของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตรากระบรทุกในโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมในโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)



รูปที่ 4.50 อัตราการกำจัดแอมโมเนียในโตรเจนของชุดการทดลองที่ 3 ที่อัตรากระบรทุกในโตรเจน 192.02-198.86 กิโลกรัมแอมโมเนียในโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ของระบบแบบ FWS-SF (ก) และแบบ SF-FWS (ข)

จากข้อมูลตารางที่ 4.33 แสดงอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (C) และระบบแบบ SF-FWS (C) ซึ่งไม่มีการปลูกพืช คิดเป็นอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยหินดินดานและจุลินทรีย์ ดังนั้นการหาอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยพืช สามารถทำได้โดยการนำอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (P) ลบกับอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (C) และอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยพืชของระบบแบบ SF-FWS (P) สามารถทำได้โดยนำอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของทั้งระบบแบบ SF-FWS (P) ลบด้วยอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยรวมของระบบแบบ SF-FWS (C)

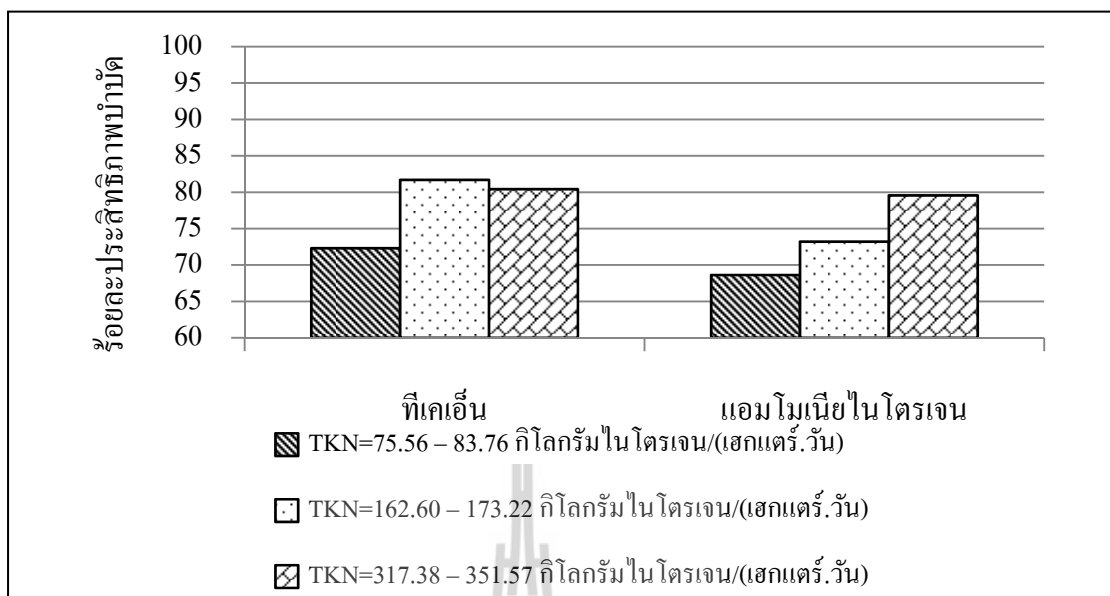
จากผลการทำสมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.37 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเฉลี่ย 165.938 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 1.060 กรัมต่อวัน และมีไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียร้อยละ 58.43 จะเห็นได้ว่ากลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยระบบแบบ FWS-SF (P) ส่วนใหญ่เกิดจากกลไกการกำจัดของหินดินดานและจุลินทรีย์ 0.832 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 94.76 รองลงมา ได้แก่ พืช ซึ่งมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น 0.046 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 5.24 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) ส่วนใหญ่การกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเกิดจากหินดินดาน และจุลินทรีย์ 0.806 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 94.60 รองลงมา ได้แก่ พืช โดยมีอัตราการกำจัด 0.046 กรัมต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 5.40 ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีของระบบแบบ FWS-SF (P) เท่ากับ 0.212 กรัมต่อวัน เมื่อนำมาคิดอัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนซึ่งมีค่าเท่ากับ 100:5 ดังนั้นการกำจัดไนโตรเจนโดยผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน จะมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 0.011 กรัมต่อวัน แต่จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าอัตราการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบมีค่าเท่ากับ 0.878 กรัมต่อวัน ดังนั้นกลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นส่วนที่เหลือนั้นจะถูกกำจัดโดยกลไกอื่น ๆ ได้แก่ พืช ซึ่งพบว่าพืชสามารถช่วยกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเท่ากับ 0.046 กรัมต่อวัน และกลไกการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นโดยหินดินดานมีอัตราการกำจัดเท่ากับ 0.821 กรัมต่อวัน (0.878-0.046-0.011) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของระบบนั้นส่วนใหญ่จึงเกิดจากการกำจัดของหินดินดาน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรตง (2554) พบว่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจนของหินดินดานอยู่ในช่วง 0.042-0.166 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการศึกษาครั้งนี้เมื่อคิดค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นของหินดินดาน เมื่อเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่ามีค่า 0.1036 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งน้อยกว่าผลการศึกษาของ อมรา ดาวโรตง (2554) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหินดินดานในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังคงมีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนได้อีก

ตารางที่ 4.37 สมดุลมวลของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น
317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

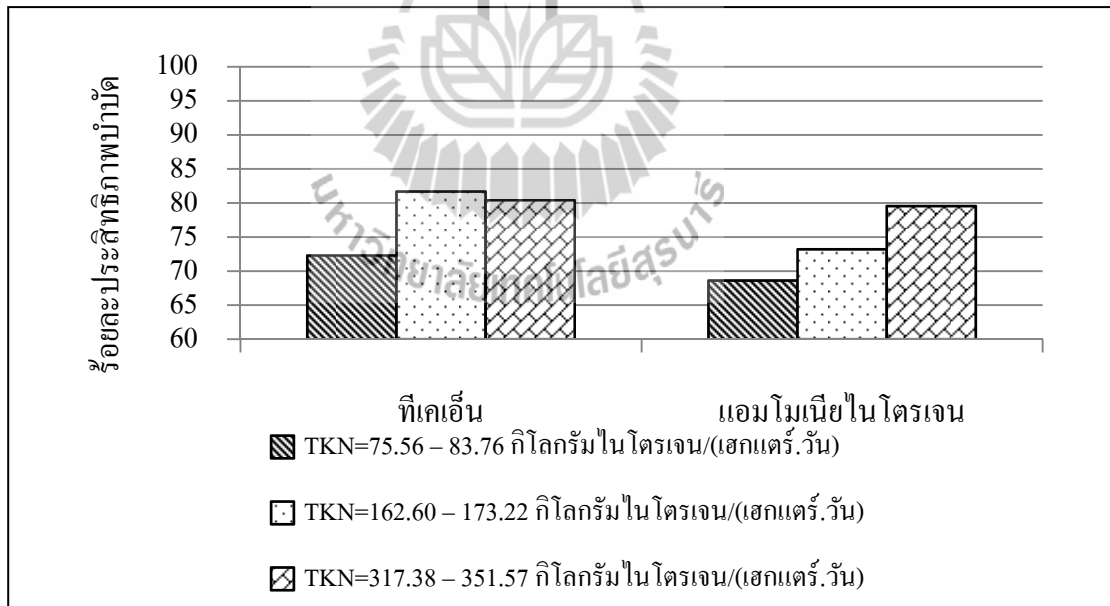
ไนโตรเจนเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ FWS-SF (P)				ไนโตรเจน ออกจากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
1.060	0.046	5.24	0.832	94.76	0.182
ไนโตรเจนเข้า ระบบ (g/day)	ระบบแบบ SF-FWS (P)				ไนโตรเจน ออกจากระบบ (g/day)
	อัตราการกำจัด ของพืช (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	อัตราการกำจัดของ หินดินดาน และ จุลินทรีย์ (g/day)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	
1.060	0.046	5.40	0.806	94.60	0.208

4.7.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตรา การระบรทุกไนโตรเจนแตกต่างกันของแต่ละระบบ

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นของที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนดังกล่าวข้างต้น เมื่อนำข้อมูลมาทดสอบความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี One way ANOVA ดังแสดงภาคผนวก ค พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นของระบบแบบ FWS-SF (P) ที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นสูงที่สุด มีค่าร้อยละ 84.14 ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน พบว่าที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงที่สุด มีค่าร้อยละ 82.48 สำหรับระบบแบบ SF-FWS (P) มีประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ็นสูงสุด ที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) โดยมีค่าร้อยละ 81.69 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงที่สุด ที่อัตราการระบรทุกสารไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) เท่ากับร้อยละ 79.56



รูปที่ 4.51 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ้น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุก
ไนโตรเจนแตกต่างกันของระบบแบบ FWS-SF (P)



รูปที่ 4.52 ประสิทธิภาพการบำบัดที่เคเอ้น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุก
ไนโตรเจนแตกต่างกันของระบบแบบ SF-FWS (P)

4.7.3 สรุปผลการบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นและแอมโมเนียในโตรเจน

จากผลการศึกษากการบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นและแอมโมเนียในโตรเจนของน้ำทิ้งสังเคราะห์โรงงานฟอกย้อมสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ระบบแบบ FWS-SF มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจนสูงกว่าระบบแบบ SF-FWS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกต้นอ้อ มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจนสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่ปลูกต้นอ้ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจน ที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ค่า นั้น พบว่าระบบแบบ FWS-SF และ ระบบแบบ SF-FWS นั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็นสูงสุดที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในโตรเจน พบว่าระบบแบบ FWS-SF และ ระบบแบบ SF-FWS มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียในโตรเจนสูงสุด ที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ดังนั้นในการบำบัดไนโตรเจนให้มีประสิทธิภาพ จึงควรนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอสเอสเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้โดยตรง
3. การเพิ่มอัตราการระบรทุกไนโตรเจนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียของระบบเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2-10
4. การเดินระบบเป็นระยะเวลา 212 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 เดินระบบที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 60.00-80.00 และ 60.00-75.00 ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 เดินระบบที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 172 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-85.00 และ 60.00-80.00 ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 3 เดินระบบที่อัตราการระบรทุกไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) เป็นระยะเวลา 100 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่เคเอ็น และแอมโมเนียในโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 70.00-85.00 และ 70.00-80.00 จากเดินระบบเป็นระยะเวลาสั้นจะเห็นได้ว่าระบบยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน

4.8 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของคลอโรฟิลล์ เอ และ บี และค่าน้ำหนักแห้งในพืช (จากชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3) ดังแสดงในตารางที่ 4.38 และ 4.39 หลังจากเดินระบบที่ 0.25 ของความเข้มข้นซีโอดี และสี่ข้อมของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม เป็นระยะเวลา 40 วัน พบว่าค่าคลอโรฟิลล์ เอ บี และค่าน้ำหนักแห้งของต้นอ้อยในช่วง 0.536-0.584 มิลลิกรัม 0.140-0.166 มิลลิกรัม และ 3.9978-5.6033 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับต้นอ้อยที่ปลูกในสภาวะปกติ (ปลูกในดิน ใกล้เคียงบริเวณที่ทำการศึกษาวิจัย) พบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี เท่ากับ 0.577 มิลลิกรัม และ 0.151 มิลลิกรัม ตามลำดับ และน้ำหนักแห้งเท่ากับ 5.7583 กรัม ซึ่งผลของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และน้ำหนักแห้งระหว่างต้นอ้อยที่ปลูกในสภาวะปกติกับต้นอ้อยที่ปลูกในชุดทดลองนั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าต้นอ้อยที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้มีอัตราการเจริญเติบโตปกติ และไม่พบลักษณะทางกายภาพที่ผิดปกติ

หลังจากเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.50 ของความเข้มข้นซีโอดีและสี่ข้อมของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม และเดินระบบเป็นระยะเวลา 72 วัน เก็บต้นอ้อย (จากชุดการทดลองที่ 2 และ 3) พบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และค่าน้ำหนักแห้งของต้นอ้อยในช่วง 0.538-0.585 มิลลิกรัม 0.161-0.189 มิลลิกรัม และ 7.4114-11.2561 กรัม ตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับต้นอ้อยที่ปลูกในสภาวะปกติพบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.574 0.168 มิลลิกรัม และเท่ากับ 10.9665 กรัม ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าต้นอ้อยที่ใช้ในการศึกษาสามารถเจริญเติบโตได้ปกติแม้ว่าจะทำการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำทิ้งเป็น 2 เท่า

หลังจากเพิ่มความเข้มข้นเป็น 1.00 ของความเข้มข้นซีโอดีและสี่ข้อมของน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม และเดินระบบเป็นระยะเวลา 100 วัน เก็บต้นอ้อย (จากชุดการทดลองที่ 3) พบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และค่าน้ำหนักแห้งของต้นอ้อยในช่วง 0.553-0.578, 0.159-0.175 มิลลิกรัม และ 16.8941-18.9466 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับต้นอ้อยที่ปลูกในสภาวะปกติที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และน้ำหนักแห้ง 0.571 0.171 มิลลิกรัม และ 19.3402 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีผลใกล้เคียงกัน แสดงว่าต้นอ้อยที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เจริญเติบโตได้อย่างปกติ

นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และน้ำหนักแห้งของต้นอ้อย (ชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3) หลังจากเดินระบบตลอดระยะเวลาการศึกษา 212 วัน พบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และค่าน้ำหนักแห้งของต้นอ้อยในช่วง 0.516-0.585, 0.146-0.188 มิลลิกรัม และ 13.7136-26.6402 กรัม ตามลำดับ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับต้นอ้อยที่ปลูกในสภาวะปกติพบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.566-0.586, 0.158-0.185 มิลลิกรัม และ 15.7520-27.1923 กรัม ตามลำดับ

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าต้นอ่อนในชุดทดลองทั้งหมดมีปริมาณคลอโรฟิลล์ และน้ำหนักรากแห้ง ไม่แตกต่างจากต้นอ่อนที่ปลูกในสภาวะปกติ แสดงให้เห็นว่าต้นอ่อนที่ปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีอัตราการเจริญเติบโตปกติ สามารถทนอยู่ในน้ำที่ฟอกย้อมได้จากงานวิจัยของ Davies et al. (2009) สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมเอโซเซซิดเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกต้นอ่อน ภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะเกิดกระบวนการทำลายสารพิษ (สี่ข้อม) จากกระบวนการดังกล่าวจะก่อให้เกิดสารอนุมูลอิสระ เช่น superoxide ion (O_2^-), Hydrogen peroxide (H_2O_2), Hydroxyl radical (OH^\cdot) (Asada, 2006) เพิ่มขึ้นในระบบ ทำให้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เกิดสภาวะเครียดออกซิเดชัน คือ สภาวะที่เกิดความไม่สมดุลของปริมาณอนุมูลอิสระ และสารต้านอนุมูลอิสระ ต้นอ่อนที่ปลูกในระบบมีเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระเช่น superoxide dismutase (SOD) catalase (CAT) peroxidase (POD) และ glutathione peroxidase (GPX) (Mittler and Zilinskas, 2003; Halliwell and Whiteman, 2004) ที่จะสามารถทำลายอนุมูลอิสระได้ ซึ่งเอนไซม์อยู่ในใบ และรากของต้นอ่อน ดังนั้นต้นอ่อนมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระ จึงทำให้ต้นอ่อนสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมได้

ตารางที่ 4.38 ปริมาณคดอโรฟิลล์เอ และบีในต้นอ้อย

OLR (ทีโลกริมซีไอดี/(เฮก แตร.วัน))	เวลาเดิน ระบบ (วัน)	ระบบแบบ FWS-SF											
		คดล้มแบบ FWS						คดล้มแบบ SF					
		ชุดที่1		ชุดที่2		ชุดที่3		ชุดที่1		ชุดที่2		ชุดที่3	
		เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี
97.36-127.31	40	0.572	0.143	0.559	0.166	0.584	0.145	0.540	0.142	0.576	0.141	0.564	0.140
	212	0.555	0.169	-	-	-	-	0.535	0.146	-	-	-	-
203.50-252.34	72	-	-	0.544	0.186	0.585	0.184	-	-	0.538	0.161	0.572	0.189
97.36-127.31 และ 203.50-252.34	212	-	-	0.528	0.186	-	-	-	-	0.545	0.159	-	-
386.82-477.38	100	-	-	-	-	0.556	0.175	-	-	-	-	0.578	0.159
97.36-127.31 ถึง 386.82-477.38	212	-	-	-	-	0.523	0.183	-	-	-	-	0.570	0.165

ตารางที่ 4.38 ปริมาณคอลลอยด์และบีโตน้อ (ต่อ)

OLR (กิโลกรัมซีโอไซด์(เฮก แตร์.วัน))	เวลาเดิน ระบบ (วัน)	ระบบแบบ SF-FWS											
		คอลลิม์แบบ SF						คอลลิม์แบบ FWS					
		ชุดที่1		ชุดที่2		ชุดที่3		ชุดที่1		ชุดที่2		ชุดที่3	
		เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี	เอ	บี
97.36-127.31	40	0.539	0.153	0.550	0.155	0.536	0.157	0.542	0.146	0.549	0.158	0.543	0.155
	212	0.559	0.188	-	-	-	-	0.516	0.155	-	-	-	-
203.50-252.34	72	-	-	0.557	0.171	0.585	0.178	-	-	0.538	0.170	0.572	0.176
	212	-	-	0.585	0.174	-	-	-	-	0.517	0.178	-	-
386.82-477.38	100	-	-	-	-	0.553	0.160	-	-	-	-	0.553	0.165
	212	-	-	-	-	0.546	0.152	-	-	-	-	0.559	0.149

ตารางที่ 4.39 ให้นำหนักแห้งของต้นอ้อ

OLR (กิโกลรัมซีโอ ดี/(เอกแตร์. วัน))	เวลาเดิน ระบบ (วัน)	ระบบแบบ FWS-SF						ระบบแบบ SF-FWS					
		คอลัมน์แบบ FWS			คอลัมน์แบบ SF			คอลัมน์แบบ SF			คอลัมน์แบบ FWS		
		ชุดที่1	ชุดที่2	ชุดที่3	ชุดที่1	ชุดที่2	ชุดที่3	ชุดที่1	ชุดที่2	ชุดที่3	ชุดที่1	ชุดที่2	ชุดที่3
97.36-127.31	40	5.6033	5.0369	5.4112	4.6678	4.5921	4.3586	4.1557	4.0804	3.9978	4.8556	4.6120	4.4782
	212	16.1358	-	-	13.9930	-	-	13.7136	-	-	14.5002	-	-
203.50-252.34	72	-	11.2561	10.9657	-	7.4114	7.8301	-	10.3667	9.8790	-	10.2407	10.5581
97.36-127.31 และ 203.50- 252.34	212	-	19.9937	-	-	16.8389	-	-	18.6422	-	-	19.3936	-
386.82-477.38	100	-	-	18.4202	-	-	16.8941	-	-	17.7022	-	-	18.9466
97.36-127.31 ถึง 386.82- 477.38	212	-	-	26.6402	-	-	24.1698	-	-	22.1729	-	-	23.9698

4.9 การพิจารณาเลือกระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

จากผลการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมข้างต้นนั้น เมื่อนำค่าคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ เปรียบเทียบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และกรมควบคุมมลพิษ โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ซีโอดี บีโอดี และไนโตรเจนทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ สามารถบำบัดน้ำทิ้งฟอกย้อมให้ผ่านค่ามาตรฐานได้เช่นเดียวกัน แต่สำหรับค่าสีนั้น ทั้งมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และกรมควบคุมมลพิษ ไม่ได้กำหนดเป็นตัวเลขที่ชัดเจน ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำระหว่างระบบ

ตารางที่ 4.40 คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และกรมควบคุมมลพิษ

พารามิเตอร์	มาตรฐานน้ำทิ้ง		น้ำทิ้งที่ออกจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	
	กรมโรงงานอุตสาหกรรม ¹	กรมควบคุมมลพิษ ²	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS
ซีโอดี (mg/l)	ไม่มากกว่า 400	ไม่มากกว่า 400	19.88-35.78	15.90-39.76
บีโอดี (mg/l)	ไม่มากกว่า 60	ไม่มากกว่า 60	2.00-4.25	2.50-5.75
สี (Pt Co)	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	2.72-13.47	2.72-9.88
ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/l)	ไม่มากกว่า 100	ไม่มากกว่า 100	24.64-32.21	27.30-37.67

หมายเหตุ : ¹ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

² ประกาศคณะกรรมการควบคุมมลพิษ วันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ.2539 และประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ ฉบับที่ 3 (2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานการระบายน้ำจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

การตัดสินใจว่าระบบแบบใดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมจะนำกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analysis Hierarchy Process, AHP) มาใช้ในกระบวนการการตัดสินใจ โดยการตั้งเกณฑ์ในการตัดสินใจ ให้ลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย และเรียงลำดับ

ดังต่อไปนี้ ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม สารอินทรีย์ ในโตรเจน และฟอสฟอรัส ตามลำดับ โดยดำเนินการตัดสินใจตามขั้นตอน ดังนี้

1. สร้างแผนภูมิลำดับชั้นหรือแบบจำลองของการตัดสินใจ



รูปที่ 4.53 แผนภูมิลำดับชั้น

2. สร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่โดยกำหนดมาตรฐานในการเปรียบเทียบ ดังนี้ (i แทน แถว j แทน คอลัมน์)

ถ้า $a_{ij} = 1/3$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญน้อยกว่า A_j

ถ้า $a_{ij} = 1$ หมายถึง ปัจจัย A_i และ A_j มีความสำคัญเท่ากัน

ถ้า $a_{ij} = 3$ หมายถึง ปัจจัย A_i มีความสำคัญมากกว่า A_j

จากการกำหนดมาตรฐานส่วนดังกล่าวสามารถสร้างตารางเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.41

ตารางที่ 4.41 เปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจต่าง ๆ

เกณฑ์ประสิทธิภาพบำบัด	สีเขียว	สารอินทรีย์	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส
สีเขียว	1	3	3	3
สารอินทรีย์	1/3	1	3	3
ไนโตรเจน	1/3	1/3	1	3
ฟอสฟอรัส	1/3	1/3	1/3	1
ผลรวมแนวตั้ง	2	4.66	7.33	10

3. จำนวนค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน สามารถทำได้โดยการปรับผลรวมของแต่ละคอลัมน์ให้เท่ากับ 1 จากนั้นคำนวณผลรวมของแต่ละแถว และหารผลรวมดังกล่าวด้วย จำนวนของเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ ซึ่งในกรณีนี้คือ 4 (ประสิทธิภาพการบำบัดสีเขียว สารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส) ดังแสดงในตารางที่ 4.42

ตารางที่ 4.42 จำนวนค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน

เกณฑ์ประสิทธิภาพบำบัด	สีเขียว	สารอินทรีย์	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	{(ผลรวมแนวนอน)/4}*100
สีเขียว	0.5	0.64	0.41	0.3	46.25%
สารอินทรีย์	0.17	0.22	0.41	0.3	27.5%
ไนโตรเจน	0.17	0.07	0.14	0.3	17%
ฟอสฟอรัส	0.16	0.07	0.04	0.1	9.25%
ผลรวมแนวตั้ง	1	1	1	1	100%

จากการคำนวณสรุปได้ว่า การศึกษาครั้งนี้ให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพในการบำบัดสีเขียวมากที่สุด (46.25%) รองลงมาคือ สารอินทรีย์ (27.5%) ไนโตรเจน (17%) และฟอสฟอรัส (9.25%) ตามลำดับ

4. นำทางเลือกที่กำหนดไว้ในตอนแรก ซึ่งก็คือ ระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS มาเปรียบเทียบผ่านเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจที่ละเกณฑ์ เพื่อจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก ดังแสดงในตารางที่ 4.43-4.46

ตารางที่ 4.43 เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพบำบัดสีข้อม

ประสิทธิภาพบำบัดสีข้อม	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS
ระบบแบบ FWS-SF	1	1/3
ระบบแบบ SF-FWS	3	1
ผลรวมแนวตั้ง	4	1.33

ตารางที่ 4.44 เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพบำบัดสารอินทรีย์

ประสิทธิภาพบำบัดสารอินทรีย์	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS
ระบบแบบ FWS-SF	1	3
ระบบแบบ SF-FWS	1/3	1
ผลรวมแนวตั้ง	1.33	4

ตารางที่ 4.45 เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพบำบัดไนโตรเจน

ประสิทธิภาพบำบัดไนโตรเจน	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS
ระบบแบบ FWS-SF	1	3
ระบบแบบ SF-FWS	1/3	1
ผลรวมแนวตั้ง	1.33	4

ตารางที่ 4.46 เปรียบเทียบผ่านเกณฑ์การตัดสินใจประสิทธิภาพบำบัดฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพบำบัดฟอสฟอรัส	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS
ระบบแบบ FWS-SF	1	1/3
ระบบแบบ SF-FWS	3	1
ผลรวมแนวตั้ง	4	1.33

5. ทำการปรับให้ผลรวมของแต่ละคอลัมน์เท่ากับ 1 และหาผลรวมแนวนอน หาค่าด้วยจำนวนทางเลือก ซึ่งในกรณีนี้คือ 2 (ระบบแบบ FWS-SF และระบบแบบ SF-FWS) ดังแสดงในตารางที่ 4.47-4.50

ตารางที่ 4.47 ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดสีข้อม)

ประสิทธิภาพบำบัดสีข้อม	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS	{(ผลรวม แนวนอน)/2}*100
ระบบแบบ FWS-SF	0.25	0.25	25%
ระบบแบบ SF-FWS	0.75	0.75	75%
ผลรวมแนวตั้ง	1	1	100%

ตารางที่ 4.48 ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดสารอินทรีย์)

ประสิทธิภาพบำบัด สารอินทรีย์	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS	{(ผลรวม แนวนอน)/2}*100
ระบบแบบ FWS-SF	0.75	0.75	75%
ระบบแบบ SF-FWS	0.25	0.25	25%
ผลรวมแนวตั้ง	1	1	100%

ตารางที่ 4.49 ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดไนโตรเจน)

ประสิทธิภาพบำบัด ไนโตรเจน	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS	{(ผลรวม แนวนอน)/2}*100
ระบบแบบ FWS-SF	0.75	0.75	75%
ระบบแบบ SF-FWS	0.25	0.25	25%
ผลรวมแนวตั้ง	1	1	100%

ตารางที่ 4.50 ปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ (ประสิทธิภาพบำบัดฟอสฟอรัส)

ประสิทธิภาพบำบัด ฟอสฟอรัส	ระบบแบบ FWS-SF	ระบบแบบ SF-FWS	{(ผลรวม แนวนอน)/2}*100
ระบบแบบ FWS-SF	0.25	0.25	25%
ระบบแบบ SF-FWS	0.75	0.75	75%
ผลรวมแนวตั้ง	1	1	100%

จากผลการวิเคราะห์เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจทั้งหมด พบว่าแต่ละระบบมีจุดเด่นแตกต่างกันไป กล่าวคือ ระบบแบบ FWS-SF มีจุดเด่นในเรื่องประสิทธิภาพบำบัดสารอินทรีย์ และไนโตรเจน แต่ในทางกลับกันระบบแบบ SF-FWS มีจุดเด่นในเรื่องประสิทธิภาพบำบัดสีข้อม และฟอสฟอรัส การคำนวณหาลำดับความสำคัญแต่ละทางเลือกในภาพรวม ดังแสดงในตารางที่ 4.51

ตารางที่ 4.51 ระดับความสำคัญ

ทางเลือก	สีข้อม (46.25%)	สารอินทรีย์ (27.5%)	ไนโตรเจน (17%)	ฟอสฟอรัส (9.25%)	ลำดับความสำคัญ
ระบบแบบ FWS-SF	$(0.25 \times 0.4625) + (0.75 \times 0.275) + (0.75 \times 0.17) + (0.25 \times 0.0925)$				36.84%
ระบบแบบ SF-FWS	$(0.75 \times 0.4625) + (0.25 \times 0.275) + (0.25 \times 0.17) + (0.75 \times 0.0925)$				52.75%

ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ปรากฏว่า ระบบแบบ SF-FWS มีความน่าสนใจมากที่สุดในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอส

ในการพิจารณาเลือกระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ มาใช้ในกระบวนการตัดสินใจ พบว่า ระบบแบบ SF-FWS และ ระบบแบบ FWS-SF มีค่าลำดับความสำคัญเท่ากับ 52.75% และ 36.84% ตามลำดับ ดังนั้นระบบแบบ SF-FWS จึงมีความน่าสนใจมากที่สุดในการนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส แต่อย่างไรในการพิจารณาควรมีการนำระยะเวลาในการอุดหนุนมาเพื่อประกอบการพิจารณาเลือกระบบ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเปรียบเทียบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านผิวดักกลาง มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อม สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อมของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

5.1.1.1 ระบบแบบ FWS-SF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี บีโอดี ทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนสูงกว่าระบบแบบ SF-FWS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ระบบแบบ SF-FWS มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงกว่าระบบแบบ FWS-SF อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระยะเวลาการเดินระบบ 40 72 และ 100 วัน ของแต่ละอัตราการระบายรทุกสาร

5.1.1.2 เมื่อเพิ่มอัตราการระบายรทุกสารสูงขึ้นจาก 0.25 0.50 และ 1.00 ของความเข้มข้นน้ำทิ้งที่ออกจากระบบเอเอส พบว่ามีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี บีโอดี ฟอสฟอรัสทั้งหมด และทีเคเอ็นลดลง ในขณะที่ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและแอมโมเนียไนโตรเจนเพิ่มขึ้น

5.1.1.3 ชุดทดลองที่ปลูกต้นอ้อ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี บีโอดี สีย้อม ฟอสฟอรัสทั้งหมด ทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจนสูงกว่าระบบที่ไม่ปลูกต้นอ้อ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้น ต้นอ้อจึงมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ สีย้อม ฟอสฟอรัส และไนโตรเจนของระบบสูงขึ้น

5.1.2 การศึกษาอัตราการระบายรทุกสารที่เหมาะสมจากน้ำทิ้งสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

5.1.2.1 การบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดี ให้มีประสิทธิภาพโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต้องทำการเจือจางน้ำทิ้งให้มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์เท่ากับ 0.25 ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบเอเอส

5.1.2.2 การบำบัดสีข้อมให้มีประสิทธิภาพโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอสเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้โดยตรง

5.1.2.3 การบำบัดฟอสฟอรัสให้มีประสิทธิภาพโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต้องทำการเจือจางน้ำทิ้งให้มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.25 ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบเอเอส

5.1.2.4 การบำบัดไนโตรเจนให้มีประสิทธิภาพโดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอสเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้โดยตรง

5.1.3 ต้นอ้อที่ปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในชุดทดลองทั้งหมดมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และน้ำหนักแห้ง ไม่แตกต่างจากต้นอ้อที่ปลูกในสภาวะปกติ แสดงให้เห็นว่าต้นอ้อมีอัตราการเจริญเติบโตอย่างปกติ สามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำทิ้งฟอกข้อมได้

5.1.4 จากการวิเคราะห์ทางเลือกของระบบโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์พบว่าระบบแบบ SF-FWS มีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านระบบเอเอส

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีอยู่แล้วของโรงงานฟอกข้อม ให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อม และสารอินทรีย์ต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอายุการใช้งานของระบบ เพื่อนำไปพิจารณาร่วมในการเดินระบบ

รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2546). เทคนิคการบำบัดน้ำเสียบางวิธี การนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์ และการทดสอบพิษวิทยาสำหรับน้ำทิ้ง. เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). หินแร่ คุณสมบัติ การจำแนก และวัฏจักร. ธรณีวิทยาวิศวกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.sdhabhon.com/Engineering%20Geology.html>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2542). คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.
- เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกูล. (2541). การควบคุมคุณภาพงานเตรียมสิ่งทอเพื่อการย้อม พิมพ์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ชัยยุทธ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม. (2543). เคมีประยุกต์. สำนักพิมพ์ ว.เพ็ชรสกุล, กรุงเทพฯ.
- ณัฐพันธ์ สุภกา กาญจนนา จันทองจีน และสมศักดิ์ ดำรงเลิศ. (2545). การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยแบคทีเรียด้วยกระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก. The Journal of Royal Institute of Thailand. 27: 692-699.
- เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. (2544). การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปิติพร มโนคุณ. (2554). สมดุลมวลเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปัทมา วิทยากร. (2533). ดิน:แหล่งอาหารของพืช. พิมพ์ครั้งที่1. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- พัฒน์ จันทรโรทัย. (2536). ข้อพิจารณาในการใช้พืชน้ำปรับปรุงคุณภาพน้ำ. วารสารวิทยาศาสตร์. 11(3): 154-157.
- ลักษณะ คณานินันท์. (2539). ประสิทธิภาพของกอกกลม รูปฤาษี อ้อ และแห้วทรงกระเทียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหุบโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.

- วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์. (2546). การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยการใส่กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศศิวิมล สุดแสน. (2554). การเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดักกลางในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาดุกกลมผสมภายใต้สภาวะอัตราภาระรับน้ำทางชลศาสตร์สูง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศุวศา กานตวนิชกูร. (2538). การบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศุวศา กานตวนิชกูร. (2544). รายงานการวิจัยเรื่อง การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ **Combined Constructed Wetland** ในเขตอากาศร้อน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2544). คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- สายรุ้ง นพขุนทด. (2554). การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุกานดา กาสังข์. (2548). การพัฒนาและปรับปรุงวัสดุดูดซับราคาถูกลงเพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์. (2548). การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา. (2538). โลกและหิน. โรงพิมพ์สุวีริยาสาส์น: กรุงเทพมหานคร.
- อภิชาติ สนธิสมบัติ. (2540). การปรับปรุงและเพิ่มผลผลิตในโรงย้อม. วารสารคัลเลอร์เวย์. ปีที่ 2. ฉบับที่ 11. หน้า 42-46.
- อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์. (2538). การกำจัดสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยจีเฝ้าลอยลิกันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อมรา ดาวโรสง. (2550). การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- อริศรา พุ่มคชา. (2539). การศึกษาสารดูดซับร่วมกับสารส้มในการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อังคณา อมรศรี. (2544). สีย้อม. วารสารคัลเลอร์เวย์. ปีที่ 6. ฉบับที่ 35. หน้า 16.
- อังคณา อมรศรี. (2546). มาตรการห้ามนำเข้าสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มที่ใช้สีอะโซที่มีสารโครเมียมเป็นองค์ประกอบ. วารสารคัลเลอร์เวย์. ปีที่ 9. ฉบับที่ 35. หน้า 65.
- Akhtar, S., Khan, A.A., and Husain, Q. (2005). Partially purified bitter gourd (*Momordica charantia*) peroxidase catalyzed decolorization of textile and other industrially important dyes. **Bioresources Technology**. 96: 1804-1811.
- Al-Qodah, Z. (2000). Adsorption of dyes using shale oil ash. **Water Research**. 34(17): 4295-4303.
- Amar, N.B., Kechaou, N., Palmeri, J., Deratani, A., and Sghaier, A. (2009). Comparison of tertiary treatment by nanofiltration and reverse osmosis for water reuse in denim textile industry. **Journal of Hazardous Materials**. 170: 111-117.
- Anjaneyulu, Y., Chary, N.S., and Raj, D.S.S. (2005). Decolourization of industrial effluents available methods and emerging technologies a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**. 4: 245-273.
- APHA, AWWA. and WEF. (2005). **Standard method for the examination of the water and wastewater**. Washington D. C.: American Public Health Association.
- Armstrong, J., Afreen-Zobayed, F., Blyth, S., and Armstrong, W. (1999). *Phragmites australis*: effects of shoot submergence on seedling growth and survival and radial oxygen loss from roots. **Aquatic Botany**. 64: 275-289.
- Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. **Plant Physiology**. 141: 391-396.
- ASTM. (2004). **Annual Book of ASTM Standard: Soil and rock**. 15.01. USA: Baltimore.
- Avlonitis, S.A., Poullos, L., Sotiriou, D., Pappas, M., and Moutesidis, K. (2008). Simulated cotton dye effluents treatment and reuse by nanofiltration. **Desalination**. 221: 259-267.
- Aydin, H., and Baysal, G. (2006). Adsorption of acid dyes in aqueous solutions by shells of bittim. **Desalination**. 196: 248-259.

- Azevedo, A., Martins, V., Prazeres, D., Vojinovic, V., Cabral, J., and Fonseca, L. (2003). Horseradish peroxidase: a valuable tool in biotechnology. **Biotechnology Annual Review**. 9: 199-247.
- Banat, F., Al-Asheh, S., and Al-Makhadmeh, L. (2003). Evaluation of the use of raw and activated date pits as potential adsorbents for dye containing waters. **Process Biochemistry**. 39: 193-202.
- Banat, I., Nigam, P., Singh, D., and Marchant, R. (1996). Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents: a review. **Bioresource Technology**. 58(3): 217-227.
- Banat, I.M., McMullan, G., Meehan, C., Kirby, N., Nigam, P., Smyth, W.F., and Marchant, R. (1999). **Microbial decolorization of textile dyes present in textile industries effluent**. In: Proceedings of the Industrial Waste Technical Conference. 1-16.
- Basibuyuk, M., and Forster, C.F. (1997). The use of sequential anaerobic/aerobic processes for the biotreatment of a simulated dyeing wastewater. **Environmental Technology**. 18: 843-848.
- Bes-Piá, A., Iborra-Clar, A., García-Figueruelo, C., Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M.I., Mendoza-Roca, J.A., and Iborra-Clar, M.I. (2009). Comparison of three NF membranes for the reuse of secondary textile effluents. **Desalination**. 241: 1-7.
- Bhunia, A., Durani, S., and Wangikar, P.P. (2001). Horseradish peroxidase catalyzed degradation of industrially important dyes. **Biotechnology and Bioengineering**. 72: 562-567.
- Bigda, R.J. (1995). Consider Fenton's chemistry for wastewater treatment. **Chemical Engineering Progress**. 91(12): 62-66.
- Bisschops, I.A.E., and Spanjers, H. (2003). Literature review on textile wastewater characterization. **Environmental Technology**. 24: 1399-1411.
- Braeckevelt, M., Mirschel, G., Wiessner, A., Rueckert, M., Reiche, N., Vogt, C., Schultz, A., Paschke, H., Kusch, P., and Kaestner, M. (2008). Treatment of chlorobenzene contaminated ground water in a pilot-scale constructed wetland. **Ecological Engineering**. 33: 45-53.
- Brix, H. (1987). Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the root zone method. **Water Science and Technology**. 19: 107-118.

- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed wetlands?. **Water Science and Technology**. 35(5): 11-17.
- Brix, H., Arias, C.A., and Del Bubba, M. (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**. 44: 47-54.
- Bubba, M.D., Arias, C.A., and Brix, H. (2003). Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in surface flow constructed wetlands as measured by the Langmuir isotherm. **Water Research**. 37: 3390-3400.
- Buckly, C.A. (1992). Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents. **Water Science and Technology**. 25: 203-209.
- Bulc, T.G. (2006). Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. **Ecological Engineering**. 26: 365-374.
- Bulc, T.G., and Ojstršek, A. (2008). The use of constructed wetland for dye-rich textile wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**. 155: 76-82.
- Cameron, K., Madramootoo, C., Crolla, A., and Kinsley, C. (2003). Pollutant removal from municipal sewage lagoon effluents with a free-surface wetland. **Water Research**. 37: 2803-2812.
- Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., Buckley, C.A., Mulholand, D.A., and Senior, E. (1995). Microbial decolourisation of a reactive azo dye under anaerobic conditions. **Water SA**. 21: 61-69.
- Carrott, P.J.M., Ribeiro, C., and Roberts, R.A. (1991). Physical adsorption of gases by microporous carbon. **Colloids and Surface**. 58: 385-400.
- Charoenlarp, K., and Choyphan, W. (2009). Reuse of dye wastewater through colour removal with electrocoagulation process. **Asian Journal on Energy and Environment**. 10(4): 250-260.
- Cheremisinoff, N.P. (2002). **Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies**. Butterworth-Heinemann, Boston.
- Choy, K.K.H., McKay, G., and Porter, J.F. (1999). Sorption of acid dyes from effluents using activated carbon. **Conservation and Recycling**. 27: 57-71.

- Christie, R.M. (2007). **Environmental Aspects of Textile Dyeing**. Woodhead, Boca Raton, Cambridge.
- Chung, K.T. (2000). Mutagenicity and carcinogenicity of aromatic amines metabolically produced from azo dyes. **Journal of Environmental Science and Health, Part C**. 18: 51-74.
- Ciabatti, I., Tognotti, F., and Lombardi, L. (2010). Treatment and reuse of dyeing effluents by potassium ferrate. **Desalination**. 250: 222-228.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B., and Shutes, R.B. (1996). **Reed beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**. WRc Swindon. UK.
- Correia, V.M., Stephenson, T., and Judd, S.J. (1994). Characterisation of textile wastewaters: a review. **Environmental Technology**. 15: 917-929.
- Coughlin, M.F., Kinkle, B.K., and Bishop, P.L. (2002). Degradation of acid orange 7 in an aerobic biofilm. **Chemosphere**. 46: 11-19.
- Davies, L.C., Cabrita, G.J.M., Ferreira, R.A., Carias, C.C., Novais, J.M., and Dias, S.M. (2009). Integrated study of the role of *Phragmites australis* in azo-dye treatment in a constructed wetland: From pilot to molecular scale. **Ecological Engineering**. 35: 961-970.
- Davies, L.C., Carias, C.C., Novais, J.M., and Dias, S.M. (2005). Phytoremediation of textile effluents containing azo dye by using *Phragmites australis* in a vertical flow intermittent feeding constructed wetland. **Ecological Engineering**. 25: 594-605.
- Davies, T.H., and Cottingham, P.D. (1994). The use of constructed wetlands for treating industrial effluent (textile dyes). **Water Science and Technology**. 29(4): 227-232.
- Delée, W., O'Neill, C., Hawkes, F.R., and Pinheiro, H.M. (1998). Anaerobic treatment of textile effluents: a review. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. 73: 323-335.
- Demir, A., Gunay, A., and Debik, E. (2002). Ammonium removal from aqueous solution by ion exchange using packed bed natural zeolite. **Water SA**. 28: 329-335.
- Dhale, A.D., and Mahajani, V.V. (2000). Studies in treatment of disperse dye waste: membrane-wet oxidation process. **Waste Manage**. 20(1): 85-92.
- Dos Santos, A.B., Bisschops, I.A.E., and Cervantes, F.J. (2006a). **Closing process water cycles and product recovery in textile industry: perspective for biological treatment**. In: Cervantes, F.J., Van Haandel, A.C., Pavlostathis, S.G. (Eds), *Advanced Biological Treatment Processes for Industrial Wastewaters*. 1: 298-320.

- Dos Santos, A.B., Cervantes, F.J., and Van Lier, J.B. (2004). Azo dye reduction by thermophilic anaerobic granular sludge, and the impact of the redox mediator AQDS on the reductive biochemical transformation. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 64: 62-69.
- Dos Santos, A.B., Cervantes, F.J., and Van Lier, J.B. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology. **Bioresource Technology**. 98: 2369-2385.
- Dos Santos, A.B., Cervantes, F.J., Yaya-Beas, R.E., and Van Lier, J.B. (2003). Effect of redox mediator, AQDS, on the decolourisation of a reactive azo dye containing triazine group in a thermophilic anaerobic EGSB reactor. **Enzyme and Microbial Technology**. 33: 941-951.
- Drizo, A. (1998). **Phosphate and ammonium removal from wastewater using constructed wetland systems**. Ph.D. thesis, University of Edinburgh.
- Drizo, A., Frost, C.A., Smith, C.A., and Grace, J. (1997). Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Science and Technology**. 35: 95-102.
- Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J., and Smith, K.A. (1999). Physical-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. **Water Research**. 33(17): 3595-3602.
- Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J., and Smith, K.A. (2000). Phosphate and ammonium distribution in pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Research**. 34(9): 2483-2490.
- El-Gohary, F., and Tawfik, A. (2009). Decolorization and COD reduction of disperse and reactive dyes wastewater using chemical-coagulation followed by sequential batch reactor (SBR) process. **Desalination**. 249: 1159-1164.
- Fersi, C., and Dhahbi, M. (2008). Treatment of textile plant effluent by ultrafiltration and/or nanofiltration for water reuse. **Desalination**. 222: 263-271.
- Field, J.A., Stams, A.J.M., Kato, M., and Schraa, G. (1995). Enhanced biodegradation of aromatic pollutants in co-cultures of anaerobic and aerobic bacterial consortia. **Antonie van Leeuwenhoek**. 67: 47-77.

- Forbes, G., Margaret, D.L., Kenneth, S.F., and Waller, T.W. (2005). Recovery and fraction of phosphorus retained by lightweight expanded shale and masonry sand used as media in subsurface flow treatment wetlands. **Environmental Science and Technology**. 39: 4621-4627.
- Fu, Y.Z., Wen, X.H., Lu, Q.Y., and Qian, Y. (2001). Treatment of dyeing wastewater in two SBR systems. **Process Biochemistry**. 36: 1111-1118.
- Galinato, M.I., and van der Valk, A.G. (1986). Seed germination traits of annuals and emergents recruited during drawdowns in the Delta Marsh, Manitoba, Canada. **Aquatic Botany**. 26: 89-102.
- Georgiou, D., Aivazidis, A., Hatiras, J., and Gimouhopoulos, K. (2003). Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate. **Water Research**. 37: 2248-2250.
- Gingell, R., and Walker, R. (1971). Mechanism of azo reduction by *Streptococcus faecalis* II The role of soluble flavins. **Xenobiotica**. 1: 231-239.
- Gottlieb, A., Shaw, C., Smith, A., Wheatley, A., and Forsythe, S. (2003). The toxicity of textile reactive azo dyes after hydrolysis and decolourisation. **Journal of Biotechnology**. 101: 49-56.
- Gozálvez-Zafrilla, J.M., Sanz-Escribano, D., Lora-García, J., and León Hidalgo, M.C. (2008). Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry. **Desalination**. 222: 272-279.
- Grüneberg, B., and Kern, J. (2001). Phosphorus retention capacity of iron-ore and blast furnace slag in subsurface flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**. 44: 69-75.
- Hai, F.I., Yamamoto, K., and Fukushi, K. (2007). Hybrid treatment systems for dye wastewater. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. 37: 315-377.
- Halliwell, B., and Whiteman, M. (2004). Measuring reactive species and oxidative damage in vivo and in cell culture: how should you do it and what do results mean. **British Journal of Pharmacology**. 142: 231-255.
- Harris, S.W., and Marshall, W.H. (1960). Germination and planting experiments on soft-stem and hard-stem bulrush. **Journal of Wildlife Management**. 24(2): 134-139.

- Hatch, K.I., and Maibach, H.I. (1999). **Dye as contact allergens: a comprehensive record.** *Textile Chemist and Colorist & American Dyestuff Reporter*. 1: 53-59.
- Heinss, U., and Kootatep, T. (1998). **Use of Reed Beds for Faecal Sludge Dewatering.** EAWAG/AIT. Unpublished report.
- Jiang, H., Zhang, G., Huang, T., Chen, J., Wang, Q., and Meng, Q. (2010). Photocatalysis membrane reactor for degradation of Acid red B wastewater. **Chemical Engineering Journal**. 156: 571-577.
- Joseph, E.I. (2007). Wastewater treatment in the textile industry. **Pakistan Textile Journal**. 60-66.
- Kace, J.S., and Linford, H.B. (1975). Reduced cost flocculation of a textile dyeing wastewater. **Journal Water Pollution Control Federation**. 47: 1971-1977.
- Kadirvelu, K., Palanival, M., Kalpana, R., and Rajeswari, S. (2000). Activated carbon from an agricultural by-product for the treatment of dyeing industry wastewater. **Bioresource Technology**. 74: 263-265.
- Kadlec, R.H., and Knight, R.L. (2006). *Treatment Wetlands*. Boca Raton, FL: CRC Press LLC.
- Karcher, S., Kornmuller, A., and Jekel, M. (2001). Screening of commercial sorbents for the removal of reactive dyes. **Dyes and Pigments**. 51: 111.
- Khaled, A., El-Nemr, A., El-Sikaily, A., and Abdelwahab, O. (2009). Treatment of artificial textile dye effluent containing direct yellow 12 by orange peel carbon. **Desalination**. 238: 210-232.
- Khelifi, E., Gannoun, H., Touhami, Y., Bouallagui, H., and Hamdi, M. (2008). Aerobic decolorization of the indigo dye-containing textile wastewater using continuous combined bioreactors. **Journal of Hazardous Materials**. 152: 683-689.
- Kim, T.H., Park, C., Yang, J., and Kim, S. (2004). Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation. **Journal of Hazardous Materials**. 112: 95-103.
- Kootatep, T. (1993). **Color removal from textile finishing wastewater.** Master of Engineering Environmental Engineering Program, Asian Institute of Technology. 47-48.
- Kuo, W.G. (1992). Decolorizing dye waste-water with fenton reagent. **Water Research**. 26: 881-886.

- Lee, Y.H., Matthews, R.D., and Pavlostathis, S.G. (2006). Biological decolorization of reactive anthraquinone and phthalocyanine dyes under various oxidation-reduction conditions. **Water Environmental Research**. 78: 156-169.
- Levenspiel, O. (1972). **Chemical Reaction Engineering**, John Wiley and Sons, New York, NY, Ch 9.
- Lim, P.E., Wong, T.E., and Lim, D.V. (2001). Oxygen demand nitrogen and copper removal by free-water-surface and subsurface-flow constructed wetlands under tropical conditions. **Environment International**. 26: 425-431.
- Lin, S.H., and Peng, C.F. (1995). Treatment of textile wastewater by Fenton's reagent. **Journal of Environmental Science and Health Part A**. 30: 89-101.
- Lin, Y.F., Jing, S.R., Lee, D.Y., and Wang, T.W. (2002). Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. **Aquaculture**. 209: 169-184.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., and Parker, J. (2003). **Brock Biology of Microorganisms** 10th ed. Prentice-Hall Inc, Simon&Schuster/A Viacom Company, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Maine, M.A., Sune, N., and Hadad, H. (2006). Nutrient and metal removal in a constructed wetland for wastewater treatment from a metallurgic industry. **Ecological Engineering**. 26: 341-347.
- Maine, M.A., Sune, N., Hadad, H., Sánchez, G., and Bonetto, C. (2009). Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. **Journal of Environmental Management**. 90: 355-363.
- Malik, P.K. (2003). Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36. **Dyes and Pigments**. 56: 239-249.
- Mantovi, P., Marmiroli, M., Maestri, E., Tagliavini, S., Piccinini, S., and Marmiroli, N. (2003). Application of a horizontal subsurface flow constructed wetland on treatment of dairy parlor wastewater. **Bioresources Technology**. 88: 85-94.
- Manu, B., and Chaudhari, S. (2002). Anaerobic decolorisation of simulated textile wastewater containing azo dyes. **Bioresource Technology**. 82: 225-231.

- Marcucci, M., Nosenzo, G., Capannelli, G., Ciabatti, I., Corrieri, D., and Ciardelli, G. (2001). Treatment and reuse of textile effluents based on new ultrafiltration and other membrane technologies. **Desalination**. 138: 75-82.
- Marks, M., Lapin, B., and Randall, J. (1994). *Phragmites australis (P. communis)*: threats, management and monitoring. **Natural Areas Journal**. 14: 285-294.
- Martin Marietta Material. (2004). **Material Safety Data Sheet of Shale Rock** (Online). Available: <http://www.martinmarietta.com/Products/MSDS-Shale.pdf>
- Masayuki, N., Chizoko, Y., Norihisa, I., and Yukio, K. (2001). Putative ACP Phosphodiesterase Gene (*acpD*) Encodes an Azoreductase. **Journal of Biological Chemistry**. 7(276): 46394-46399.
- Mattioli, D., Malpei, F., Bortone, G., and Rozzi, A. (2002). **Water minimization and reuse in textile industry**. Water Recycling and Resource Recovery in Industry: Analysis, Technologies and Implementation. IWA Publishing, Cornwall, UK, 677.
- Mbuligwe, S.E. (2005). Comparative treatment of dye-rich wastewater in engineered wetland systems (EWSs) vegetated with different plant. **Water Research**. 39: 271-280.
- Metcalf and Eddy. (2003). **Wastewater engineering, treatment and reuse** (4th ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Meric, S., Kaptan, D., and Tunay, C. (2003). Removal of color and COD from a mixture of four reactive azo dyes using Fenton oxidation process. **Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**. 38: 2241-2250.
- Merzouk, B., Madani, K., and Sekki, A. (2010). Using electrocoagulation-electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater two case studies. **Desalination**. 250: 573-577.
- Mishra, A., and Bajpai, M. (2006). The flocculation performance of Tamarindus mucilage in relation to removal of vat and direct dyes. **Bioresource Technology**. 97: 1055-1059.
- Mishra, A., Bajpai, M., and Pandey, S. (2006). Removal of dyes by biodegradable flocculants: a lab scale investigation. **Separation Science and Technology**. 41: 583-593.
- Mittler, R., and Zilinskas, B. (2003). Activated oxygen species in multiple stress situations and protective systems. **Molecular Ecotoxicology of Plant**. pp. 51-73.

- Myslak, Z.W., Bolt, H.M., and Brockmann, W. (1991). Tumors of the urinary bladder in painters: a case-control study. **American Journal of Industrial Medicine**. 19: 705-713.
- Namasivayam, C., and Sumithra, S. (2005). Removal of directred 12B and methylene blue from water by adsorption onto Fe(III)/Cr(III) hydroxide, an industrial solid waste. **Journal of Environmental Management**. 74: 207-215.
- Namoodri, C.G., Perkins, W.S., and Walsh, W.K. (1994a). **Decolorizing dyes with chlorine and ozone: Part I**. American Dyestuff Reporter. 83: 17-22.
- Namoodri, C.G., Perkins, W.S., and Walsh, W.K. (1994b). **Decolorizing dyes with chlorine and ozone: Part II**. American Dyestuff Reporter. 83: 17-26.
- Nasiman, S. (1996). Treatment and reuse of textile wastewater by overland flow. **Desalination**. 106: 179-182.
- Ojstršek, A., Fakin, D., and Vrhovsek, D. (2007). Residual dye bath purification using a system of constructed wetland. **Dyes and Pigments**. 74: 503-507.
- Oliveira, G.A.R., Ferraz, E.R.A., Chequer, F.M.D., Grando, M.D., Angeli, J.P.F., Tsuboy, M.S., Marcarini, J.C., Mantovani, M.S., Osugi, M.E., Lizier, T.M., Zanoni, M.V.B., and Oliveira, D.P. (2010). **Chlorination treatment of aqueous samples reduces, but does not eliminate, the mutagenic effect of the azo dyes Disperse Red 1, Disperse Red 13 and Disperse Orange 1**. Mutation Research. 703: 200-208.
- Ollgaard, H., Frost, L., Galster, J., and Hensen, O.C. (1999). **Survey of Azo-colorants on Denmark: Milgoproject 590**. Danish Environmental Protection Agency.
- O'Neill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., Estves, S., and Wilcox, S.J. (2000). Anaerobic-aerobic biotreatment of simulated textile effluent containing varied ratios of starch and azo dye. **Water Research**. 34(8): 2355-2361.
- Ong, S.A., Toorisaka, E., Hirata, M., and Hano, T. (2005a). Decolorization of azo dye (Orange II) in a sequential UASB-SBR system. **Separation and Purification Technology**. 42: 297-302.
- Ong, S.A., Uchiyama, K., Inadama, D., and Yamagiwa, K. (2009). Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland. **Journal of Hazardous Materials**. 165(1-3): 696-703.

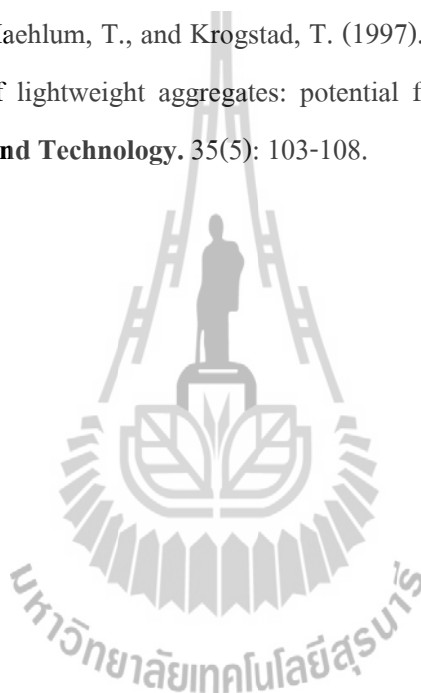
- Orhon, D., Babuna, F.G., and Insel, G. (2001). Characterization and modeling of denim-processing wastewaters for activated sludge. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. 76: 919-931.
- Ozacar, M., and Sengil, I.A. (2003). Adsorption of acid dyes from aqueous solutions by calcined alunite and granular activated carbon. **Adsorption**. 8: 301-308.
- Paikary, S., Banerjee, S., and Mukherji, S. (2005). Sorption of arsenic on to Vindhyan shales: Role of pyrite and organic carbon. **Current Science**. 88(10): 1580-1585.
- Paul, J. (2008). **Removal of COD and colour from textile wastewater using limestone and activated carbon**. Master Thesis Universiti Sains Malaysia.
- Pearce, C.I., Lloyd, J.R., and Guthrie, J.T. (2003). The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review. **Dyes and Pigments**. 58: 179-196.
- Pimpan, P., and Jindal, R. (2009). Mathematical modeling of cadmium removal in free water surface constructed wetlands. **Journal of Hazardous Materials**. 163: 1322-1331.
- Pizzolato, T.M., Carissimi, E., Machado, E.L., and Schneider, I.A.H. (2002). Colour removal with NaClO of dye wastewater from an agate-processing plant in Rio Grande do Sul, Brazil. **International Journal of Mineral Processing**. 65: 203-211.
- Poggi-Varaldo, H.M., Gutiérrez-Saravia, A., Fernández-Villagómez, G., Martínez-Pereda, P., and Rinderknecht-Seijas, N. (2002). **A full-scale system with wetlands for slaughterhouse wastewater treatment**. In: Nehring, K.W., Brauning, S.E. (Eds.), *Wetlands and Remediation II*. Battelle Press. Columbus. pp. 213-223.
- Polprasert, C. (2004). **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Principles and Practices**. *Developments in Ecosystems*. 1: 285-310.
- Prochaska, C.A., and Zouboulis, A.I. (2006). Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. **Ecological Engineering**. 26: 293-303.
- Project, S.E.A.M. (1999). *Textile Sector Report: Cleaner Production Opportunities*. (Egypt).
- Qin, J.J., Oo, M.H., and Kekre, K.A. (2007). Nanofiltration for recovering wastewater from a specific dyeing facility. **Separation and Purification Technology**. 56: 199-203.

- Rai, H.S., Bhattacharyya, M.S., Singh, J., Bansal, T.K., Vats, P., and Banerjee, U.C. (2005). Removal of dyes from the effluent of textile and dyestuff manufacturing industry: a review of emerging techniques with reference to biological treatment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. 35: 219-238.
- Ramirez, J.H., Costa, C.A., and Madeira, L.M. (2005). **Experimental design to optimize the degradation of the synthetic dye Orange II using Fenton's reagent**. *Catalysis Today*. 107-108: 68-76.
- Reed, S.C. (1993). **Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment**. EPA.
- Reed, R.C., Middlebrooks, E.J., and Crites, R.W. (1988). **Natural Systems for Waste Management and Treatment**. McGraw-Hill, New York.
- Richardson, C.J., and Marshall, P.E. (1986). Processes controlling movement, storage and export of phosphorus in a fen peatland. **Ecological Monographs**. 56: 279-302.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., and Nigam, P. (2001). Remediation of dye in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**. 77: 247-255.
- Sakadevan, K., and Bavor, H.J. (1998). Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. **Water Research**. 37: 393-399.
- Scheeren, C., Paniz, J., and Martins, A. (2002). Comparison of advanced processes on the oxidation of acid orange 7 dye. **Journal of Environmental Science and Health**. 37(7): 1253-1261.
- Schulz, C., Gelbrecht, J., and Rennert, B. (2003). Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. **Aquaculture**. 217: 207-221.
- Scholz, M., and Xu, J. (2002). Performance comparison of experimental constructed wetlands with different filter media and macrophytes treating industrial wastewater contaminated with lead and copper. **Bioresource Technology**. 83: 71-79.
- Schwitzguébel, J.P., and Vanek, T. (2003). **Some fundamental advances for xenobiotic chemicals**. *Phytoremediation Transformation and Control of Contaminants*.

- Shaffiqu, T.S., Roy, J.J., Nair, R.A., and Abraham, T.E. (2002). Degradation of textile dyes mediated by plant peroxidases. **Applied Biochemistry and Biotechnology**. 102-103: 315-326.
- Shu, H.Y., and Chang, M.C. (2005). Decolorization effects of six azo dyes by O₃, UV/O₃ and UV/H₂O₂ processes. **Dyes and Pigments**. 65: 25-31.
- Sponza, D.T., and Isik, M. (2002). Decolorization and azo dye degradation by anaerobic/aerobic sequential process. **Enzyme and Microbial Technology**. 31: 102-110.
- Steiner, G.R., and Freeman, R.J. (1989). Configuration and substrate design considerations for constructed wetlands wastewater treatment. **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural**. Michigan: Lewis.
- Stolz, A. (2001). **Basic and applied aspects in the microbial degradation of azo dyes**. Applied Microbiology and Biotechnology. 56: 69-80.
- Stottmesiter, U., Wießner, A., Kuschhk, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R.A., and Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. **Biotechnology Advances**. 22: 93-117.
- Subramaniam, S., Sivasubramanian, S., Swaminathan, K., and Lin, F.H. (2009). **Metabolically Inactive *Trichoderma harzianum* Mediated Adsorption of Synthetic Dyes: Equilibrium and Kinetic Studies**. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 40: 394.
- Sundrarajan, M., Vishnu, G., and Joseph, K. (2007). Ozonation of light-shaded exhausted reactive dye bath for reuse. **Dyes and Pigments**. 75: 273-278.
- Suthersan, S.S. (2002). **Natural and Enhanced Remediation Systems**. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 419.
- Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C., and Kaul, S.N. (2001). A comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and Fenton reagent. **Water Resources**. 35: 2129-2136.
- Tucker, G.C. (1990). The genera of Arundinoideae (Gramineae) in the southeastern United States. **Journal of the Arnold Arboretum**. 71: 145-163.
- Tunay, O., Kabdasli, I., Eremektar, G., and Orhon, D. (1996). Color removal from textile wastewaters. **Water Science and Technology**. 34(11): 9-16.

- U.S. EPA. (2000). **Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment**. Ohio: United States Environmental Protection Agency.
- Veitch, N. (2004). **Horseradish peroxidase: a modern view of classic enzyme**. *Phytochemistry*. 65: 249-259.
- Verma, A.K., Dash, R.R., and Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management**. 93: 154-168.
- Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. **Ecological Engineering**. 35: 1-17.
- Vymazal, J., and Kropfelova, L. (2007). **Removal of organics in constructed wetlands horizontal sub-surface flow: a review of the field experience**. *Science of the total Environment*. 407: 3911-3922.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., and Haberl, R. (1998). **Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe**. Backhuys Publishers. Leiden. Netherlands.
- Wang, S. (2008). A Comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater. **Dyes and Pigments**. 76: 714-720.
- Watson, J.T., and Hobson, J.S. (1989). Hydraulic design considerations and control structures for constructed wetlands wastewater treatment. **Lewis Publishers**. pp 379-391.
- Whitham, F.H., Blaydes, D.F., and Delvin, R.M.I. (1971). **Experiments in plant physiology**. van Nostrand, New York, pp. 232-245.
- Yang, Y., and Xu, L. (1996). **Reusing hydrolyzed reactive dyebath for nylon and wool dyeing**. *Am Dyestuff Rep*. 3: 27-34.
- Yue, Q.Y., Gao, B.Y., Wang, Y., Zhang, H., Sun, X., Wang, S.G., and Gu, R.R. (2008). Synthesis of polyamine flocculants and their potential use in treating dye wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. 152: 221-227.
- Yusuff, R.O., and Sonibare, J.A. (2004). Characterization of textile industries effluents in Kaduna, Nigeria and pollution implications. **Global Nest: the International Journal**. 6(3): 212-221.

- Zachritz, W.H., and Jacquez, R.B. (1993). **Treating intensive aquaculture recycled water with a constructed wetlands filter system.** In: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers. Boca Raton. pp. 609-614.
- Zee, F.P., and Villaverde, S. (2005). Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes-A short review of bioreactor studies. **Water Research**. 39: 1425-1440.
- Zee, F.V., Bisschops, I., Blanchard, V., Bouwman, R., Lettinga, G., and Field, J. (2003). The contribution of biotic and abiotic processes during azo dye reduction in anaerobic sludge. **Water Resources**. 37(13): 3098-3109.
- Zhu, T., Jenssen, P.D., Maehlum, T., and Krogstad, T. (1997). Phosphorus sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates: potential filter media in treatment wetlands. **Water Science and Technology**. 35(5): 103-108.





ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราการไหลและอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์

การคำนวณอัตราการไหล

1. การคำนวณอัตราการไหล

$$Q_{\text{ระบบ}} = \frac{[LW(d_{\text{nn}} + d_w)] + [LW(nd_w)]}{t}$$

$$= \frac{\frac{\pi (0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5] + \frac{\pi (0.2)^2}{4} [0.35 \times 0.7]}{4}$$

$$= 0.00639 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน}$$

การคำนวณอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์

2. การคำนวณอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์

ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี 47.84-62.56 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$OLR = \frac{Q \times COD}{A}$$

$$= \frac{0.00639 \times 47.84 \times 10000}{\frac{\pi (0.2)^2}{4} \times 1000}$$

$$= 97.36 \text{ กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)}$$

$$OLR = \frac{Q \times COD}{A}$$

$$= \frac{0.00639 \times 62.56 \times 10000}{\frac{\pi (0.2)^2}{4} \times 1000}$$

$$= 127.31 \text{ กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)}$$

ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี 100.00-124.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{Q \times \text{COD}}{A} \\ &= \frac{0.00639 \times 100.00 \times 10000}{\frac{\pi(0.2)^2}{4} \times 1000} \\ &= 203.50 \text{ กิโลกรัมซีไอดี/}(เฮกเตอร์ \cdot \text{วัน}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{Q \times \text{COD}}{A} \\ &= \frac{0.00639 \times 124.00 \times 10000}{\frac{\pi(0.2)^2}{4} \times 1000} \\ &= 252.34 \text{ กิโลกรัมซีไอดี/}(เฮกเตอร์ \cdot \text{วัน}) \end{aligned}$$

ความเข้มข้นสารอินทรีย์ ซีไอดี 190.08-234.58 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{Q \times \text{COD}}{A} \\ &= \frac{0.00639 \times 190.08 \times 10000}{\frac{\pi(0.2)^2}{4} \times 1000} \\ &= 386.82 \text{ กิโลกรัมซีไอดี/}(เฮกเตอร์ \cdot \text{วัน}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{Q \times \text{COD}}{A} \\ &= \frac{0.00639 \times 234.58 \times 10000}{\frac{\pi(0.2)^2}{4} \times 1000} \\ &= 477.38 \text{ กิโลกรัมซีไอดี/}(เฮกเตอร์ \cdot \text{วัน}) \end{aligned}$$



ข 1. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ FWS-SF (P) ของชุดการทดลองที่ 1

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3955.078}{56.313} = 70.23 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{689.595}{26.650} = 25.88 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 70.23 + 25.88 = 96.11 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{322758.149}{56.313} \right] - 70.23^2 = 799.25$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{22017.213}{26.65} \right] - 25.88^2 = 156.39$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 799.25 + 156.39 = 955.64$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{955.64}{96.11^2} = 0.103$$

$$d = 0.044$$

ข 2. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ SF-FWS (P) ของชุดการทดลองที่ 1

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{741.815}{24.078} = 30.81 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{4333.714}{67.927} = 63.80 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 30.81 + 63.80 = 94.61 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{26300.472}{24.078} \right] - 30.81^2 = 143.05$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{336600.063}{67.927} \right] - 63.80^2 = 884.88$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 143.05 + 884.88 = 1027.93$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{1027.93}{94.61^2} = 0.115$$

$$d = 0.048$$

ข 3. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ FWS-SF (C) ของชุดการทดลองที่ 1

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\pi(0.2)^2 [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{4 \times 0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\pi(0.2)^2 [(0.35 \times 0.70)]}{4 \times 0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3834.071}{55.893} = 68.60 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{725.896}{27.476} = 26.42 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 68.60 + 26.42 = 95.02 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{305790.971}{55.893} \right] - 68.60^2 = 765.05$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{23590.738}{27.476} \right] - 26.42^2 = 160.58$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 765.05 + 160.58 = 925.63$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{925.63}{95.02^2} = 0.102$$

$$d = 0.043$$

ข 4. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ SF-FWS (C) ของหูดการทดลองที่ 1

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{790.495}{25.463} = 31.04 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{4465.017}{71.695} = 62.28 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 31.04 + 62.28 = 93.32 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{28265.085}{25.463} \right] - 31.04^2 = 146.56$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{342171.829}{71.695} \right] - 62.28^2 = 893.80$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 146.56 + 893.80 = 1040.36$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{1040.36}{93.32^2} = 0.119$$

$$d = 0.050$$

ข 5. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ FWS-SF (P) ของชุดการทดลองที่ 2

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3903.359}{56.091} = 69.59 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{741.565}{28.383} = 26.13 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 69.59 + 26.13 = 95.72 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{314979.371}{56.091} \right] - 69.59^2 = 772.74$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{23876.075}{28.383} \right] - 26.13^2 = 158.43$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 772.74 + 158.43 = 931.17$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{931.17}{95.72^2} = 0.102$$

$$d = 0.043$$

ข 6. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ SF-FWS (P) ของชุดการทดลองที่ 2

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{767.597}{24.564} = 31.25 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3783.916}{60.131} = 62.93 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 31.25 + 62.93 = 94.18 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{27422.536}{24.564} \right] - 31.25^2 = 139.81$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{290514.022}{60.131} \right] - 62.93^2 = 871.17$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 139.81 + 871.17 = 1010.98$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{1010.98}{94.18^2} = 0.114$$

$$d = 0.048$$

ข 7. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ FWS-SF (C) ของชุดการทดลองที่ 2

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3752.131}{54.478} = 68.88 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{747.616}{28.092} = 26.61 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 68.88 + 26.61 = 95.49 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{304236.702}{54.478} \right] - 68.88^2 = 840.12$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{24627.590}{28.092} \right] - 26.61^2 = 168.58$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 840.12 + 168.58 = 1008.70$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{1008.70}{95.49^2} = 0.110$$

$$d = 0.046$$

ข 8. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ SF-FWS (C) ของหูดการทดลองที่ 2

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{780.811}{24.696} = 31.62 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3696.242}{59.275} = 62.36 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 31.62 + 62.36 = 93.98 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{28196.723}{24.696} \right] - 31.62^2 = 141.93$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{281014.204}{59.275} \right] - 62.36^2 = 852.08$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 141.93 + 852.08 = 994.01$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{994.01}{93.98^2} = 0.112$$

$$d = 0.047$$

ข 9. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ FWS-SF (P) ของชุดการทดลองที่ 3

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3731.456}{54.318} = 68.70 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{775.985}{28.548} = 27.18 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 68.70 + 27.18 = 95.88 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{297333.133}{54.318} \right] - 68.70^2 = 754.24$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{25735.735}{28.548} \right] - 27.18^2 = 162.74$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 754.24 + 162.74 = 916.98$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{916.98}{95.88^2} = 0.100$$

$$d = 0.043$$

ข 10. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ SF-FWS (P) ของชุดการทดลองที่ 3

$$\begin{aligned} \text{FWS; } T_{\text{theory}} &= \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{SF; } T_{\text{theory}} &= \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม} &= 96 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{SF; } T_{\text{mean}} &= \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{753.941}{24.689} = 30.54 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{FWS; } T_{\text{mean}} &= \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{4573.808}{70.636} = 64.75 \text{ ชั่วโมง} \\ T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} &= 30.54 + 64.75 = 95.29 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{SF; } \sigma^2 &= \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{26489.715}{24.689} \right] - 30.54^2 = 140.24 \\ \text{FWS; } \sigma^2 &= \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{359059.905}{70.636} \right] - 64.75^2 = 890.68 \\ \sigma^2 \text{ รวม} &= 140.24 + 890.68 = 1030.92 \\ 2d + 8d^2 &= \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{1030.92}{95.29^2} = 0.113 \\ d &= 0.047 \end{aligned}$$

ข 11. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ FWS-SF (C) ของชุดการทดลองที่ 3

$$\begin{aligned} \text{FWS; } T_{\text{theory}} &= \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{SF; } T_{\text{theory}} &= \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{FWS; } T_{\text{mean}} &= \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{3487.101}{52.259} = 66.73 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{SF; } T_{\text{mean}} &= \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{809.592}{29.193} = 27.73 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

T_{mean} รวมทั้งระบบ = 66.73 + 27.73 = 94.46 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{FWS; } \sigma^2 &= \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{272338.991}{52.259} \right] - 66.73^2 = 758.44 \\ \text{SF; } \sigma^2 &= \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{27305.109}{29.193} \right] - 27.73^2 = 166.38 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 \text{ รวม} &= 758.44 + 166.38 = 924.82 \\ 2d + 8d^2 &= \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{924.82}{94.46^2} = 0.104 \\ d &= 0.044 \end{aligned}$$

ข 12. การศึกษาสารติดตามของระบบแบบ SF-FWS (C) ของชุดการทดลองที่ 3

$$\text{FWS; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.2 \times 0.35) + 0.5]}{0.00639} = 2.80 \text{ วัน} = 67.20 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } T_{\text{theory}} = \frac{V}{Q} = \frac{\frac{\pi(0.2)^2}{4} [(0.35 \times 0.70)]}{0.00639} = 1.20 \text{ วัน} = 28.80 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้น ระยะเวลาเก็บกักรวม = 96 ชั่วโมง

$$\text{SF; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{778.168}{24.908} = 31.24 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{FWS; } T_{\text{mean}} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{4177.899}{66.691} = 62.64 \text{ ชั่วโมง}$$

$$T_{\text{mean}} \text{ รวมทั้งระบบ} = 31.24 + 62.64 = 93.88 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{SF; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{27968.443}{24.908} \right] - 31.24^2 = 146.93$$

$$\text{FWS; } \sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - T_{\text{mean}}^2 = \left[\frac{325724.869}{66.691} \right] - 62.64^2 = 960.32$$

$$\sigma^2 \text{ รวม} = 146.93 + 960.32 = 1107.25$$

$$2d + 8d^2 = \frac{\sigma^2}{T_{\text{mean}}^2} = \frac{1107.25}{93.88^2} = 0.126$$

$$d = 0.052$$



ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบทางสถิติประสิทธิภาพการบำบัดสารต่าง ๆ
ของระบบกำจัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการบำบัด
สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 97.36-127.31
กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ซีไอดี		บีไอดี	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการบำบัด
สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 203.50-252.34
กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ซีไอดี		บีไอดี	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการบำบัด
สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 386.82-477.38
กิโลกรัมซีไอดี/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ซีไอดี		บีไอดี	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของความแปรปรวนค่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดี ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน

ระบบแบบ	ซีโอดี		บีโอดี	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P)	0.001	พบความแตกต่าง	0.033	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.036	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ที่ความเข้มข้นสีย้อม 56.48-63.56 Pt Co

ระบบแบบ	สีย้อม	
	Sig.	ผลการทดสอบ
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (P)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ SF-FWS (C)	0.026	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ที่ความเข้มข้นสีย้อม 118.61-130.55 Pt Co

ระบบแบบ	สีย้อม	
	Sig.	ผลการทดสอบ
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (P)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ที่ความเข้มข้นสีย้อม 239.28-258.39 Pt Co

ระบบแบบ	สีย้อม	
	Sig.	ผลการทดสอบ
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (P)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของความแปรปรวนค่าประสิทธิภาพการ
บำบัดสีย้อม ที่ความเข้มข้นสีย้อมแตกต่างกัน

ระบบแบบ	สีย้อม	
	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P)	0.010	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการบำบัด
ฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัม
ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ฟอสฟอรัส	
	Sig.	ผลการทดสอบ
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (P)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการ
บำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบรทุกฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัม
ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ฟอสฟอรัส	
	Sig.	ผลการทดสอบ
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (P)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการ
 บำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบบรทุกฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัม
 ฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	สีย้อม	
	Sig.	ผลการทดสอบ
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (P)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของความแปรปรวนค่าประสิทธิภาพการ
 บำบัดฟอสฟอรัส ที่อัตราการระบบรทุกฟอสฟอรัสแตกต่างกัน

ระบบแบบ	ฟอสฟอรัส	
	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P)	0.040	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P)	0.035	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.13 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการ
 บำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราการระบบรทุก
 ไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ทีเคเอ็น		แอมโมเนีย	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.14 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการ
 บำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุก
 ไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ทีเคเอ็น		แอมโมเนีย	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.15 ผลการทดสอบทางสถิติ Independent Test ของความแตกต่างค่าประสิทธิภาพการ
 บำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุก
 ไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน)

ระบบแบบ	ทีเคเอ็น		แอมโมเนีย	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ FWS-SF (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
FWS-SF (P) กับ SF-FWS (C)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ค.16 ผลการทดสอบทางสถิติ One Way ANOVA ของความแปรปรวนค่าประสิทธิภาพการ
 บำบัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น และแอมโมเนียไนโตรเจน ที่อัตราภาระบรรทุก
 ไนโตรเจนแตกต่างกัน

ระบบแบบ	ทีเคเอ็น		แอมโมเนีย	
	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
FWS-SF (P)	0.078	ไม่พบความแตกต่าง	0.009	พบความแตกต่าง
SF-FWS (P)	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง



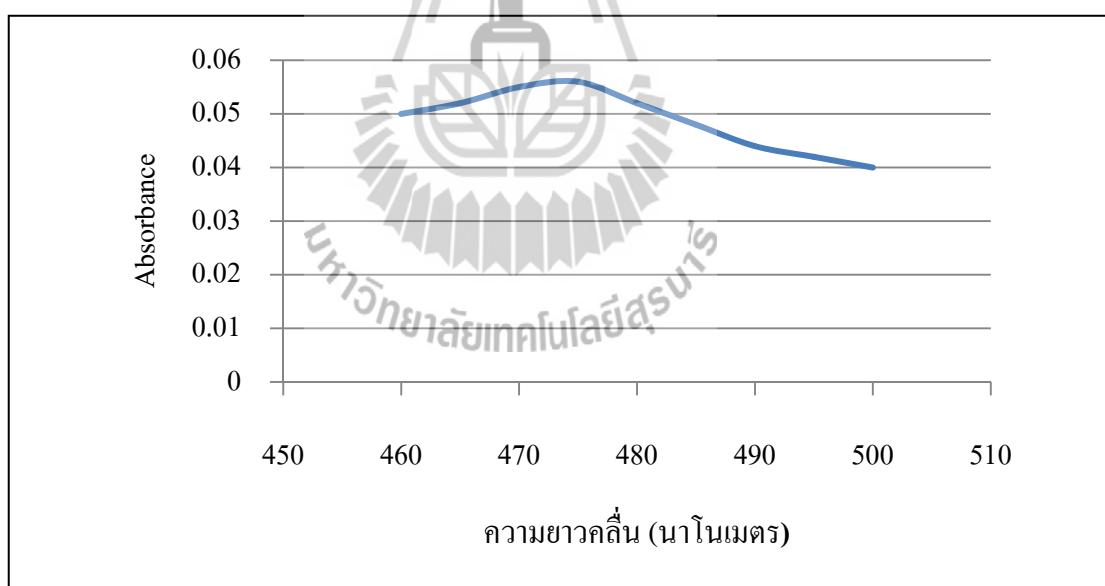
ภาคผนวก ง

การหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม และการแปลงหน่วยความเข้มข้นสีย้อม

1. การหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม

ตารางที่ ง.1 ค่า Absorbance ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	Absorbance
460	0.050
465	0.052
470	0.055
475	0.056
480	0.052
485	0.048
490	0.044
495	0.042
500	0.040



รูปที่ ง 1 ความยาวคลื่นที่เหมาะสม

ดังนั้นความยาวคลื่นที่เหมาะสม คือ 475 นาโนเมตร

2. การแปลงหน่วยความเข้มข้นของสี

จากสมการ $y = 0.000279x - 0.000758$

ที่ความเข้มข้นสี 5 มิลลิกรัมต่อลิตร $0.031 = 0.000279x - 0.000758$

$$x = 113.828 \text{ PtCo}$$

ที่ความเข้มข้นสี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร $0.062 = 0.000279x - 0.000758$

$$x = 224.939 \text{ PtCo}$$

ที่ความเข้มข้นสี 15 มิลลิกรัมต่อลิตร $0.093 = 0.000279x - 0.000758$

$$x = 337.245 \text{ PtCo}$$

ที่ความเข้มข้นสี 20 มิลลิกรัมต่อลิตร $0.125 = 0.000279x - 0.000758$

$$x = 450.746 \text{ PtCo}$$

ที่ความเข้มข้นสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร $0.309 = 0.000279x - 0.000758$

$$x = 1112.633 \text{ PtCo}$$

ดังนั้นในการเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ให้ได้สีข้อม 250 PtCo ใช้สีข้อมความเข้มข้น 11.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ตัวอย่างการแปลงหน่วยจาก PtCo เป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

น้ำเข้าระบบมีสีข้อมเฉลี่ย 60.065 PtCo สามารถทำให้เป็นหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร โดยเทียบบัญญัติไตรยางศ์

น้ำทิ้งสังเคราะห์ 250 PtCo ใช้สีข้อมความเข้มข้น 11.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ดังนั้นน้ำเข้าระบบมีสีข้อมเฉลี่ย 60.065 PtCo ใช้สีข้อมความเข้มข้น 2.763 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก จ

ค่าความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ของหินดินดาน

ตารางที่ จ.1 ค่าความสามารถในการดูดซับสีของหินดินดาน ที่ความเข้มข้น 56.48-63.65 PtCo
เป็นเวลา 40 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C ₀)	ความเข้มข้นน้ำออก (C _e)	C ₀ -C _e	ความสามารถในการดูดซับสี (mg/g)
4	2.818	0.620	2.198	0.0017
		0.564	2.254	0.0017
		0.454	2.364	0.0018
8	2.763	0.125	2.638	0.0020
		0.235	2.528	0.0019
		0.125	2.638	0.0020
12	2.598	0.180	2.418	0.0018
		0.125	2.473	0.0019
		0.125	2.473	0.0019
16	2.697	0.125	2.572	0.0019
		0.125	2.572	0.0019
		0.125	2.572	0.0019
20	2.763	0.125	2.638	0.0020
		0.125	2.638	0.0020
		0.125	2.638	0.0020
24	2.812	0.125	2.687	0.0020
		0.125	2.687	0.0020
		0.125	2.687	0.0020
28	2.648	0.125	2.523	0.0019
		0.125	2.523	0.0019
		0.125	2.523	0.0019
32	2.928	0.125	2.803	0.0021
		0.125	2.803	0.0021
		0.125	2.803	0.0021
36	2.862	0.125	2.737	0.0021
		0.125	2.737	0.0021
		0.125	2.737	0.0021
40	2.648	0.125	2.523	0.0019
		0.125	2.523	0.0019
		0.125	2.523	0.0019
			เฉลี่ย	0.0019

ตารางที่ จ.2 ค่าความสามารถในการดูดซับสีของหินดินดาน ที่ความเข้มข้น 118.61-130.55 PtCo
เป็นเวลา 72 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C ₀)	ความเข้มข้นน้ำออก (C _e)	C ₀ -C _e	ความสามารถในการดูดซับสี (mg/g)
44	5.895	0.125	5.770	0.0043
		0.125	5.770	0.0043
48	5.566	0.125	5.441	0.0041
		0.125	5.441	0.0041
52	5.511	0.125	5.386	0.0041
		0.125	5.386	0.0041
56	5.621	0.180	5.441	0.0041
		0.290	5.331	0.0040
60	5.676	0.125	5.551	0.0042
		0.125	5.551	0.0042
64	5.566	0.125	5.441	0.0041
		0.125	5.441	0.0041
68	5.951	0.125	5.826	0.0044
		0.125	5.826	0.0044
72	5.895	0.125	5.770	0.0043
		0.125	5.770	0.0043
76	5.621	0.125	5.496	0.0041
		0.125	5.496	0.0041
80	5.511	0.125	5.386	0.0041
		0.125	5.386	0.0041
84	6.005	0.125	5.880	0.0044
		0.125	5.880	0.0044
88	5.621	0.125	5.496	0.0041
		0.125	5.496	0.0041
92	5.731	0.125	5.606	0.0042
		0.125	5.606	0.0042
96	5.566	0.125	5.441	0.0041
		0.125	5.441	0.0041
100	5.895	0.125	5.770	0.0043
		0.125	5.770	0.0043
104	5.456	0.235	5.221	0.0039
		0.235	5.221	0.0039

ตารางที่ จ.2 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมของหินดินดาน ที่ความเข้มข้น 118.61-130.55 PtCo
เป็นเวลา 72 วัน (ต่อ)

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_c)	$C_0 - C_c$	ความสามารถในการดูดซับสีย้อม (mg/g)
108	5.676	0.125	5.551	0.0042
		0.125	5.551	0.0042
112	5.731	0.125	5.606	0.0042
		0.125	5.606	0.0042
			เฉลี่ย	0.0042

ตารางที่ จ.3 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมของหินดินดาน ที่ความเข้มข้น 239.28-258.39 PtCo
เป็นเวลา 100 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_c)	$C_0 - C_c$	ความสามารถในการดูดซับสีย้อม (mg/g)
116	11.666	0.290	11.376	0.0086
120	11.226	0.400	10.827	0.0082
124	11.501	0.125	11.376	0.0086
128	11.776	0.125	11.651	0.0088
132	11.226	0.180	11.046	0.0083
136	11.062	0.125	10.937	0.0082
140	11.172	0.125	11.046	0.0083
144	11.282	0.125	11.156	0.0084
148	11.117	0.125	10.922	0.0083
152	11.776	0.125	11.651	0.0088
156	11.886	0.125	11.761	0.0089
160	11.226	0.125	11.101	0.0084
164	11.007	0.125	10.882	0.0082
168	11.062	0.125	10.937	0.0082
172	11.117	0.125	10.992	0.0083
180	11.666	0.180	11.486	0.0087
188	11.501	0.235	11.266	0.0085
196	11.226	0.290	10.937	0.0082
204	11.282	0.235	11.046	0.0083
212	11.776	0.454	11.322	0.0085
			เฉลี่ย	0.0084

ตารางที่ จ.4 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดาน ที่อัตรากระบรทุก
ฟอสฟอรัส 18.07-21.41 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นเวลา 40 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C ₀)	ความเข้มข้นน้ำออก (C _e)	C ₀ -C _e	ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส (mg/g)
4	9.02	0.68	8.34	0.0063
		0.61	8.41	0.0063
		0.65	8.37	0.0063
8	9.16	0.72	8.44	0.0064
		0.77	8.39	0.0063
		0.75	8.41	0.0063
12	8.88	0.68	8.20	0.0062
		0.63	8.25	0.0062
		0.68	8.20	0.0062
16	10.52	0.75	9.77	0.0074
		0.75	9.77	0.0074
		0.68	9.84	0.0074
20	9.77	0.79	8.98	0.0068
		0.75	9.02	0.0068
		0.81	8.96	0.0067
24	9.63	0.68	8.95	0.0067
		0.61	9.02	0.0068
		0.68	8.95	0.0067
28	10.32	0.75	9.57	0.0072
		0.84	9.48	0.0071
		0.75	9.57	0.0072
32	9.50	0.81	8.69	0.0065
		0.84	8.66	0.0065
		0.88	8.62	0.0065
36	9.29	0.61	8.68	0.0065
		0.68	8.61	0.0065
		0.68	8.61	0.0065
40	9.43	0.65	8.78	0.0066
		0.59	8.84	0.0067
		0.68	8.75	0.0066
			เฉลี่ย	0.0067

ตารางที่ จ.5 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดาน ที่อัตรากระบรทุก
ฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นเวลา 72 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C ₀)	ความเข้มข้นน้ำออก (C _e)	C ₀ -C _e	ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส (mg/g)
44	19.21	2.11	17.10	0.0129
		2.04	17.17	0.0129
48	19.48	2.32	17.16	0.0129
		2.25	17.23	0.0130
52	19.62	1.88	17.74	0.0134
		1.77	17.85	0.0134
56	20.16	1.82	18.34	0.0138
		1.77	18.39	0.0139
60	19.89	1.70	18.19	0.0137
		1.77	18.12	0.0137
64	20.44	1.77	18.67	0.0141
		1.66	18.78	0.0141
68	20.30	1.79	18.51	0.0139
		1.91	18.39	0.0139
72	19.76	1.77	17.99	0.0136
		2.04	17.72	0.0133
76	19.48	1.73	17.75	0.0134
		1.77	17.71	0.0133
80	19.34	1.95	17.39	0.0131
		1.98	17.36	0.0131
84	19.89	1.98	17.91	0.0135
		1.91	17.98	0.0135
88	20.23	1.77	18.46	0.0139
		1.77	18.46	0.0139
92	20.03	1.84	18.19	0.0137
		1.91	18.12	0.0137
96	20.44	1.79	18.65	0.0140
		1.84	18.60	0.0140
100	19.62	1.98	17.64	0.0133
		1.84	17.78	0.0134
104	20.10	1.84	18.26	0.0138
		1.84	18.26	0.0138

ตารางที่ จ.5 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดาน ที่อัตรากระบรทุก
ฟอสฟอรัส 38.95-41.60 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นเวลา 72 วัน (ต่อ)

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_e)	$C_0 - C_e$	ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส (mg/g)
108	20.30	1.82	18.48	0.0139
		1.77	18.53	0.0140
112	19.14	1.63	17.51	0.0132
		1.77	17.37	0.0131
			เฉลี่ย	0.0136

ตารางที่ จ.6 ค่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดาน ที่อัตรากระบรทุก
ฟอสฟอรัส 80.28-85.57 กิโลกรัมฟอสฟอรัส/(เฮกแตร์.วัน) เป็นเวลา 100 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_e)	$C_0 - C_e$	ความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัส (mg/g)
116	41.43	4.85	36.58	0.0276
120	41.23	4.16	37.07	0.0279
124	40.54	5.12	35.42	0.0267
128	41.77	4.51	37.26	0.0281
132	40.27	4.57	35.70	0.0269
136	39.52	4.16	35.36	0.0266
140	41.36	4.98	36.38	0.0274
144	40.61	4.44	36.17	0.0272
148	41.36	4.44	36.92	0.0278
152	40.13	4.16	35.97	0.0271
156	40.41	5.19	35.22	0.0265
160	42.05	4.85	37.20	0.0280
164	40.54	4.23	36.31	0.0274
168	40.20	5.19	35.01	0.0264
172	40.27	4.57	35.70	0.0269
180	39.45	5.33	34.12	0.0257
188	41.02	4.44	36.58	0.0276
196	40.41	4.57	35.84	0.0270
204	41.43	5.19	36.24	0.0273
212	39.99	4.78	35.21	0.0265
			เฉลี่ย	0.0271

ตารางที่ จ.7 ค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของหินดินดาน ที่อัตราภาระบรรทุก
ไนโตรเจน 75.56-83.76 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกเตอร์.วัน) เป็นเวลา 40 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_e)	$C_0 - C_e$	ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจน (mg/g)
4	39.57	7.00	32.57	0.0245
		7.75	31.82	0.0240
		7.84	31.73	0.0239
8	37.52	7.47	30.05	0.0226
		6.72	30.80	0.0232
		8.40	29.12	0.0219
12	41.16	7.56	33.60	0.0253
		5.88	35.28	0.0266
		6.53	34.63	0.0261
16	39.86	6.01	33.85	0.0255
		5.73	34.13	0.0257
		7.19	32.67	0.0246
20	37.67	6.83	30.84	0.0232
		6.46	31.21	0.0235
		7.46	30.21	0.0228
24	39.86	6.01	33.85	0.0255
		6.01	33.85	0.0255
		5.19	34.67	0.0261
28	40.59	7.92	32.67	0.0246
		7.55	33.04	0.0249
		6.55	34.04	0.0256
32	37.13	5.82	31.31	0.0236
		6.55	30.58	0.0230
		7.83	29.30	0.0221
36	40.88	7.09	33.79	0.0255
		6.16	34.72	0.0262
		7.28	33.60	0.0253
40	38.08	6.25	31.83	0.0240
		6.72	31.36	0.0236
		5.97	32.11	0.0242
			เฉลี่ย	0.0244

ตารางที่ จ.8 ค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของหินดินดาน ที่อัตราภาระบรรทุก
ไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกเตอร์.วัน) เป็นเวลา 72 วัน

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_e)	$C_0 - C_e$	ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจน (mg/g)
44	82.88	11.85	71.03	0.0535
		12.41	70.47	0.0531
48	85.12	12.13	72.99	0.0550
		11.76	73.36	0.0553
52	81.54	11.74	69.80	0.0526
		13.01	68.53	0.0516
56	81.81	13.01	68.80	0.0518
		11.74	70.07	0.0528
60	81.08	13.38	67.70	0.0510
		12.92	68.16	0.0513
64	82.90	13.92	68.98	0.0520
		14.65	68.25	0.0514
68	81.55	12.69	68.86	0.0519
		12.04	69.51	0.0524
72	84.84	14.28	70.56	0.0532
		14.84	70.00	0.0527
76	79.99	15.96	64.03	0.0482
		14.56	65.43	0.0493
80	81.76	13.25	68.51	0.0516
		14.00	67.76	0.0510
84	82.51	15.68	66.83	0.0503
		15.31	67.20	0.0506
88	84.00	12.13	71.87	0.0541
		13.44	70.56	0.0532
92	85.12	13.63	71.49	0.0539
		12.88	72.24	0.0544
96	82.04	15.68	66.36	0.0500
		15.12	66.92	0.0504
100	80.54	13.47	67.07	0.0505
		12.19	68.35	0.0515
104	79.90	11.10	68.80	0.0518
		10.37	69.53	0.0524

ตารางที่ จ.8 ค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของหินดินดาน ที่อัตราภาระบรรทุก

ไนโตรเจน 162.60-173.22 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกเตอร์.วัน) เป็นเวลา 72 วัน (ต่อ)

วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_e)	$C_0 - C_e$	ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจน (mg/g)
108	82.26	11.65	70.61	0.0532
		11.19	71.07	0.0535
112	80.26	10.65	69.61	0.0524
		10.92	69.34	0.0522
			เฉลี่ย	0.0521

ตารางที่ จ.9 ค่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของหินดินดาน ที่อัตราภาระบรรทุก

ไนโตรเจน 317.38-351.57 กิโลกรัมไนโตรเจน/(เฮกเตอร์.วัน) เป็นเวลา 100 วัน

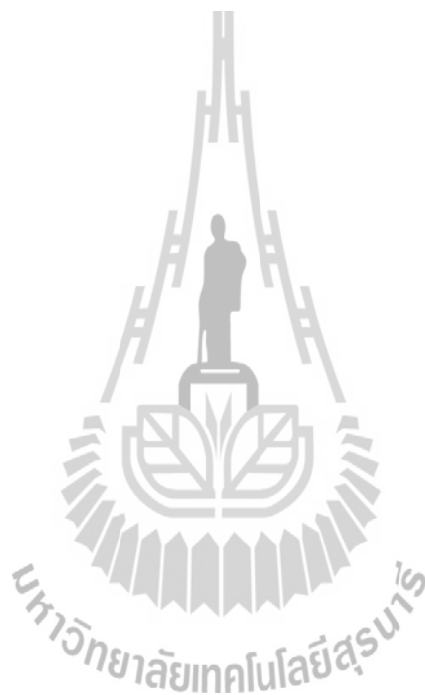
วันที่	ความเข้มข้นน้ำเข้า (C_0)	ความเข้มข้นน้ำออก (C_e)	$C_0 - C_e$	ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจน (mg/g)
116	172.76	28.84	143.92	0.1084
120	166.16	29.77	136.39	0.1027
124	167.16	27.16	140.00	0.1055
128	165.29	26.79	138.50	0.1043
132	155.96	28.84	127.12	0.0958
136	157.07	25.66	131.41	0.0990
140	166.89	32.21	134.68	0.1015
144	170.53	31.12	139.41	0.1050
148	157.79	29.67	128.12	0.0965
152	161.98	28.39	133.59	0.1006
156	166.04	31.36	134.68	0.1015
160	172.48	29.12	143.36	0.1080
164	166.69	29.12	137.57	0.1036
168	166.88	29.68	137.20	0.1034
172	165.39	24.64	140.75	0.1060
180	164.73	29.31	135.42	0.1020
188	168.93	26.88	142.05	0.1070
196	167.16	25.48	141.68	0.1067
204	169.40	27.72	141.68	0.1067
212	169.03	26.79	142.24	0.1072
			เฉลี่ย	0.1036



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Cumnan, S. and Yimrattanabovorn, J. (2012). The Use of Constructed Wetland for Azo Dye Textile Wastewater. **International Journal of Civil Engineering and Building Materials**, Vol. 2, No. 4, pp. 150-158



The Use of Constructed Wetland for Azo Dye Textile Wastewater

Siripan Cumnan^{1,a}, Jareeya Yimrattanabovorn^{2,b}

^{1,2}School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

^afon_envi@hotmail.com, ^bjaree_2007@hotmail.com

Keywords: constructed wetland, azo dye, textile wastewater.

Abstract. Textile wastewater represents severe environmental problems as it contains mixture of chemicals, auxiliaries and dyestuffs of different classes and chemical constitutions. Constructed wetlands (CW) are an interesting alternative treatment system for textile wastewater. The main objective of this study was to establish a pilot scale of integrated FWS and SF CW system to treat azo dyes from textile effluent that effectively removes colors and organic matters. Three CW pilot scale units were set at Suranaree University of Technology. The pilot scale unit contains 4 blocks of CW, 2 blocks of FWS-SF with and without plants (*Phragmites australis*, reed), and other 2 blocks of SF-FWS with plant and without plants as the control blocks. The synthetic textile wastewater was fed to each block with flow rate of 6.33 l/day. Inlet and outlet of each block were sampled and analyzed for COD and colors. The results showed that integrated constructed wetlands FWS and SF could remove both COD and colors from textile wastewater. The CW of FWS-SF was better in COD removal than SF-FWS, while the CW of SF-FWS was better in color removal than FWS-SF. Thus, reed increased color removal in CW block.

Introduction

The textile industry produces large amounts of wastewater that contains typically a variety of dyes and associated chemicals. In particular, the release of colored effluent into environment is undesirable. Azo dyes are extensively used for dyeing of cotton and constitute about 60-70% of total dyes produced [1]. It is difficult to degrade by biological and chemical processes because of their complex structures [2]. The common methods for textile wastewater treatment are coagulation and flocculation, oxidation, membrane separation and adsorption on activated carbon [3]. However, none of these methods have been found to be suitable, because some methods are expensive and have high-energy requirement, and generation of toxic sludge or other waste products. There is a need to find an alternative treatment method, which is efficient, simple to use, inexpensive and environmentally friendly. Constructed wetland (CW) is a treatment system that fulfils these requirements. Many studies showed that CW could treat textile wastewater [2,4,5]. Under aerobic conditions, it could remove organic matters but relatively low in color removals [6,7]. On the other hand, under the anaerobic condition, it shows a great removal of colors, but cannot remove the organic matters effectively [8]. In this study, integrated Free Water Surface (FWS) and Subsurface Flow (SF) constructed wetlands that could occur both under aerobic and anaerobic conditions. The main objective of this study was to establish a pilot scale of integrated FWS and SF CW systems in order to treat azo dyes from textile effluent, that effectively remove colors and organic matters.

Materials and methods

Three CW pilot scale units were set at Suranaree University of Technology. As shown in Fig. 1, Each CW pilot scale unit contains 4 blocks of CW, 2 blocks of FWS-SF with and without plants, and other 2 blocks of SF-FWS with plant and without plants were control blocks. Shale was used as filter media, their main chemical compositions are aluminum, silicon and iron support the azo dye adsorption and promise as a substrate for constructed wetland system. and reed was used as plant

for every block of CW. Reed is one of the most used plant in a constructed wetland. The CW pilot scale units and operation characteristics are summarized in Table 1.

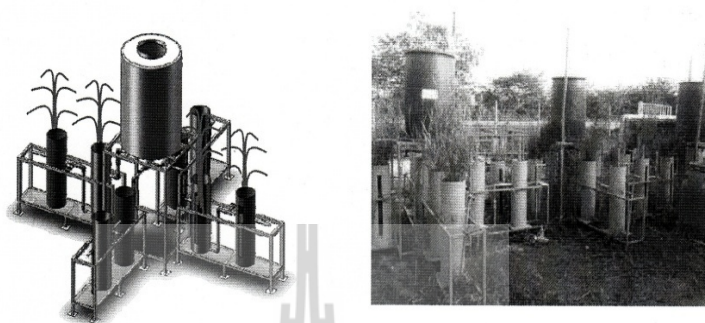


Fig. 1 CW pilot scale units.

Table 1 CW pilot scale characteristics

Reactor characteristics	FWS	SF
Total column height (cm)	80	80
Column diameter (cm)	20	20
Height of water (cm)	50	70
Height of media (cm)	20	75
Flow rate (l/day)	6.33	
HRT (day)	4	

The synthetic textile wastewater was fed to each block with the flow rate of 6.33 l/day, and the hydraulic retention time was 4 days. The operation of CW pilot scale unit was started with Run I, Run II and Run III respectively, as shown in Fig. 2, 3 and 4.

The Run I: fed synthetic textile wastewater organic loading rate in the range of 3.03×10^{-4} – 3.96×10^{-4} kg/day and color in the range of 56.48 – 63.65 Pt.Co with unit 1, 2 and 3.

The Run II: fed synthetic textile wastewater organic loading rate in the range of 3.03×10^{-4} – 3.96×10^{-4} kg/day and color in the range of 56.48 – 63.65 Pt.Co with unit 1 and fed synthetic textile wastewater organic loading rate in the range of 6.33×10^{-4} – 7.85×10^{-4} kg/day and color in the range of 118.61 – 130.55 Pt.Co with unit 2 and 3.

The Run III: fed synthetic textile wastewater organic loading rate in the range of 3.03×10^{-4} – 3.96×10^{-4} , 6.33×10^{-4} – 7.85×10^{-4} and 1.20×10^{-3} – 1.48×10^{-3} kg/day and color in the range of 56.48 – 63.65, 118.61 – 130.55 and 239.28 – 258.39 Pt.Co with unit 1, 2 and 3 respectively.

The characteristics of synthetic textile wastewater in each Run were shown in Table 2. The composition of synthetic textile wastewater was the following: C_6H_5COONa 53.55, CH_3COONa 204.9, NH_4NO_3 176.1, $NaCl$ 7, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 3.4, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 4, $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ 36.7 and dye 11.5, in mg/l. Inlet and outlet of each block were sampled and analyzed for COD and colors according to the standard method [9].

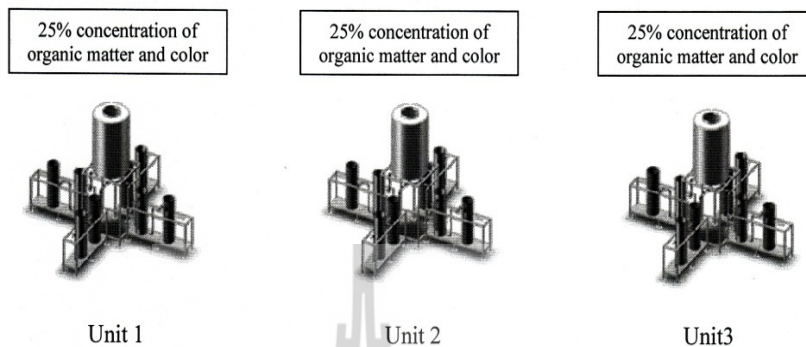


Fig. 2 Run I

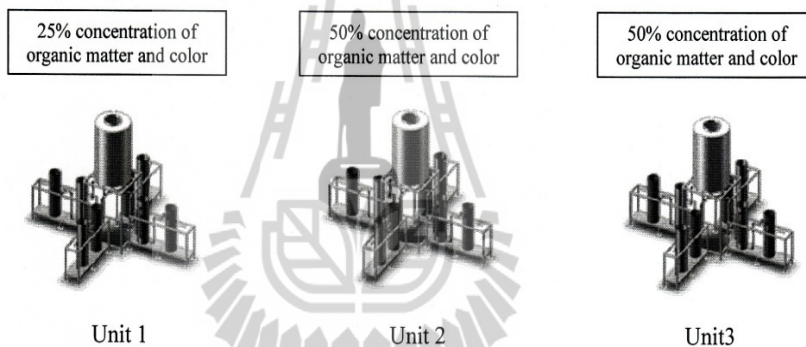


Fig. 3 Run II

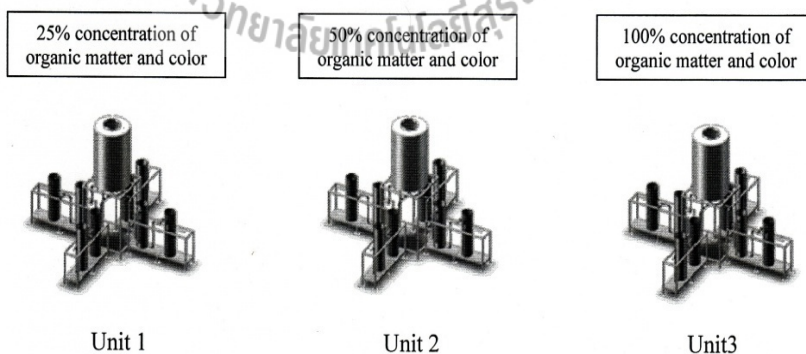


Fig. 4 Run III

Table 2 Characteristics of synthetic textile wastewater in each run

Operation	Q (m ³ /day)	COD (mg/l)	OLR (kg/day)	Color (Pt.Co)
Run I	0.00633	47.84 – 62.56	3.03×10^{-4} – 3.96×10^{-4}	56.48 – 63.65
Run II		100.00 – 124.00	6.33×10^{-4} – 7.85×10^{-4}	118.61 – 130.55
Run III		190.08 – 234.58	1.20×10^{-3} – 1.48×10^{-3}	239.28 – 258.39

Results and discussion

Condition in CW pilot scale units

As shown in Table 3, the dissolved oxygen (DO) and oxidation-reduction potential (ORP) are the measures of the oxidizing (aerobic) and reducing (anaerobic). Redox potentials greater than 100 mV are commonly interpreted to indicate an aerobic environment, whereas ones less than -100 mV are to indicate an anaerobic environment [10]. In the FWS, the ORP and DO were in the range of 85.3 – 115.3 mV and 3.2 – 4.2 mg/l, respectively, indicating aerobic condition. In the SF, the ORP and DO were in the range of 45.6 – 67.9 mV and 2.0 – 3.2 mg/l, respectively, indicating aerobic condition too. However, the oxygen concentration in FWS was higher than SF. The pH and temperature were in the range of 6.0 – 7.5 and 15.9 – 26.8 °C. The reed cans growth and rhizome development.

Table 3 Condition in CW pilot scale units

Parameter	FWS-SF		SF-FWS	
	FWS	SF	SF	FWS
	Max-Min	Max-Min	Max-Min	Max-Min
ORP (mV)	(+115.3) – (+90.0)	(+67.9) – (+48.2)	(+66.7) – (+45.6)	(+104.3) – (+85.3)
pH	7.5 – 6.5	7.3 – 6.2	7.0 – 6.0	7.2 – 6.4
Temp. (°C)	26.8 – 19.5	22.7 – 16.3	20.5 – 15.9	25.9 – 19.2
DO (mg/l)	4.2 – 3.4	3.2 – 2.1	3.0 – 2.0	4.0 – 3.2

COD removal efficiency

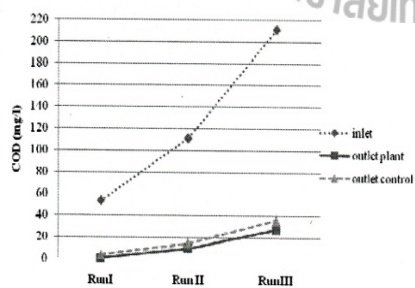
The results of Run I, Run II and Run III are shown in Table 4 and Fig. 5. The total COD removal of FWS-SF with plant block was higher than the control block. The total COD removal of FWS-SF with plant block Run I, Run II and Run III was in the range of 98.04, 90.99 and 86.98%, respectively. The total COD removal of FWS-SF control block Run I, Run II and Run III was in the range of 92.82, 86.76 and 82.88%, respectively. These results were similar to the total COD removal of SF-FWS block. It showed that the total COD removal of SF-FWS with plant block was higher than the control block as shown in Table 5 and Fig. 5. The total COD removal of SF-FWS with plant block Run I, Run II and Run III was in the range of 90.76, 82.45 and 83.40%, respectively. The total COD removal of SF-FWS control block Run I, Run II and Run III was in the range of 86.20, 76.30 and 76.62%, respectively. In Fig. 6, the results showed that the FWS-SF block could remove COD better than SF-FWS block. It is obviously that the FWS-SF block has a significant performance advantage with respect to COD as shown in Table 6. The mechanics of organic digestion in aerobic condition was attributable to degradation of metabolites that changed the organic matter to CO₂ and H₂O. Although, in SF, aerobic processes only predominate near roots and on the rhizoplane (the surface of the root), it is not enough for the aerobic degradation condition (organic matter degradation and nitrification) [11].

Table 4 The COD removal efficiencies of FWS-SF blocks

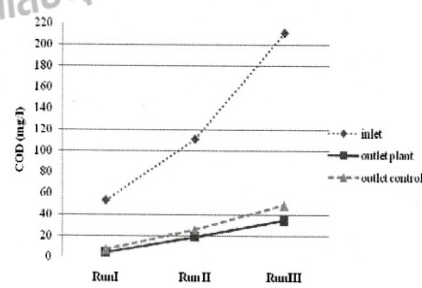
Operation	Block	Inlet	n	Outlet				%Total removal
				FWS		SF		
				concentration	%removal	concentration	%removal	
Run I	FWS-SF plant	47.84–62.56	10	2.66 – 10.43	88.98±4.02	0 – 2.25	82.49±14.91	98.04±1.66
	FWS-SF control			4.91 – 13.70	83.03±5.40	2.45 – 6.54	58.43±11.88	92.82±2.96
Run II	FWS-SF plant	100.00– 124.00	14	17.23 – 44.00	76.60±5.63	3.98 – 15.84	62.17±7.32	90.99±3.16
	FWS-SF control			19.88 – 50.67	72.13±6.49	10.60 – 22.67	51.91±6.96	86.76±3.13
Run III	FWS-SF plant	190.08 -234.58	18	43.56 – 98.06	68.96±9.08	19.88 – 35.78	55.42±11.66	86.98±2.03
	FWS-SF control			50.36–104.12	64.52±8.54	27.72 – 45.06	49.20±13.14	82.88±2.50

Table 5 The COD removal efficiencies of SF-FWS blocks

Operation	Block	Inlet	n	Outlet				%Total removal
				SF		FWS		
				concentration	%removal	concentration	%removal	
Run I	SF-FWS plant	47.84–62.56	10	4.91 – 23.31	80.25±12.24	1.02 – 13.08	58.97±19.79	90.76±8.80
	SF-FWS control			7.77 – 29.44	69.55±14.50	3.07 – 16.36	55.66±13.88	86.20±9.33
Run II	SF-FWS plant	100.00– 124.00	14	24.00 – 56.67	67.49±6.20	10.67 – 28.00	46.18±9.33	82.45±4.68
	SF-FWS control			29.33 – 62.67	61.54±5.87	16.00 – 36.00	38.43±10.50	76.30±5.72
Run III	SF-FWS plant	190.08 -234.58	18	59.40–101.70	62.63±7.84	26.40 – 39.76	54.01±9.39	83.40±1.88
	SF-FWS control			61.11–110.88	56.53±7.85	31.68 – 58.67	42.52±12.55	76.62±3.47



Block: FWS-SF



Block: SF-FWS

Fig. 5 The inlet and outlet COD concentrations of FWS-SF and SF-FWS blocks

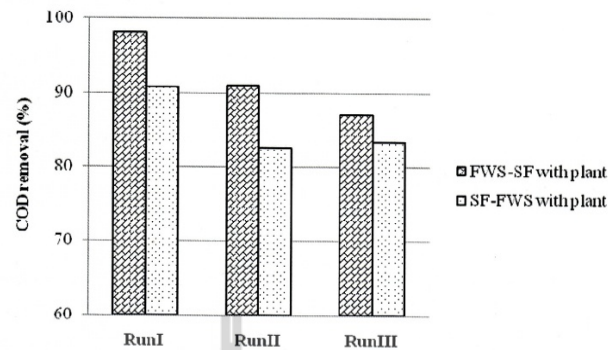


Fig. 6 Total COD removal efficiency of FWS-SF and SF-FWS blocks

Table 6 Result COD removal efficiency of Pair-test

Operation	Block	Sig. (2-tailed)
Run I	FWS-SF with plant and SF-FWS with plant	0.019
	FWS-SF with plant and without plant	0.000
	SF-FWS with plant and without plant	0.275
Run II	FWS-SF with plant and SF-FWS with plant	0.000
	FWS-SF with plant and without plant	0.001
	SF-FWS with plant and without plant	0.004
Run III	FWS-SF with plant and SF-FWS with plant	0.000
	FWS-SF with plant and without plant	0.000
	SF-FWS with plant and without plant	0.000

Color removal efficiency

The results of Run I, Run II and Run III are as shown in Table 7 and Fig. 7. The total color removal of FWS-SF with plant block was higher than the control block. The total color removal of FWS-SF with plant block Run I, Run II and Run III was found in the range of 90.87, 94.18 and 97.31%, respectively. The total color removal of FWS-SF control block Run I, Run II and Run III was in the range of 88.47, 89.96 and 94.85%, respectively. These results were similar to the total color removal of SF-FWS block. It showed that the total color removal of SF-FWS with plant block was higher than the control block as shown in Table 8 and Fig. 7. The total color removal of SF-FWS with plant block Run I, Run II and Run III was found in the range of 95.22, 97.81 and 98.62%, respectively. The total color removal of SF-FWS control block Run I, Run II and Run III was found in the range of 94.31, 96.22 and 97.27%, respectively. In Fig. 8, the results showed that the SF-FWS block could remove color better than FWS-SF block. In addition, it is obviously that the SF-FWS block had a significant performance advantage with respect to color as shown in Table 9. The block with plant showed much better color removal than the control block. The reed has enzyme, plant peroxidases (POD) that are capable of degrading some textile and other important dyes [12]. The azo dyes are greatly reduced under anaerobic condition (azo bond cleavage leading to decolorization) and produce smaller molecules. On the other hand, aerobic condition cannot degrade structure of azo dye, hence the color removal efficiency is lower than anaerobic condition [5].

Table 7 The color removal efficiencies of FWS-SF blocks

Operation	Block	Inlet	n	Outlet				%Total removal
				FWS		SF		
				concentration	%removal	concentration	%removal	
Run I	FWS-SF plant	56.48 – 63.65	9	9.09 – 18.65	76.96±4.96	2.72 – 9.88	61.00±12.53	90.87±4.12
	FWS-SF control			15.06 – 23.82	69.49±4.99	2.72 – 13.47	63.45±13.27	88.47±5.61
Run II	FWS-SF plant	118.61 – 130.55	13	46.33 – 64.25	54.00±4.21	2.27 – 11.68	87.11±5.48	94.18±2.30
	FWS-SF control			60.06 – 81.57	41.67±5.35	6.30 – 17.65	82.47±5.26	89.96±2.48
Run III	FWS-SF plant	239.28 – 258.39	16	74.40 – 158.03	60.00±9.11	2.72 – 13.47	93.13±3.25	97.31±1.26
	FWS-SF control			92.32 – 171.18	52.58±7.71	3.91 – 20.64	88.97±3.62	94.85±1.73

Table 8 The color removal efficiencies of SF-FWS blocks

Operation	Block	Inlet	n	Outlet				%Total removal
				SF		FWS		
				concentration	%removal	concentration	%removal	
Run I	SF-FWS plant	56.48 – 63.65	9	2.72 – 7.50	93.56±3.05	2.72 – 3.52	12.52±18.96	95.22±0.54
	SF-FWS control			2.72 – 8.69	91.31±3.86	2.72 – 4.71	20.72±15.03	94.31±1.40
Run II	SF-FWS plant	118.61 – 130.55	13	2.72 – 17.65	94.25±4.43	2.72 – 2.72	36.28±37.84	97.81±0.07
	SF-FWS control			2.72 – 24.22	88.62±5.89	2.72 – 6.31	58.11±33.77	96.92±1.12
Run III	SF-FWS plant	239.28 – 258.39	16	2.72 – 18.25	97.08±2.28	2.72 – 6.30	29.58±34.73	98.62±0.47
	SF-FWS control			2.72 – 27.81	94.94±2.93	2.72 – 14.66	38.32±21.50	97.27±1.38

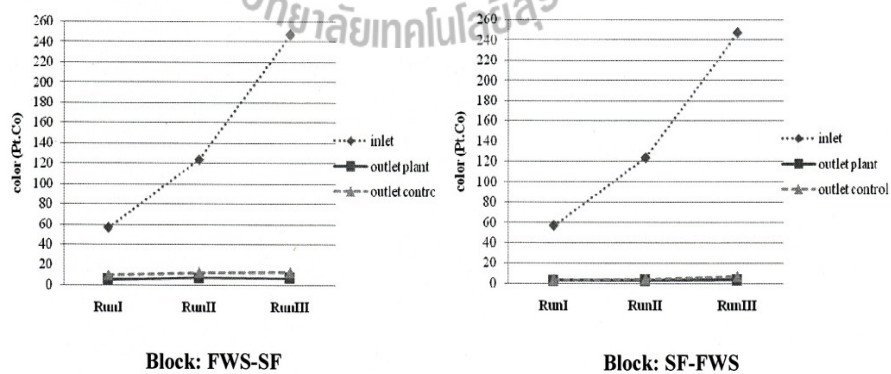


Fig. 7 The inlet and outlet color concentrations of FWS-SF and SF-FWS blocks

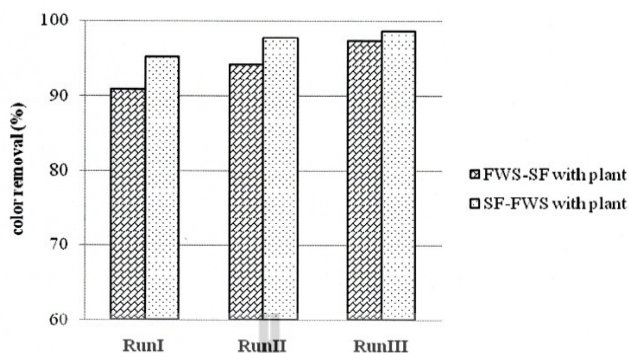


Fig. 6 Total color removal efficiency of FWS-SF and SF-FWS blocks

Table 9 Result color removal efficiency of Pair-test

Operation	Block	Sig. (2-tailed)
Run I	SF-FWS with plant and FWS-SF with plant	0.006
	SF-FWS with plant and without plant	0.087
	FWS-SF with plant and without plant	0.315
Run II	SF-FWS with plant and FWS-SF with plant	0.000
	SF-FWS with plant and without plant	0.008
	FWS-SF with plant and without plant	0.000
Run III	SF-FWS with plant and FWS-SF with plant	0.000
	SF-FWS with plant and without plant	0.001
	FWS-SF with plant and without plant	0.000

Conclusion

The obtained results indicate that the CW used in this study had significant effects on water quality parameter, specifically on COD and color reduction. Integrated constructed wetland FWS and SF could remove both COD and colors from textile wastewater. The CW of FWS-SF was better in COD removal than SF-FWS, while the CW of SF-FWS was better in color removal than FWS-SF. Consequently, reed increased color removal in CW block.

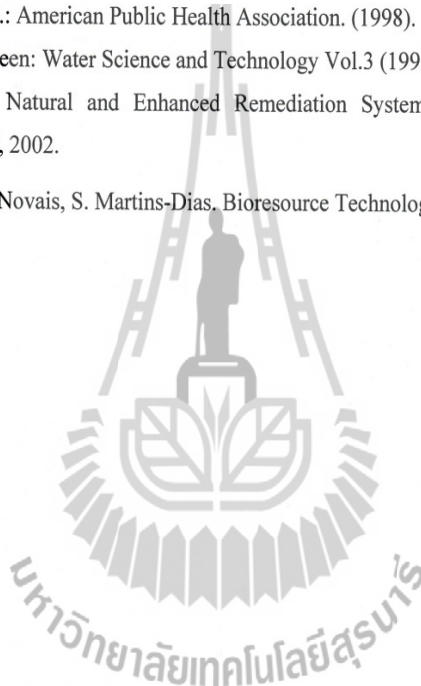
Acknowledgements

This study was supported by Suranaree University of Technology and the Thailand Research Fund in Window II 2009, MRG-WII525E071.

References

- [1] F.V. Zee, I. Bisschops, V. Blanchard, R. Bouwman, G. Lettinga, J. Field: Water Research Vol.37 (2003), p. 3098-3109.
- [2] SA. Ong, K. Uchiyama, D. Inadama, K. Yamagiwa: Journal of Hazardous Materials Vol.165 (2009), p. 696-703.
- [3] M. Alkan, S. Celikcapa, Ö. Demirbas, M. Dogan: Dyes and Pigments Vol.65 (2005), p. 251-259.
- [4] L.C. Davies, I.S. Pedro, J.M. Novais, S. Martins-Dias, Water Research Vol.40 (2006), p. 2055-2063.

- [5] A. Ojstršek, D. Fa and L. Adrian: Journal of Environmental Engineering. Vol.127 (2001), p. 844-849.
- [6] A. Macro, S. Esplugas and G. Saum: Water Science and Technology Vol.35 (1997), p. 321-327.
- [7] O. Tunay, I. Kabdasli, G. Eremektar, D. Orhon: Water Science and Technology Vol.34 (1996), p. 9-16.
- [8] P.C. Vandevivere, R. Bianchi and W. Verstraete: J. Chem. Technol. Biotech Vol.72 (1998), p. 289-302.
- [9] APHA, AWWA. And WEF. Standard method for the examination of the water and wastewater. Washington D.C.: American Public Health Association. (1998).
- [10] P. Cooper, B. Green: Water Science and Technology Vol.3 (1995), p. 317-327.
- [11] S.S. Suthersan, Natural and Enhanced Remediation Systems, Acradis, Lewis Publisher, Washington, DC, 2002.
- [12] CC. Carias, JM. Novais, S. Martins-Dias. Bioresource Technology. Vol.99 (2008), p. 243-251.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริพรรณ คำแน่น เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ.2529 ที่จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนอรุณประดิษฐ จังหวัดเพชรบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2550 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับทุนทุนการศึกษาสำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่นที่สมัครเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเภททุนวิจัยมหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี Window II ปี 2552 เพื่อทำวิจัยเรื่อง “การใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดสีย้อมเอโซจากน้ำเสียฟอกย้อม”

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ฉ.

