



รายงานการวิจัย

การคาดการณ์อายุการใช้งานระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน
ตัวกลางหินดินดานในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

(Lifespan of Shale Subsurface Flow Constructed Wetland for the
Treatment of Textile wastewater)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การคาดการณ์อายุการใช้งานระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ตัวกลาง
หินดินดานในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

(Lifespan of Shale Subsurface Flow Constructed Wetland for the
Treatment of Textile wastewater)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรียา ยิ้มรัตนบวร

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

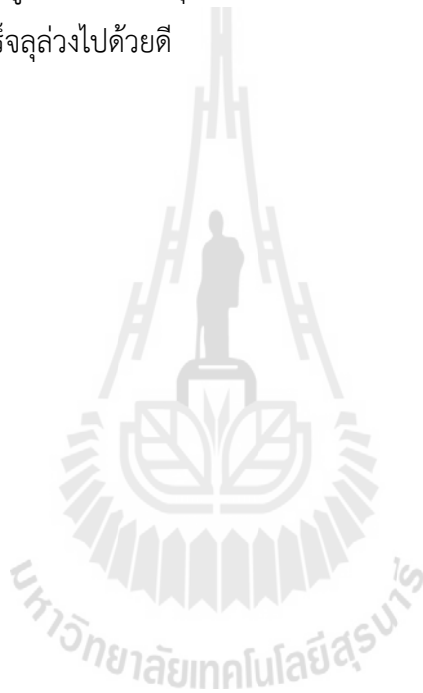
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557 ผู้ศึกษาวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย สถานที่ในการทำวิจัย และเครื่องมือ-อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย จนทำให้มีความสมบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ นางสาว โสธิชา กิจอาสา นักศึกษาผู้ช่วยวิจัย ที่ทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จรียา ยี่มรัตน์บวร
(หัวหน้าโครงการวิจัย)
5 สิงหาคม 2558



บทคัดย่อ

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่ใช้ระบบเอเอส แต่พบว่ามีปัญหา น้ำทิ้งที่ออกจากระบบยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์และสีย้อมหลงเหลืออยู่ ดังนั้น จึงควรมีการเพิ่มระบบบำบัดขั้นที่สาม งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และสีย้อมจากน้ำทิ้งของระบบเอเอสได้ดี แต่มีปัญหาการอุดตันของตัวกลางในระบบ มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดและอายุการใช้งานของระบบลดลง ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการอุดตันและการคาดการณ์อายุการใช้งานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง ใช้ตัวกลางหินดินดานเปรียบเทียบกับตัวกลางกรวดผสมทราย เนื่องจากหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสี เพื่อบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส มี 3 ชุดการทดลอง เติมน้ำที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เข้าระบบอยู่ในช่วง 396.53 – 432.57, 769.02 – 859.14 และ 1,477.96 – 1,556.06 กิโลกรัมซีไอดี/เฮกแตร์.วัน ตามลำดับ โดยแต่ละชุดการทดลองประกอบไปด้วยเซตที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน 2 เซต ได้แก่ เซต SP และ SC เซตที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทรายอีก 2 เซต ได้แก่ เซต KP และ KC ผลการศึกษาพบว่า ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เซตที่ใช้ตัวกลางดินดานมีประสิทธิภาพบำบัดซีไอดี บีไอดี และสีย้อม อยู่ในช่วงร้อยละ 77.59 – 88.04, 89.20 – 92.57 และ 71.49 – 87.93 ตามลำดับ สูงกว่าเซตตัวกลางกรวดผสมทราย ผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่านและประสิทธิภาพการบำบัดสามารถนำมาคาดการณ์อายุการใช้งานตัวกลางในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่า เซตตัวกลางหินดินดานที่ปลูกต้นอ้อ (SP) ของชุดการทดลองที่ 1 คาดการณ์อายุการใช้งานระบบนานที่สุด 510 วัน ขณะที่เซตตัวกลางกรวดผสมทรายของชุดการทดลองที่ 3 คาดการณ์การใช้งานระบบเพียง 179 วัน จะเห็นได้ว่าตัวกลางหินดินดานมีอายุการใช้งานระบบได้นานกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย 2.85 เท่า และพบว่าอัตราการสะสมของแข็งและอนุภาคขนาดใหญ่ (5 – 20 ไมโครเมตร) ในคอลัมน์แรกมากกว่าร้อยละ 40 ของปริมาณอนุภาคทั้งหมด ส่วนอนุภาคขนาดเล็ก (2 – 4 ไมโครเมตร) ส่วนใหญ่จะเกิดการสะสมมากในคอลัมน์ที่สอง ดังนั้นเมื่อเดินระบบได้นาน 1.5 – 2 ปี ควรเปลี่ยนชั้นตัวกลางที่ระดับความลึก 20 – 50 เซนติเมตรเพื่อยืดอายุการใช้งานของตัวกลางในระบบและให้น้ำที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

Abstract

The effluent from Activated Sludge (AS) system, commonly used in textile industry, is found to have the remaining amount of organic matter and color. It is suggested to add a tertiary treatment system. Previous researches had proved that the constructed wetland (CW) could be used as a tertiary treatment system to remove organic matter and color from effluent of the system. The CW shows high efficiency of organic matter and color removal. However, the clogging of the media will result in a decrease of the efficiency of the system and reduce its' lifespan. The objectives of this research; is to study the clogging pattern and to estimate lifespan of the vertical subsurface constructed wetland system (VSF) with shale as media. Because of their high adsorption capacity and compared with gravel-sand as media for treatment of effluent from textile. Three VSF series with organic loading 396.53 – 432.57, 769.02 – 859.14 and 1,477.96 – 1,556.06 kg.COD/ha.-d, respectively, were set. Each series composed of 2 sets of shale as media, SP and SC, the 2 sets of gravel-sand as media, KP and KC. The results showed that the set with shale as media (SP and SC) had removal efficiencies in COD, BOD and color in the range of 77.59 – 88.04, 89.20 – 92.57 and 71.49 – 87.93, respectively, and higher than gravel-sand sets. The results of the filtration rate and removal efficiencies were used to estimate the lifespan of media in VSF. It was found that the shale set with reed (*Phragmites australis*) of series 1 had 510 days for lifespan estimation while the gravel-sand set of series 3 had 179 days for lifespan estimation. It was cleared that the shale set had lifespan 2.85 times of gravel-sand set. And more than 40% of the particle size (5-20 μm) was accumulated in the first column of each set, while, the smaller particle size (2-4 μm) was mostly was accumulated in the second column.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	5
2.1.1 การเตรียมผ้า.....	5
2.1.2 การย้อมหรือการให้สี (Textile Dyeing).....	7
2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Finishing).....	8
2.2 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	8
2.2.1 องค์ประกอบของลักษณะน้ำเสีย.....	8
2.2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส.....	10
2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....	10
2.4 สีย้อม.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1	องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม..... 12
2.4.2	สีย้อมตามโครงสร้างเคมี..... 13
2.4.3	สีย้อมเอโซ..... 14
2.5	กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม..... 16
2.5.1	การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)..... 17
2.5.2	การออกซิเดชัน (Oxidation Method)..... 17
2.5.3	การดูดซับ (Adsorption)..... 17
2.5.4	เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology)..... 18
2.5.5	ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetland)..... 18
2.6	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 20
2.6.1	องค์ประกอบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 20
2.6.2	ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 24
2.6.3	กลไกการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 26
2.6.4	เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 32
2.7	หินดินดาน..... 33
2.7.1	การใช้ประโยชน์หินดินดาน ด้านสิ่งแวดล้อม..... 34
2.8	ต้นอ้อ..... 36
2.9	การอุดตันของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 38
2.9.1	กลไกการอุดตัน..... 38
2.9.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตัน..... 39
2.9.3	สมการที่ใช้อธิบายกลไกการอุดตัน..... 40
2.9.4	การอุดตันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 42
2.10	สรุป..... 42
3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 44
3.1	สถานที่ทำการศึกษวิจัย..... 44
3.2	ระยะเวลาทำการศึกษวิจัย..... 44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....44
3.3.1	การเตรียมตัวกลางและศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง.....46
3.3.2	การออกแบบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....47
3.4	การเดินระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....52
3.4.1	ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....52
3.4.2	การเดินระบบ.....52
3.4.3	การเก็บตัวอย่าง.....52
3.4.4	การประเมินการอุดตัน.....55
3.5	การวิเคราะห์ข้อมูล.....55
3.5.1	การคาดการณ์อายุระบบ.....55
3.5.2	ประเมินค่าประสิทธิภาพของระบบ.....55
3.5.3	การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ.....56
4	ผลการศึกษาและการอภิปรายผล.....58
4.1	ลักษณะน้ำที่ส่งเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....58
4.2	ตัวกลางหินดินดาน และกรวดผสมทรายที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....59
4.3	สภาวะแวดล้อมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....61
4.4	ข้อมูลทางอุตุวิทยามหาวิทยาลัยบริเวณที่ตั้งระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....63
4.5	ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....63
4.5.1	การบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดี.....63
4.5.2	การบำบัดสีย้อม.....70
4.5.3	การบำบัดของแข็ง.....76
4.6	การเจริญเติบโตของพืชในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....83
4.7	การคาดการณ์อายุใช้งานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....84
4.7.1	ค่าอัตราการซึมผ่าน.....85
4.7.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับประสิทธิภาพการบำบัด.....89
4.7.3	รูปแบบการอุดตันของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7.4 การคาดการณ์อายุการใช้งานระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	107
4.8 การนำข้อมูลไปใช้งาน.....	110
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	113
5.1 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	113
5.2 การอุดตันของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	113
5.3 การคาดการณ์อายุการใช้งานระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	114
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	115
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าอัตราการไหลและระยะเวลาเก็บกัก.....	127
ภาคผนวก ข การคำนวณอัตราการระบพรทุกสาร.....	129
ภาคผนวก ค ผลการตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิตัว.....	131
ภาคผนวก ง ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตของพืช.....	133
ภาคผนวก จ การคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบ.....	137
ภาคผนวก ฉ การคำนวณอัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบ.....	153
ภาคผนวก ช การคำนวณอัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบ.....	169
ภาคผนวก ซ บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	185

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม..... 9
2.2	ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดเอเอส..... 10
2.3	ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม..... 11
2.4	องค์ประกอบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 20
2.5	ลักษณะตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 21
2.6	บทบาทส่วนต่าง ๆ ของพืชโผล่พื้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 23
2.7	กลไกการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 27
2.8	เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 33
2.9	องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน..... 34
3.1	ขนาดตัวกลางหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทรายที่ใช้ในการศึกษา..... 46
3.2	วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง..... 46
3.3	สรุปค่าการออกแบบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย..... 51
3.4	องค์ประกอบน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอสที่ใช้ศึกษาวิจัย..... 52
3.5	สรุปลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง..... 52
3.6	วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินการอุดตัน..... 54
3.7	วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์ และสภาวะภายในระบบจำลอง..... 54
4.1	ความเข้มข้นของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบบำบัดเอเอส..... 59
4.2	อัตราการระบรทุกสารที่เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 59
4.3	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง..... 60
4.4	สภาวะแวดล้อมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Min – Max)..... 62
4.5	ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดี..... 65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และบีโอดี ของแต่ละชุดการทดลอง.....	69
4.7 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และบีโอดี ระหว่างเซทที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง.....	70
4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม.....	72
4.9 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ของแต่ละชุดการทดลอง.....	75
4.10 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ระหว่างเซทที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง.....	76
4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย.....	78
4.12 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยของแต่ละชุดการทดลอง.....	82
4.13 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยระหว่างเซทที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง.....	83
4.14 การเจริญเติบโตของพืชในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	84
4.15 ค่าอัตราการซึมผ่านของแต่ละชุดการทดลอง.....	85
4.16 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าอัตราการซึมผ่าน ของแต่ละชุดการทดลอง.....	88
4.17 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าอัตราการซึมผ่าน ระหว่างเซทที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง.....	89
4.18 สัดส่วนอนุภาคในน้ำเข้าของแต่ละชุดการทดลอง.....	101

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม..... 6
2.2	โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid red B..... 13
2.3	โครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมเอโซ..... 14
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid Orange 7..... 15
2.5	กระบวนการลดรูป (Reduction Cleavage)..... 16
2.6	ตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 21
2.7	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง..... 25
2.8	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง..... 26
2.9	กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 28
2.10	กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 29
2.11	กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 30
2.12	กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 31
2.13	กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์..... 32
2.14	ลักษณะรากและลำต้นของต้นอ้อ..... 36
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็ก..... 39
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... 45
3.2	ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง..... 47
3.3	ชุดการทดลองระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง ประกอบด้วยทั้งหมด 4 เซ็ต..... 48
3.4	ขนาดระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง จำนวน 1 เซ็ต ประกอบด้วยจำนวน 2 คอลัมน์..... 49
3.5	การบรรจุตัวกลางลงในคอลัมน์พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง..... 50
3.6	ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง..... 53
3.7	จุดเก็บตัวอย่างระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง..... 53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ขนาดมวลคละของตัวกลางหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทราย.....	61
4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี.....	66
4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี.....	66
4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและบีโอดี ตลอดระยะเวลา 196 วัน.....	67
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม.....	73
4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ตลอดระยะเวลา 196 วัน.....	73
4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย.....	79
4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำ.....	79
4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำ ตลอดระยะเวลา 196 วัน.....	80
4.10 ค่าอัตราการซึมผ่าน ตลอดระยะเวลา 196 วัน.....	86
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP.....	90
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP.....	91
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP.....	91
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำ ของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP.....	92
4.15 อัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1.....	93
4.16 อัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2.....	94
4.17 อัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

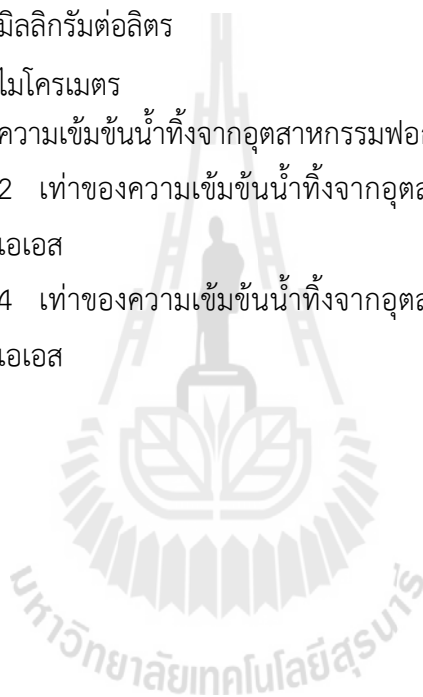
รูปที่	หน้า
4.18 อัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1.....	95
4.19 อัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2.....	95
4.20 อัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3.....	96
4.21 อัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1.....	97
4.22 อัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2.....	98
4.23 อัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3.....	98
4.24 สัดส่วนอนุภาคในน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส ก่อนเข้าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.....	100
4.25 อนุภาคที่สะสมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1.....	101
4.26 อนุภาคที่สะสมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2.....	102
4.27 อนุภาคที่สะสมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3.....	102
4.28 ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค ชุดการทดลองที่ 1.....	104
4.29 ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค ชุดการทดลองที่ 2.....	105
4.30 ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค ชุดการทดลองที่ 3.....	106
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เซ็ต SP.....	107
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เซ็ต SC.....	108
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เซ็ต KP.....	108
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เซ็ต KC.....	109
4.35 การเปลี่ยนชั้นตัวกลางเมื่อครบระยะเวลายกหนด.....	111
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับอัตราการระบรทุกสารที่เข้าสู่ระบบ.....	112

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AS	=	Activated sludge system
CW	=	Constructed wetland
VSF	=	Vertical subsurface constructed wetland system
FWS	=	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง
SF	=	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง
COD	=	Chemical Oxygen Demand
BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
TS	=	ของแข็งทั้งหมด
TSS, SS	=	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
TDS	=	ของแข็งละลายน้ำ
ORP	=	Oxidation-Reduction Potential
EPA	=	Environmental Protection Agency
SP	=	เข้ทตัวกลางหินดินดานปลูกต้นอ้อ
SC	=	เข้ทตัวกลางหินดินดานไม่ปลูกต้นอ้อ
KP	=	เข้ทตัวกลางกรวดผสมทรายปลูกต้นอ้อ
KC	=	เข้ทตัวกลางกรวดผสมทรายไม่ปลูกต้นอ้อ
SPM	=	คอลัมน์แรกตัวกลางหินดินดานปลูกต้นอ้อ
SCM	=	คอลัมน์แรกตัวกลางหินดินดานไม่ปลูกต้นอ้อ
KPM	=	คอลัมน์แรกตัวกลางกรวดผสมทรายปลูกต้นอ้อ
KCM	=	คอลัมน์แรกตัวกลางกรวดผสมทรายไม่ปลูกต้นอ้อ
SPO	=	คอลัมน์ที่สองตัวกลางหินดินดานปลูกต้นอ้อ
SCO	=	คอลัมน์ที่สองตัวกลางหินดินดานไม่ปลูกต้นอ้อ
KPO	=	คอลัมน์ที่สองตัวกลางกรวดผสมทรายปลูกต้นอ้อ
KCO	=	คอลัมน์ที่สองตัวกลางกรวดผสมทรายไม่ปลูกต้นอ้อ
S.D.	=	Standard Deviation

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Pt-Co	=	Platinum Cobalt scale
กก./เฮกแตร์.วัน	=	กิโลกรัม/เฮกแตร์.วัน
มม.	=	มิลลิเมตร
ซม.	=	เซนติเมตร
ม.	=	เมตร
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
μm	=	ไมโครเมตร
1X	=	ความเข้มข้นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส
2X	=	2 เท่าของความเข้มข้นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส
4X	=	4 เท่าของความเข้มข้นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญ ทำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นอันดับต้น ๆ อุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ มากมาย โดยอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมชั้นปลาย ซึ่งได้แก่ อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูปจากฐานข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ตามภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย ปริมาณการส่งออกที่มากของอุตสาหกรรมสิ่งทอในแต่ละปีมีปริมาณสูง ดังนั้นโรงงานฟอกย้อมจึงมีการใช้น้ำและสีย้อมในปริมาณมาก จึงมีปริมาณน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสีย้อมเกิดขึ้นในปริมาณมากตามไปด้วยหากโรงงานมีระบบการจัดการน้ำเสียที่ไม่มีประสิทธิภาพและปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำสาธารณะและทัศนียภาพ อีกทั้งสีที่ปนเปื้อนลงไปในแหล่งน้ำธรรมชาตินั้น ก่อให้เกิดความน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น มีผลในการบดบังแสงแดด การสังเคราะห์แสง และสร้างออกซิเจนของแพลงก์ตอนและพืชน้ำ (Vandevivere, Bianchi and Verstraete, 1998) ทำให้กระบวนการฟอกตัวเอง (Natural self purification) ของแหล่งน้ำธรรมชาติเสียไป เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศแหล่งน้ำโดยตรง (Saratale, Saratale, Kalyani, Chang and Govindwar, 2009) นอกจากนี้สีย้อมผ้าแทบทุกชนิดมีส่วนประกอบที่เป็นพิษ บางชนิดมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amine) และสีย้อมส่วนมากมีองค์ประกอบเป็นสารโลหะหนัก ซึ่งมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ อีกทั้งยังเป็นสารก่อมะเร็งด้วย (Myslak and Bolt, 1998) สีย้อมเอโซ (Azo dye) เป็นสีย้อมที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมากกว่าร้อยละ 70 เนื่องจากมีสีให้เลือกครบทุกเฉดสีและมีกลุ่มสีให้เลือกหลากหลายชนิด สีย้อมเอโซเป็นสีที่มีโครงสร้างอะโรมาติกที่ซับซ้อน ทำให้มีความคงตัวสูง สามารถทนต่อการย่อยสลายได้ดี ดังนั้นน้ำทิ้งที่ระบายออกจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง หรือแหล่งน้ำธรรมชาติ ควรได้รับการบำบัดเพื่อให้มีคุณภาพน้ำได้ตามมาตรฐาน เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ

การบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมในปัจจุบันมีวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ วิธีการทางกายภาพ-เคมี เช่น การดูดซับ (Adsorption) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นตัวดูดซับ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อม แต่มีข้อเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงเช่นเดียวกัน (Robinson, McMullan, Marchant and Nigam, 2001) การใช้โอโซน (Ozonation) มีข้อดีคือ ใช้น้ำทิ้งที่มีปริมาณมากและมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีของน้ำทิ้งได้ดี แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วย สารไนโตรเจน (Nitrogen) คลอรีน (Chlorine) หรือซัลเฟอร์ (Sulphur) จะเกิดเป็น

สารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารตั้งต้นเดิม และราคาค่าก่อสร้างระบบสูง (วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง (Membrane Filtration) วิธีนี้สามารถใช้แยกสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ดี แต่มีข้อเสียคือ คักยภาพในการใช้งานและรองรับน้ำเสียในปริมาณมากได้ไม่ดี มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและบำรุงรักษาสูง (Dos Santos, Cervantes and Van Lier, 2007) การตกตะกอนด้วยเคมี (Chemical Coagulation) มีความต้องการใช้พลังงานมากและสิ้นเปลืองสารเคมี เกิดตะกอนเคมีและสารที่มีความเป็นพิษเกิดขึ้นในปริมาณมาก และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง (วีรานุช หลาง, ธนสิริ มีชัย และ วิชชุพร จันทรศรี, 2008) โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ระบบเอเอส (Activated sludge system) (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) แต่เนื่องจากน้ำเสียฟอกย้อมบำบัดได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จึงพบว่าน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอสมักมีปัญหาความเข้มข้นของสีย้อมและสารอินทรีย์หลงเหลือในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านออกจากระบบไม่ได้ค่าตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อแหล่งน้ำสาธารณะ จากการสำรวจโรงงานฟอกย้อมจำนวน 100 โรงงาน โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2542) พบว่ามีโรงงานจำนวน 32 โรงงาน มีปัญหาที่ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้ค่าตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด โดยไม่สามารถกำจัดซีไอดีและบีไอดีให้ได้ตามมาตรฐาน และยังคงมีสีหลงเหลืออยู่ทำให้เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นจึงควรมีการเพิ่มระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสีที่ยังคงหลงเหลือในน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดแบบเอเอส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed wetland system) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบกลไกการบำบัดของเสียตามธรรมชาติ โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพื่อเป็นระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อม บำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านจากระบบบำบัดเอเอส เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ สารอาหารต่าง ๆ และสีย้อมได้ เป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำ ง่ายต่อการใช้งาน และบำรุงรักษา เป็นระบบที่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน และไม่มีตะกอนส่วนเกินเกิดขึ้น (Excess sludge) ที่ต้องนำไปกำจัดเพิ่มเติม จากผลการศึกษาวิจัยจำนวนมาก พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ สารอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (Drizo, Frost, Grace and Smith, 2000; อมรา ดาวโรตอง, 2550; ปิติพร มโนคูน, 2555; Ong, Uchiyama, Inadama and Yamagiwa, 2009) และสีย้อมได้ (Bulc and Ojstrsek, 2008; Ojstrsek, Fakin and Vrhovsek, 2007, ศิริพรรณ คำแน่น, 2555) และมีการศึกษาพบว่า หินดินดานสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ (Drizo et al., 2000; อมรา ดาวโรตอง, 2550) โดยพบว่า หินดินดานมีความสามารถในการดูดซับไนเตรท แอมโมเนีย และฟอสฟอรัส เท่ากับ 0.182, 0.182 และ 0.585 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (อมรา ดาวโรตอง, 2550) และมีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Remazol Deep Red RGB (Red) เท่ากับ 0.0110 – 0.0322 มิลลิกรัมต่อกรัม สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) เท่ากับ 0.4479 – 1.1409 มิลลิกรัมต่อกรัม และสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) เท่ากับ 0.0133 – 0.0255 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากผลการศึกษาโดยนำน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมาทดสอบกับตัวกลางหินดินดานในระบบคอลัมน์แบบ Fixed Bed พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด

ซีโอดีและสีของคอลัมน์หินดินดานมีค่าเท่ากับร้อยละ 97 และ 90 ตามลำดับ (สายรุ่ง นพคุณทด, 2555) และจากงานวิจัยของ ศิริพรรณ คำแนน (2555) มีการนำหินดินดานมาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางต่ออนุกรมกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง เพื่อบำบัดสีย้อมเอโซและสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ผ่านระบบเอเอส โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเอโซ ซีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จากน้ำทิ้งพอกย้อมสังเคราะห์อยู่ในช่วงร้อยละ 95.22 – 98.58, 79.16 – 90.76, 72.30 – 81.69, 68.62 – 79.56 และ 88.48 – 92.53 ตามลำดับ และใช้ต้นทุนเป็นพีช เนื่องจากต้นทุนอ้อมีเอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระ จึงทำให้ต้นทุนสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียพอกย้อมได้ และเอนไซม์ Peroxidase (POD) ที่มีอยู่ในต้นอ้อยยังมีความสำคัญในการกำจัดสารที่เป็นองค์ประกอบของสีย้อมได้ (Azevedo, Martins, Prazeres, Vojinovic, Cabral and Fonseca, 2003; Veitch, 2004)

ถึงแม้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีข้อดีในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมพอกย้อม แต่ก็มีข้อจำกัด มักมีปัญหาคัดตันของระบบ ซึ่งเกิดขึ้นที่ตัวกลางของระบบเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบลดลง อีกทั้งยังทำให้อายุการใช้งานของระบบสั้นลง ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนตัวกลางใหม่ โดยปกติแล้วตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต้องทำการเปลี่ยนใหม่เมื่อเดินระบบผ่านไปเป็นระยะเวลาประมาณ 5 ปี ซึ่งค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างระบบจะอยู่ที่ค่าใช้จ่ายของตัวกลาง โดยคิดเป็นร้อยละ 41.20 ของค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ จึงเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ (Chen, Chen, Zhou, Li and Zhou, 2008) ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และเกิดความยุ่งยากในการดูแลรักษาระบบ ปัญหาคัดตันของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เกิดเนื่องจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกรองและการถ่ายเทออกซิเจนของระบบลดลง กลไกการอุดตันของระบบนั้นค่อนข้างซับซ้อนและเข้าใจยาก เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวภาพ เคมี และกายภาพ การอุดตันส่วนใหญ่เกิดจากอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร มีบทบาทสำคัญในการอุดตันของระบบ (Hua, Zhu, Zhao and Zhang, 2010) และเกิดการอุดตันจากการเกิดไบโอฟิล์มของจุลินทรีย์ (Biofilm clogging)

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง โดยใช้ตัวกลางหินดินดาน และต้นอ้อยเป็นพีชในระบบ ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส โดยจะทำการศึกษากลไกการอุดตันของตัวกลางหินดินดานในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพอกย้อม เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางหินดินดานในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อประโยชน์ในการนำข้อมูลไปใช้ในการจัดการระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ การออกแบบระบบและยืดอายุการใช้งานของตัวกลาง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษากลไกการอุดตันของตัวกลางหินดินดานในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพอกย้อมด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง

1.2.2 คาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางหินดินดานในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพอกย้อม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาคั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยโดยนำระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส เพื่อศึกษากลไกการอุดตันของระบบ โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาการอุดตันของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทราย เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตัน ได้แก่ อัตราการซึมผ่าน (Infiltration Rate), ขนาดอนุภาค (Particle size), ของแข็งทั้งหมด (Total solids) และของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids) ใช้ในการคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

1.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ และสีย้อมของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง

1.3.3 ออกแบบชุดการทดลองระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้งเพื่อกำหนดอัตราการไหล ระยะเวลาเก็บกัก และสถานะแวดล้อมภายในระบบ

1.3.4 ศึกษาลักษณะกายภาพตัวกลางหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทราย ได้แก่ ความพรุน ค่าการซึมผ่าน และความหนาแน่น เพื่อนำมาประเมินลักษณะสมบัติของตัวกลางในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง

1.3.5 ศึกษาสถานะแวดล้อมขณะทำการเดินระบบ ประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมและสารอินทรีย์

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

การศึกษาลักษณะและการอุดตันของตัวกลางหินดินดาน เปรียบเทียบกับตัวกลางกรวดผสมทราย ในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง ในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส เพื่อนำไปคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลาง โดยการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่าน (Infiltration Rate) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งแขวนลอย (Total suspended solids, TSS) และประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และสีย้อม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำข้อมูลที่ได้อาคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางหินดินดานในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการจัดการระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ การออกแบบระบบ และยืดอายุการใช้งานของตัวกลางหินดินดานในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ทำให้อายุการใช้งานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยาวนานขึ้น

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นอุตสาหกรรมหลักในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ ถือเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยอุตสาหกรรมสิ่งทอมีกระบวนการที่สำคัญ คือ การฟอกย้อม น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่จะยังคงมีสีย้อมหลงเหลือจากกระบวนการย้อม เมื่อสีย้อมปนเปื้อนไปในแหล่งน้ำ ส่งผลให้น้ำมีความสกปรกสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และมีพีเอชสูง ก่อให้เกิดการขัดขวางการส่องผ่านของแสง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง ส่งผลกระทบต่อทรัพยากรแหล่งน้ำ มีการนำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม แต่ก็มีข้อจำกัด ในเรื่องปัญหาการอุดตันของระบบ จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องในการศึกษาวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

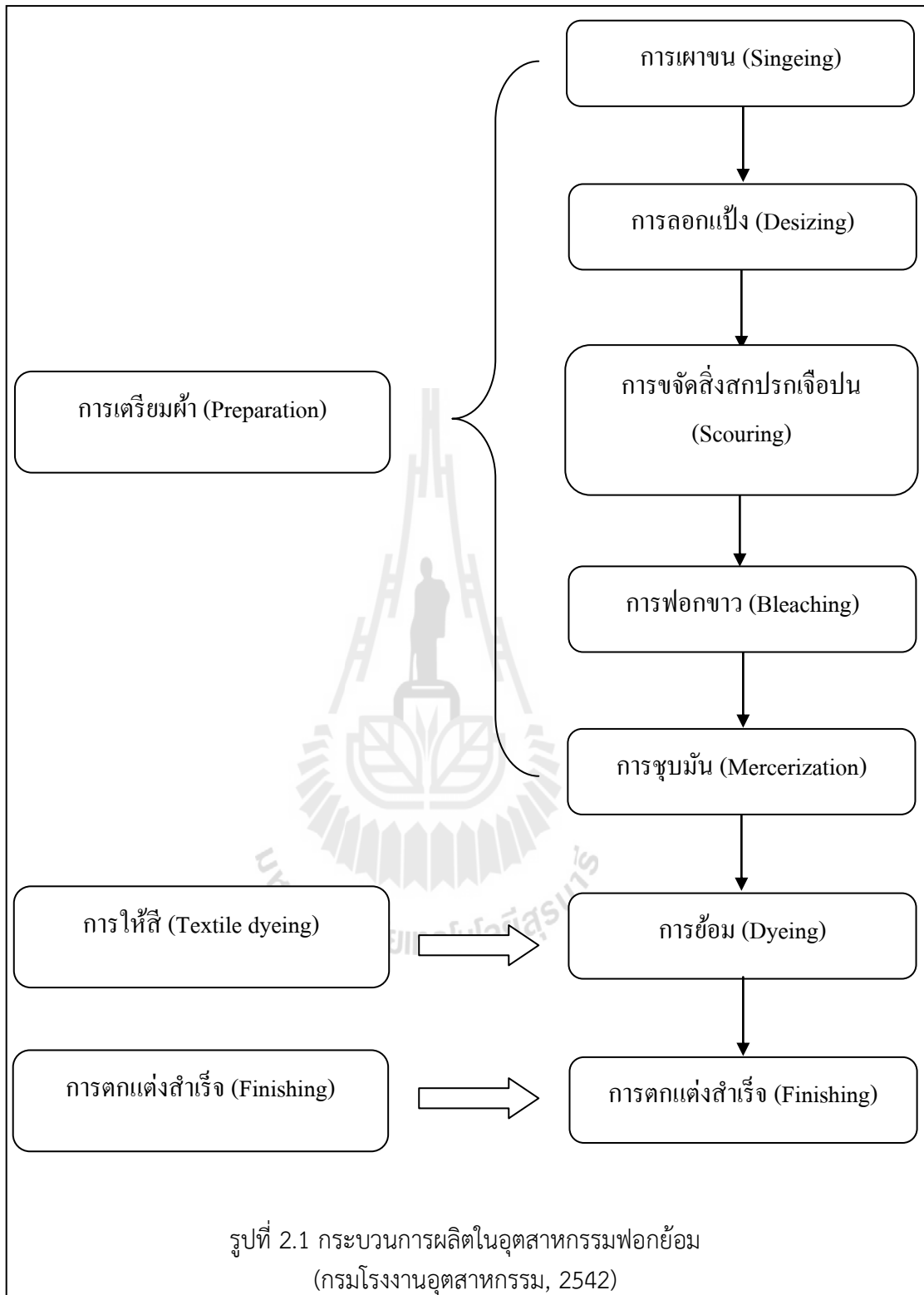
กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542) อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมหลักในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยมีการส่งออกเครื่องนุ่งห่ม สามารถนำเงินตราเข้าประเทศอย่างต่อเนื่อง กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมผ้า เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบออกจากโรงปั่นหรือทอผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้าที่ให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี จุดมุ่งหมายที่สำคัญของขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอ เพื่อขจัดสิ่งสกปรก เจือปนในเส้นใยเพื่อให้เส้นใยมีความสะอาดและมีการดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมสิ่งทอที่สำคัญมีดังนี้ คือ

- การเผาขน (Singeing)

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



- การลอกแป้ง (Desizing)

ในขั้นตอนการเตรียมผ้าจำเป็นต้องมีการลอกแป้งเพื่อให้ด้ายแข็ง และทอได้ง่ายขึ้น นอกจากจะใช้แป้งแล้วยังมีการใช้สารสังเคราะห์ซึ่งเรียกว่าสารไซซิง (sizing agent) เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxyl methyl cellulose; CMC) โพลีอะคริลิก (Polyacrylic) เป็นต้น แป้งหรือสารไซซิงข้างต้น จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดออกก่อน เพื่อให้การทำความสะอาดเส้นใยในขั้นตอนต่อไปได้ผลดี การลอกแป้งอาจทำโดยนำผ้าไปแช่น้ำร้อนให้เส้นใยพองตัว เพื่อให้สารช่วยย่อย (เอนไซม์) เข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้งบนเส้นใยได้ง่าย ทำให้แป้งหลุดออกจากเส้นใยและไปอยู่ในน้ำทิ้งของกระบวนการการผลิต

- การกำจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

การกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น สารประกอบพวกเกลือทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จำเป็นต้องขจัดออกไป เพื่อให้เส้นใยมีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ กรรมวิธีการขจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดมีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรกในเส้นใย แต่ละชนิด

- การฟอกขาว (Bleaching)

เป็นขั้นตอนของการขจัดสีที่มีอยู่บนเส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่ติดตามตามธรรมชาติหรือจากการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปั่นหรือการทอ หลังจากทำความสะอาดแล้วยังคง มีสีและวัสดุเจือปนอื่น ๆ เหลืออยู่ในผ้า การฟอกขาวจะทำให้สิ่งเหล่านั้นสลายตัวหรือลด สารฟอกขาวที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium Hypochlorite; NaOCl) และโซเดียมคลอไรต์ (Sodium Chlorite; $NaClO_2$) เป็นต้น

- การชุบมัน (Mercerization)

การชุบมันหรือเมอร์เซอร์ไรซ์เป็นการเพิ่มความเงา ความเหนียวให้กับเส้นด้ายเส้นใยพองตัวอย่างสม่ำเสมอและมีการหดตัวตามยาว การดูดซึมน้ำดีขึ้น เนื่องจากมีการขยายตัวของเส้นใย

2.1.2 การย้อมหรือการให้สี (Textile Dyeing)

หลักการย้อมสีคือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลายไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อม เช่น เส้นใย ผ้า ฝ้าย ฯลฯ แล้วทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอดบนผิวรอบภาคตัดขวางของวัสดุที่จะย้อมด้วย เนื่องจาก

ลักษณะของวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน จึงต้องเลือกชนิดสีย้อมให้เหมาะสมกับชนิดของเส้นใยผ้า

2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อเปลี่ยนแปลง ปรับปรุง หรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ เช่น คุณสมบัติการทนต่อการยับย่น ความนิ่ม ทำให้ผ้ามีคุณสมบัติกันน้ำ และความสามารถในการทนไฟ เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.2.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

จากฐานข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็ก กระจายตัวอยู่ตามภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย อุตสาหกรรมประเภทนี้มีการใช้น้ำปริมาณมาก และมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำสูง ซึ่งมลสารที่พบในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม สามารถจำแนกเป็นประเภทสำคัญ ได้ดังนี้

2.2.1 องค์ประกอบของลักษณะน้ำเสีย

- สีย้อม การย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลาย และถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงอยู่ในสารละลายจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

- สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

- 1) สารช่วยย้อม ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก สารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สม่ำเสมอ

- 2) สารเคมีพื้นฐาน เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรดต่าง สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

- 3) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา และสารกันไฟ เป็นต้น ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้างและถูกปล่อยปนออกมากับน้ำเสีย

- สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้า สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้ง

ที่เป็นสารซีฟิ่ง ไซมัน โพรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนฟอกย้อม และจะหลุดติดออกมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

- เศษเส้นใย หากมีปริมาณมากทำให้เกิดปัญหาการอุดตันในระบบบำบัดน้ำเสียได้ ทั้งนี้ น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้ามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิต โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้าโดยทั่วไปจะมีปริมาณสารอินทรีย์สูง ความเป็นด่างสูง อุณหภูมิสูง และความเข้มข้นของแข็งละลายและของแข็งแขวนลอยสูง และมีโลหะหนักเจือปน ซึ่งโรงงานฟอกย้อมและพิมพ์ผ้าแต่ละประเภทมีลักษณะสมบัติน้ำเสียแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ลักษณะสมบัติ	ประเภทของการฟอกย้อม				
	ด้าย	ผ้าถัก	ผ้าทอ	ด้ายผ้าอื่น ๆ	พิมพ์ผ้า
ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	6 - 2,400	8 - 3,000	22 - 3,000	20 - 6,500	-
พีเอช	5.7 - 9.8	7.13 - 11.87	4.86 - 12.06	3.13 - 12.74	8 - 11
บีโอดี (มก./ล.)	32 - 1,329	25 - 423	25 - 7,574	19 - 1,184	120 - 440
ซีโอดี (มก./ล.)	107 - 2,642	172 - 1,410	118 - 19,031	85 - 4,108	300 - 1,100
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	8 - 86	18 - 325	18 - 2,025	14 - 1,212	50 - 240
สีย้อม (Pt-Co)	50 - 1,000	50 - 3,500	100 - 3,750	70 - 4,000	-

ที่มา : วิไลศรี ศรีทองพนาบุลย์ (2555)

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้าโดยทั่วไปจะมีปริมาณสารอินทรีย์สูง และมีความเข้มข้นของสีย้อมสูง ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของผ้าหรือเส้นใยที่ใช้ในการผลิต โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนฟอกย้อม และจะหลุดติดออกมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

2.2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส

โดยทั่วไปอุตสาหกรรมฟอกย้อมนิยมใช้ระบบบำบัดแบบระบบเอเอส (Activated sludge system) แต่เนื่องจากน้ำเสียฟอกย้อมบำบัดได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ทำให้พบว่าระบบเอเอสยังคงมีปัญหาเรื่องน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดเกี่ยวกับสีย้อม และสารอินทรีย์หลงเหลือในน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านออกจากระบบไม่ได้ตามมาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรม และก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อแหล่งรับน้ำสาธารณะ ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการบำบัดเอเอส พบว่ามีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.5 – 8.1 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี อยู่ในช่วง 106 – 488 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี อยู่ในช่วง 13.8 – 48.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสีอยู่ในช่วง 127 – 229 Pt-Co ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีและบีโอดี ของน้ำทิ้งนั้นยังเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และมีปริมาณสีหลงเหลืออยู่มาก

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดเอเอส

พารามิเตอร์	Nasiman, 1996	Amar et. al., 2009	Gozávez- Zafrilla et. al., 2008	Bes-Pía et. al., 2009
พีเอช	7.8	7.6 – 8.1	7.8	7.5 – 8.0
บีโอดี (มก./ล.)	48	13.8 – 40	45	-
ซีโอดี (มก./ล.)	488	106 – 175	150	200 – 250
สีย้อม (Pt-Co)	-	127 – 229	-	-

2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่มีความพิษต่ำ แต่สารประกอบและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ทำให้สีย้อมมีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยสีย้อมและสารเคมีต่าง ๆ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งด้านระบบนิเวศน์แหล่งน้ำ สัตว์น้ำและมนุษย์ โดยผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมดังสรุปในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

ผลของน้ำเสีย	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง	<ul style="list-style-type: none"> - สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน - แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเองได้ (Self Purification) - เกิดกลิ่นรบกวน - ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นเพื่อประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้
สารเคมีบางตัวเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ - เกิดการสะสมในระบบนิเวศน์ (Bioaccumulation) หากสารนั้นเป็นสารที่ย่อยสลายยาก - เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในกรณีที่ได้รับสารโดยตรง หากบริโภคสัตว์น้ำที่ได้รับพิษเข้าไป และได้รับทางอ้อม
พีเอช	<ul style="list-style-type: none"> - น้ำเสียที่มีค่าพีเอชสูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตสามารถดำรงชีพอยู่ได้ในน้ำที่มีสภาวะเป็นกลาง
อุณหภูมิ	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ - ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง - เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
ของแข็งละลายน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - ของแข็งละลายน้ำได้บางตัวจะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นโรคได้ - ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำเพื่อประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้
สี	<ul style="list-style-type: none"> - ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ - ทำให้ปริมาณแสงที่ส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดน้อยลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง
โลหะหนัก	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรค - โลหะหนักสะสมอยู่ในระบบนิเวศน์ - เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์
ของแข็งแขวนลอย	<ul style="list-style-type: none"> - เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ - สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้ - ทำลายทัศนียภาพแหล่งน้ำ

ที่มา : ชนิดา เสมรัตน์ (2543); ปฏิเวช ชินเชษฐ (2543); Sun, Zhang, Wu and Liu (2010)

2.4 สีย้อม

สีย้อม (Dye stuff) คือ สารอินทรีย์ที่สร้างมาเพื่อติดสีหรือดูดซับแสงโดยการทำให้อยู่บน หรืออยู่ในผิวหน้าของวัตถุ เพื่อทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา ซึ่งความทนทานของสีจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมและพันธะในการยึดติดกับวัตถุนั้น ๆ (อภิชาติ สนธิสมบัติ, 2540) การทำให้สีย้อมมีความคงทน และเพิ่มความสดใสของสี จึงใช้สารโลหะหนัก ได้แก่ แมงกานีส ทองแดง อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว โคบอลต์ ปรัต และสังกะสี ด้วยเหตุนี้ ในน้ำเสียฟอก

ย้อมจึงมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ก่อให้เกิดปัญหาความเป็นพิษของโลหะหนัก (สุกานดา กาสังข์, 2548)

2.4.1 องค์ประกอบของโมเลกุลสีย้อม

โมเลกุลของสีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน (Buckly, 1992) คือ

2.4.1.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye chromophore group)

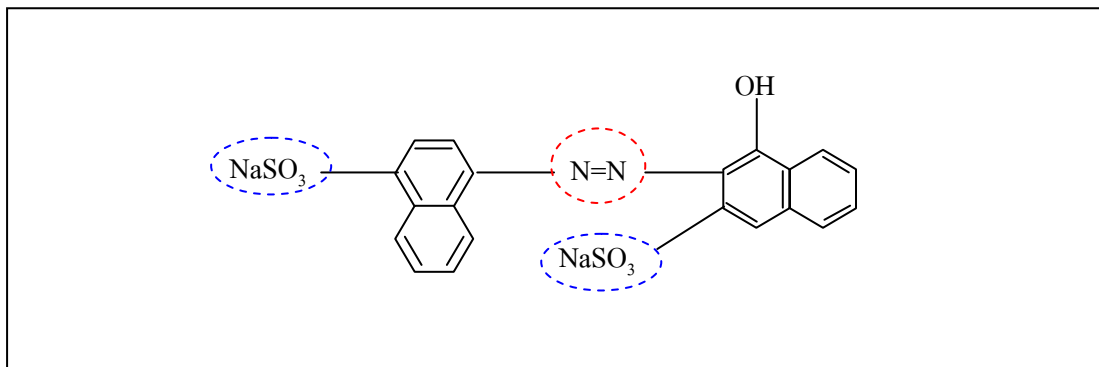
องค์ประกอบส่วนนี้จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อม โดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงตกกระทบโครงสร้างโครโมฟอร์ (Chromophore) จะเกิดการสั่น (Oscillate) เนื่องจากมีการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไปเป็นผลให้เกิดการเห็นสีตามช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์จะมีอยู่ด้วยกัน 5 กลุ่มในจำนวนนี้ที่นิยม ได้แก่

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

โดยเฉพาะกลุ่มเอโซนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอถึงร้อยละ 60 - 70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Zee, Bisschops, Blanchard, Bouwman, Lettinga and Field, 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 พันธะไฮโดรเจน หรือโดยการแทรกซึมของอนุภาคสีย้อมเข้าไปในเส้นใย จากรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซแอซิด (Acid red B) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างโมเลกุลของ สีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ โครโมฟอร์ ซึ่งเป็นส่วนทำให้เกิดสี โครโมฟอร์แบบ (N=N) จัดอยู่ในกลุ่มเอโซ ดังแสดงในวงกลมสีแดง และในโครงสร้างโมเลกุลยังประกอบด้วยออกโซโครม ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกับเส้นใยยึดติดกัน โครงสร้างส่วนนี้ประกอบไปด้วยวงเบนซีน ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ คือ กลุ่มซัลโฟนิล ดังแสดงในวงกลมสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid red B
(Jiang, Zhang, Huang, Chen, Wang and Meng, 2010)

2.4.2 สีย้อมตามโครงสร้างเคมี

สีย้อมที่ขายในท้องตลาดมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่เป็นโครงสร้างหลักกว่า 30 ชนิด แต่โครงสร้างหลักที่มีปริมาณการใช้มากจริง ๆ มีอยู่ไม่ถึง 10 ชนิด ที่สำคัญ (อริศรา พุ่มคชา, 2539) ได้แก่

- สีย้อมเอโซ (Azo Dye)

สีย้อมเอโซ คือ สีย้อมที่มีกลุ่มเอโซอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 60 - 70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Carliell, Barclay, Naidoo, Buckley, Mulholand and Senior, 1995; Ollgarrd, Frost, Galster and Hensen, 1999; Stolz, 2001; Zee et al., 2003; Dos Santos, Cervantes, Yaya-Beas and Van Lier, 2003) คุณลักษณะที่สำคัญของสีย้อมกลุ่มนี้ คือ มีสีให้เลือกครบทุกเฉด แต่โดยทั่วไป จะมีความสำคัญโดยเฉพาะช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และดำ กรรมวิธีสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใสและคงทนต่อแสง ราคาไม่แพง สีย้อมเอโซมีหมู่เอโซ ($N=N$) เป็นโครโมฟอร์ในโครงสร้าง และมีหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) หรืออะมิโน ($-NH_2$) เป็นหมู่ออกโซโครม สีย้อมเอโซมีหลายชนิด เช่น สีแอซิด (Acid Dye) สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) สีไดเรกต์ (Direct Dye) สีเบสิก (Basic Dye) ซึ่งสีย้อมเหล่านี้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี จึงกำจัดได้ง่าย โดยกระบวนการทางกายภาพและชีวภาพ ส่วนสีอะโซอิก (Azoic Dye) สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ (อังคณา อมรศรี, 2544)

- สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone Dye)

สีแอนทราควิโนน คือสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลัก อยู่ในโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีความสำคัญเป็นลำดับ 2 รองจากสีเอโซ โดยครอบคลุมประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมด (ชัยยุทธ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม, 2543) สีแอนทราควิโนนเป็นสีที่มีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีม่วง สีฟ้า สีเขียว และสีแดง เป็นสีที่มีความสว่างสดใส และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มข้นของสีน้อยกว่าสีเอโซและมีราคาแพงอีกด้วย

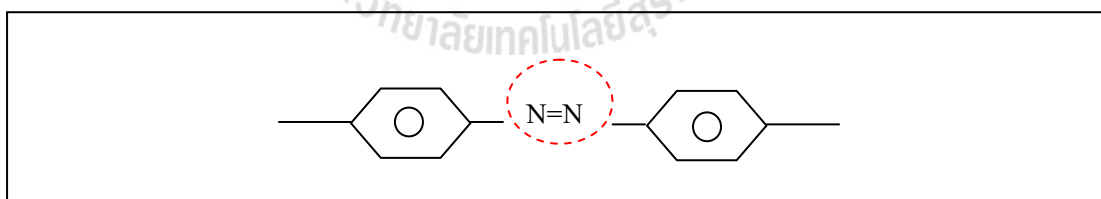
- สีย้อมไตรฟีนิลมีเทน (Triphenylmethane Dye)
สีกลุ่มนี้ให้สีม่วง สีฟ้า และสีเขียว ที่มีความสว่างสดใสมากแต่สมบัติในด้านความคงทนต่อแสงไม่ดี
- สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur Dye)
สีย้อมซัลเฟอร์ นิยมใช้เป็นสีย้อมที่บัพที่ต้องความเข้มข้นสูง เช่น สีดำ สีน้ำตาล สีน้ำเงิน เป็นต้น สีกลุ่มนี้มีสีให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีที่บัพไม่สดใส
- สีย้อมอินดิกอยด์ (Indigoid Dye)
สีย้อมอินดิกอยด์ คือสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

2.4.3 สีย้อมเอโซ

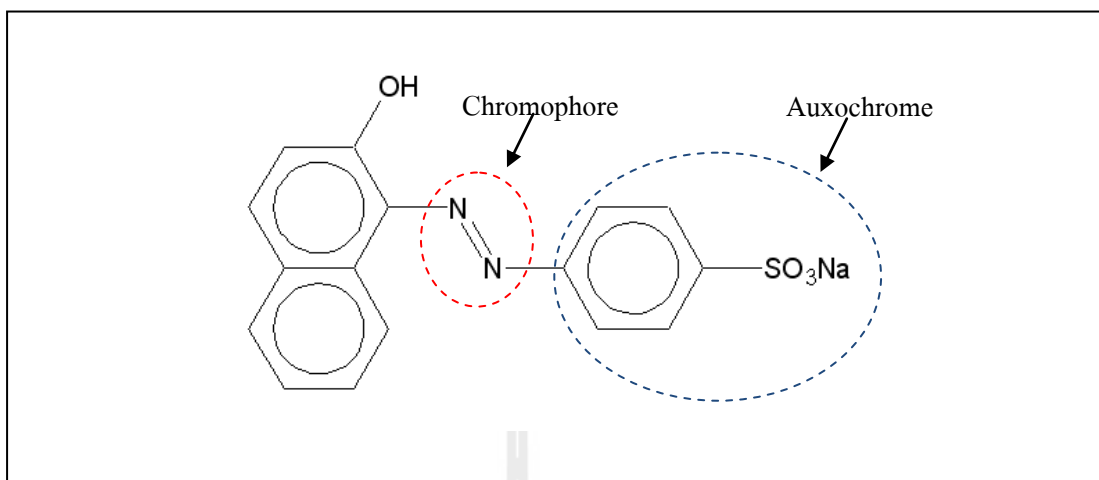
สีย้อมเอโซเป็นกลุ่มสีที่นิยมใช้มากถึงร้อยละ 60 – 70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Carliell et al., 1995; Ollgaard et al., 1999; Stolz, 2001; Zee et al., 2003; Dos Santos et al., 2003) สีย้อมเอโซมีหลายชนิด เช่น สีแอซิด (Acid Dye) สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) สีไดเรกต์ (Direct Dye) สีเบสิค (Basic Dye) ซึ่งสีย้อมเหล่านี้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี จึงกำจัดได้ยากโดยกระบวนการทางกายภาพและชีวภาพ

2.4.3.1 คุณสมบัติทางเคมี

สีเอโซอิก (Azoic Dye) สีดิสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ (อังคณา อมรศรี, 2544) สีเอโซมีสูตรโครงสร้างของโครโมฟอร์ ซึ่งมีพันธะ N=N เป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมดังแสดงในรูปที่ 2.3 และมีส่วนที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลสีกับเส้นใยทำให้เกิดการยึดติดกันขึ้น เรียกว่า ออกโซโครม (auxochrome) โครงสร้างส่วนนี้จะประกอบด้วยวงเบนซีน (Benzene Ring) ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive group) ติดอยู่



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมเอโซ (Buckly, 1992)

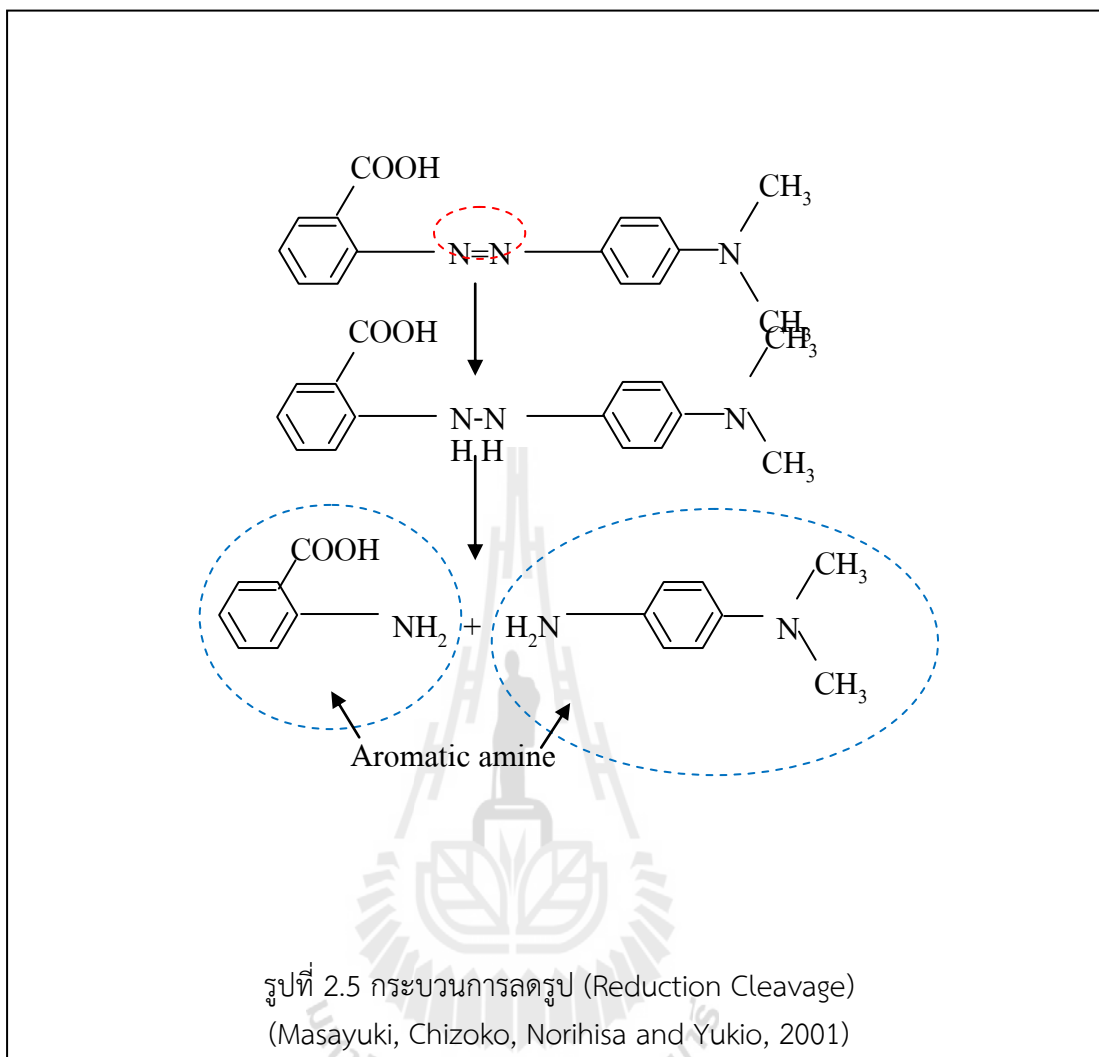


รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซ Acid Orange 7
(Dos Santos, Cervantes and Van Lier, 2004)

จากรูปที่ 2.4 เป็นโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเอโซแอซิด (Acid Orange 7) สามารถอธิบายได้ว่าสีย้อมชนิดนี้เป็นสีเอโซเนื่องจากมีโครงสร้างโครโมฟอร์แบบ N=N ประกอบด้วยไนโตรเจน 2 อะตอม ต่อเชื่อมกันด้วยพันธะคู่ ซึ่งเป็นลักษณะของสีกลุ่มเอโซโครโมฟอร์นี้เองที่เป็นส่วนทำให้เกิดสี นอกจากนี้ในโครงสร้างโมเลกุลยังประกอบด้วยออกโซโครม ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกับเส้นใยยึดติดกัน โครงสร้างส่วนนี้ประกอบไปด้วยวงเบนซีน ที่มีกลุ่มอะตอมที่ไวต่อปฏิกิริยาติดอยู่ คือ กลุ่มซัลโฟนิล

2.4.3.2 ปฏิกริยาในการลดรูป (Reduction Cleavage) ของสารประกอบเอโซ

ทำได้โดยการทำลายพันธะคู่โดยสารรีดิวซ์ (Reducing Agent) ทำให้ตัวสีย้อมถูกทำลายลง เมื่อพันธะของสารประกอบเอโซถูกทำลายลงจะเกิดเป็นกลุ่มเอมีน 1 กลุ่ม ประกอบด้วยไนโตรเจน 1 อะตอม และ ไฮโดรเจน 2 อะตอม กระบวนการในการลดรูป (Reduction Cleavage) ของสารประกอบเอโซ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าจากกระบวนการลดรูปของสารประกอบเอโซ จะได้สารผลิตภัณฑ์ คือ อะโรมาติกเอมีนเกิดขึ้น ซึ่งสารอะโรมาติกเอมีนมีอันตรายต่อสุขภาพในด้านการก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์



2.4.2.3 ผลกระทบต่อสุขภาพ

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

2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต แต่เนื่องจากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนน้ำทิ้งสีย้อมทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไปที่พบเห็น ตามความในประกาศกระทรวง

อุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงกำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีย้อมที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีย้อมมีหลายวิธีดังนี้

2.5.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ การตกตะกอนเป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง สามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดสีขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอสิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้น ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ได้แก่ ซึ่งเป็นสารโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค ให้มีขนาดใหญ่ และตกตะกอนได้ง่าย ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.5.2 การออกซิเดชัน (Oxidation Method)

วิธีการออกซิเดชันสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agents) ที่รุนแรง เช่น โอโซน (Ozone) เป็นต้น

- **การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)** โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้น การที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนเนชั่น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมี ของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์ทำให้เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

2.5.3 การดูดซับ (Adsorption)

ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม จากการศึกษาของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) ใช้หินดินดานขนาด 0.15 – 0.18 มิลลิเมตร เพื่อเป็นตัวดูดซับสีย้อมจากน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบทางชีวภาพของโรงงานฟอก

ย้อมแห่งหนึ่ง มีความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 420 ± 3.00 Pt-Co พบว่า หินดินดานมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม เท่ากับ 95.15

2.5.4 เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อกรอง (Membrane) จะอาศัยแรงดันในการผลักดันให้ซึมผ่านเยื่อกรองน้ำบาง ๆ ที่ประกอบไปด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งเทคโนโลยีเยื่อกรองนี้สามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมได้ และยังสามารถนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเทคโนโลยีเยื่อกรอง แบ่งได้ดังนี้

- **ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)** ใช้ในการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีดิสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีซัลเฟอร์ สีแวต และสีอะโซอิกที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สำหรับสีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

- **ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)** เหมาะสำหรับใช้กำจัดไอออนสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

- **ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane)** ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือ เซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคลีลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95

- **นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)** ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

2.5.5 ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดทางชีวภาพที่อาศัยกลไกการบำบัดตามธรรมชาติ โดยมีพืช จุลินทรีย์ และตัวกลางในระบบเพื่อบำบัดน้ำเสีย มีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาพบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมได้ เช่น จากศึกษาของ ธาริณี วัฒนเดชาชาญ (2545) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินแวนอน ปลุกต้นธูปฤาษี (*Typha angustifolia* Linn.) ตัวกลางทราย ในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีแดง (C.I. Reactive Red 180) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สภาวะที่

เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม คือ อัตราส่วนสีย้อมต่อน้ำตาล เท่ากับ 1:5 ที่เวลาเก็บกักน้ำ 5 วัน และพบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม และซีโอดี เท่ากับร้อยละ 82 และ 83 ตามลำดับ และพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารอาหารและเวลาเก็บกัก จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อนำมาทดสอบโดยใช้น้ำเสียจริง กำหนดให้มีระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม และซีโอดี เท่ากับร้อยละ 61 และ 65 ตามลำดับ และ จากการศึกษาของ ประนัดดา, กิตติ และสุธา (2549) ศึกษาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกธูปฤาษี และกกกลม (*Cyperus corymbosus* Rottb.) บำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมไหม พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีเท่ากับร้อยละ 95.30 และ 95.20 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 71.83 และ 74.18 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี และซีโอดีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบที่ปลูกพืชทั้ง 2 ชนิด และพบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกกกกลมมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของน้ำเสียสูงกว่าธูปฤาษีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ Bulc and Ojstrsek (2008) ศึกษาการบำบัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ Reactive Red 22, Vat Red 13 และ Reactive black 5 โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ตัวกลางที่ใช้ ได้แก่ Zeolitic Tuf (ขนาด 9-12 มิลลิเมตร), ททราย (ขนาด 0-4 มิลลิเมตร), กรวด (ขนาด 8-12 มิลลิเมตร) พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 70

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถกำจัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง ระยะเวลาในการบำบัด พืชที่ใช้ในระบบ และองค์ประกอบทางเคมีของสีย้อมด้วย การบำบัดสีย้อมด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ แต่มีปริมาณตะกอนเกิดขึ้น ทำให้ต้องการนำตะกอนไปบำบัดต่อไป อีกทั้งวิธีการนี้ยังมีการใช้พลังงานมากและสิ้นเปลืองสารเคมีอีกด้วย การดูดซับ วิธีการนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อม แต่มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูงในการบำบัดการแลกเปลี่ยนไอออน และการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง วิธีนี้สามารถบำบัดสีย้อมได้ดี แต่มีข้อเสีย คือ แผ่นเยื่อกรองมีศักยภาพในการใช้งานและรองรับน้ำเสียในปริมาณมากไม่ตี ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนและบำรุงรักษาสูง ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จึงนับเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ และสีย้อมได้ ใช้พลังงานต่ำ ง่ายต่อการใช้งานและบำรุงรักษา ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน และไม่มีตะกอนส่วนเกินที่ต้องนำไปกำจัดเพิ่ม

2.6 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetlands) หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดิน ในระยะเวลาานานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอิมตัวด้วยน้ำไว้ได้ (U.S. EPA, 2000)

2.6.1 องค์ประกอบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สร้างขึ้นเพื่อเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบกลไกการบำบัดของเสียตามธรรมชาติ โดยอาศัยพืช สัตว์ จุลินทรีย์ รวมทั้งดินในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีองค์ประกอบหลัก ๆ สามส่วน ได้แก่ ตัวกลาง จุลินทรีย์ และพืช ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

องค์ประกอบ	บทบาทในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
ตัวกลาง	<ul style="list-style-type: none"> • ได้แก่ ดิน หิน กรวด ทราย • เป็นที่ยึดเกาะของพืชและจุลินทรีย์ • เป็นช่องทางการไหลของน้ำ • เป็นพื้นที่สำหรับการทำปฏิกิริยาและเก็บสารต่าง ๆ • ช่วยในการกระจายน้ำเสีย
จุลินทรีย์	<ul style="list-style-type: none"> • ได้แก่ แบคทีเรีย รา สาหร่าย โปรโตซัว ทั้งชนิดแขวนลอยและชนิดยึดติด • ส่งเสริมปฏิกิริยาของสารต่าง ๆ ภายในระบบ • ย่อยสลายสารอินทรีย์
พืช	<ul style="list-style-type: none"> • เป็นพื้นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ • ส่งเสริมปฏิกิริยาของสารต่าง ๆ ภายในระบบ • ดูดซึมธาตุอาหาร • ช่วยในการตกตะกอนของสารโมเลกุลใหญ่

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2555)

2.6.1.1 ตัวกลาง

ตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติที่หาได้โดยทั่วไป เช่น กรวด หิน และทราย โดยจะใช้เพียงชนิดหนึ่งชนิดใด หรือใช้รวมกันก็ได้ ลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะของพืชและจุลินทรีย์ นอกจากนี้ ช่องว่างในตัวกลางยังเป็นช่องทางการไหลของน้ำใน

ระบบ และทำหน้าที่ในการเก็บสะสมสารต่าง ๆ ด้วย ซึ่งตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ แยกตามปริมาณ ของออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ได้แก่

- บริเวณที่มีออกซิเจน (Aerobic zone) เป็นบริเวณผิวน้ำของระบบบึงประดิษฐ์ บริเวณนี้ น้ำเสียสามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศได้

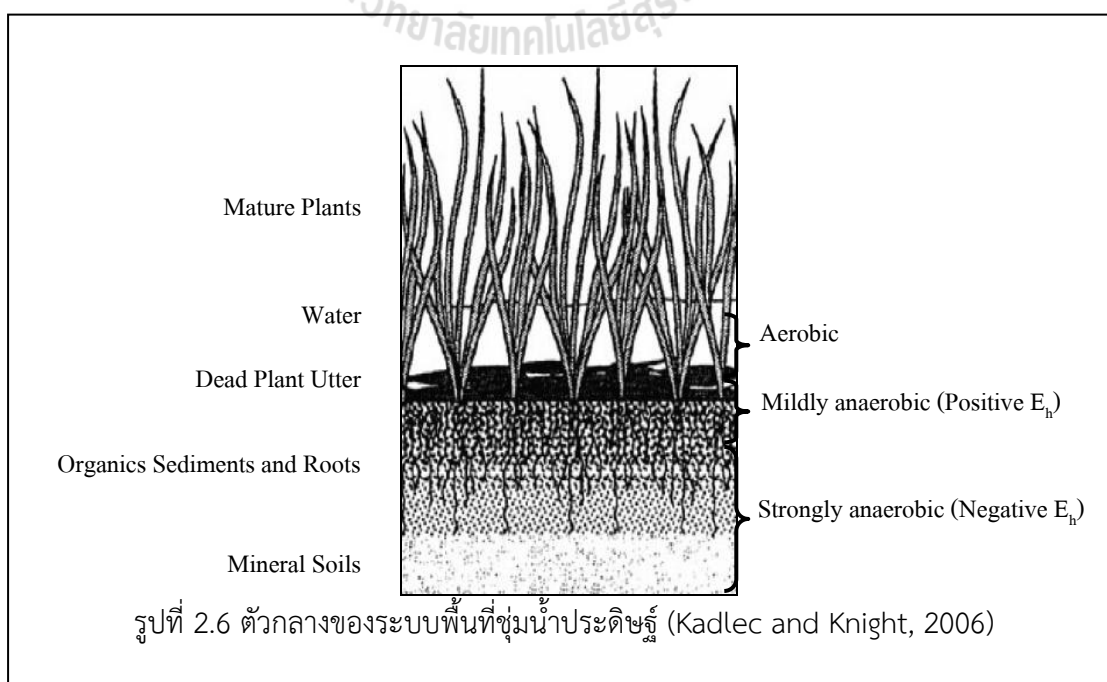
- บริเวณที่มีออกซิเจนน้อย (Mildly anaerobic zone) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้นที่มีออกซิเจน ชั้นนี้เป็นชั้นที่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีซากพืชสะสมอยู่ อย่างไรก็ตาม ระบบรากของพืชที่ยึดเกาะอยู่ในชั้นนี้สามารถปล่อยออกซิเจนออกมาสู่ชั้นกรองได้บางส่วน

- บริเวณที่ไร้ออกซิเจน (Strongly anaerobic zone) เป็นบริเวณที่อยู่ชั้นสุดท้ายหรือล่างสุดของชั้นกรอง และในบริเวณนี้จะอยู่ในสภาพไร้อากาศ

ตารางที่ 2.5 ลักษณะตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ชนิดตัวกลาง	ขนาดตัวกลาง (มิลลิเมตร)	ค่าความพรุน (n)	ค่าสภาพการนำเชิงกลศาสตร์ (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

ที่มา : U.S. EPA, 2000



2.6.1.2 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์มีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ที่เกาะติดอยู่กับพืชและที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลน หรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป (สุชาติดา ปุณณสัมฤทธิ์, 2548) จุลินทรีย์ที่พบในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีมากมายหลายชนิด เช่น รา สาหร่าย และโปรโตซัว ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถเป็นได้ 2 ชนิด ดังนี้

- แบคทีเรียชนิดแขวนลอย คือ แบคทีเรียที่เจริญเติบโตและอาศัยอยู่บริเวณผิวน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เป็นแบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีพ

- แบคทีเรียชนิดเกาะติด คือ แบคทีเรียที่เจริญเติบโตและอาศัยอยู่ในส่วนที่จมอยู่ในน้ำของพืช (ราก, ลำต้น) ในดิน ทราาย หรือเกาะบนตัวกลางโดยตรงสำหรับบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ ผิวดิน นอกจากนี้จุลินทรีย์ต่าง ๆ ยังสะสมอยู่ในชั้นตะกอนบริเวณด้านล่างของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ด้วย

โดยทั่วไปจุลินทรีย์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหาร และพลังงานสำหรับการดำรงชีพ ซึ่งแหล่งพลังงานหลักของจุลินทรีย์คือ สารอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะใช้สารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์ ในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีการจัดสภาวะแวดล้อมให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้ ทั้งนี้ เพื่อช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ดี

2.6.1.3 พืช

หน้าที่หลักของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์คือ การลำเลียงออกซิเจน โดยออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่ทางใบของพืช และลำเลียงออกซิเจนซึ่งใช้หลักการแพร่ (Diffusion) และการไหลพาของอากาศ (Convective) ลงไปยังระบบราก ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ดีกว่าการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียว สำหรับชนิดของพืชที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบ่งเป็น พืชใต้น้ำ (Submerged plant) พืชโผล่พ้นน้ำ (Emerged plant) และพืชลอยน้ำ (Floating plant) คุณสมบัติของพืชที่จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำ คือ พืชที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น เพราะพืชจะคุ้นเคยกับสภาพภูมิอากาศ และดิน จึงสามารถเจริญเติบโตได้ดีตลอดปี

(U.S. EPA, 2000) ทนต่อสารมลพิษในน้ำเสียได้ดี มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสารต่าง ๆ ได้ พืชในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่สามารถพบได้ในท้องถิ่น เช่น ฐปถาษี กก และ อ้อ (พัฒน์ จันทร์โรทัย, 2536) ซึ่งบทบาทของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 บทบาทส่วนต่าง ๆ ของพืชโผล่พื้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

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

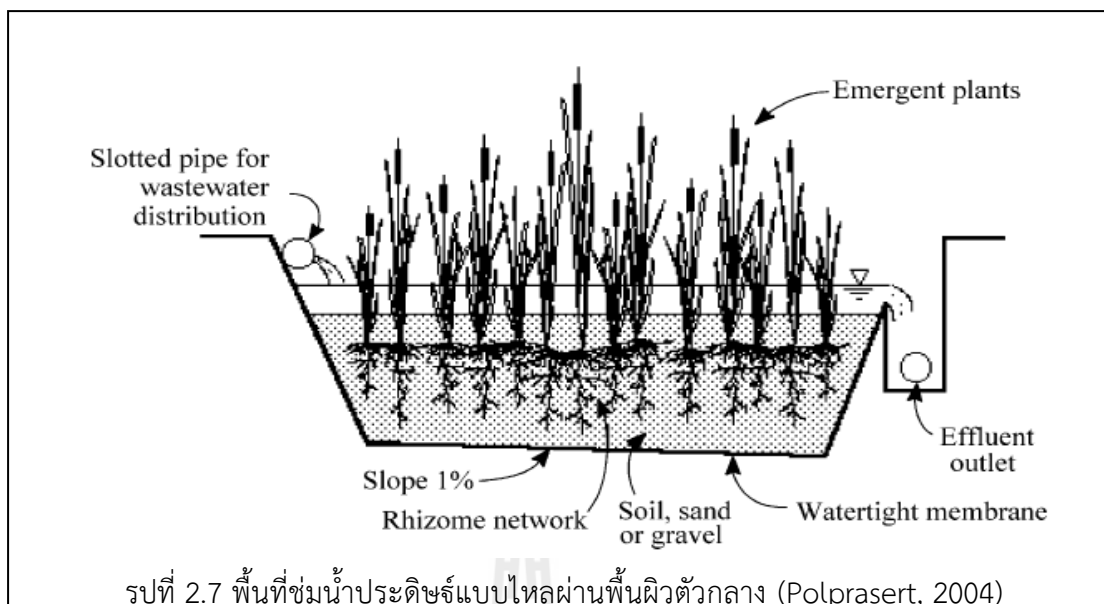
ที่มา : Brix (1997)

2.6.2 ชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

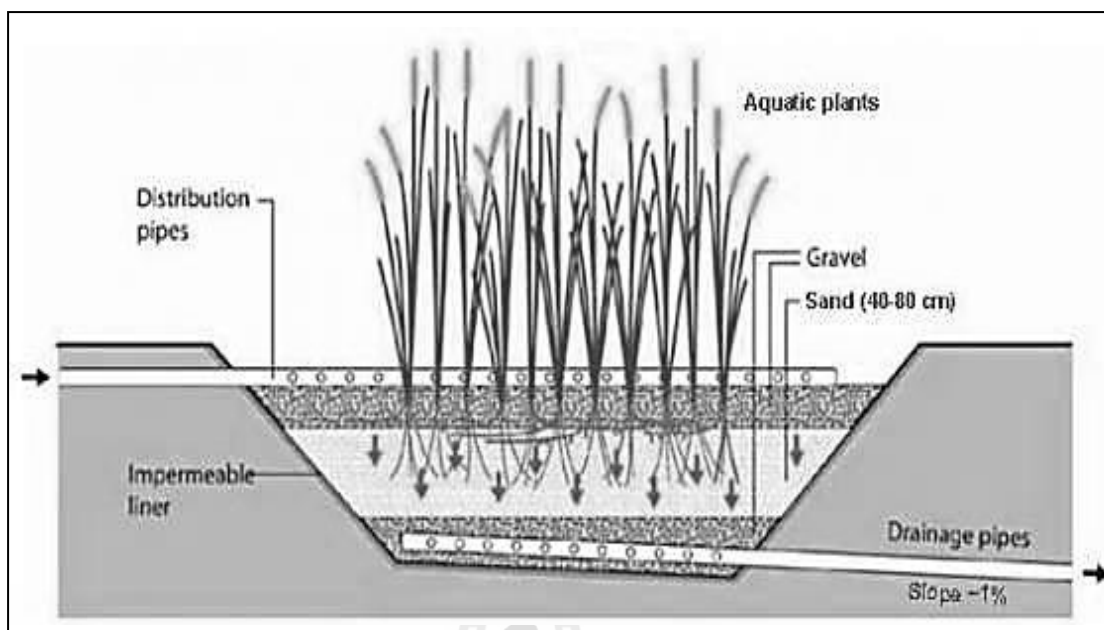
2.6.2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง (Free Water Surface Constructed Wetland : FWS)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง ประกอบด้วย พืช ดิน หรือตัวกลางชนิดต่าง ๆ เพื่อช่วยในการยึดเกาะของรากพืชให้พืชสามารถทรงตัวอยู่ได้ โดยบริเวณพื้นผิวน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง สามารถรับออกซิเจนจากบรรยากาศได้โดยตรง และปริมาณออกซิเจนส่วนเกินจะถูกลำเลียงไปยังส่วนรากของพืช โดยที่รากจะขนส่งออกซิเจนสู่ส่วนลึกของตัวกลางทำให้เกิดกระบวนการบำบัดมลสารด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจน (กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546) ในส่วนของตัวกลางซึ่งสัมผัสกับรากและไรโซมสามารถเกิดสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจนได้ (Reed, Middlebrooks and Crites, 1988) ซึ่งระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง อาศัยการทำงานของพืชในการบำบัดน้ำเสียเป็นหลัก น้ำเสียจะไหลตามนอนขนานกับพื้นดิน ซึ่งมีการบดอัดดินให้แน่นหรือปูด้วยวัสดุกันซึม โดยบ่อจะมีความลึกแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดกระบวนการบำบัดตามธรรมชาติอย่างสมบูรณ์ มักใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบปรับเสถียร ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีหลากหลายงานวิจัยที่ได้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางมาใช้กำจัดมลสารต่าง ๆ เช่น การศึกษาของ Cameron, Madramootoo, Crolla and Kinsley (2003) นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง บำบัดน้ำทิ้งจากชุมชนที่มีปริมาณสารอินทรีย์ และธาตุอาหารมาก พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และออร์โทฟอสเฟต เท่ากับร้อยละ 34, 37, 93, 90 และ 82 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal coliform) และอีโคไล (E. coli) เท่ากับร้อยละ 52 และ 58 นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Pimpan and Jindal (2009) นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์บำบัดแคดเมียม พบว่า แคดเมียมถูกกำจัดโดยการดูดซับของดินและการนำไปใช้โดยพืช ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมอยู่ในช่วงร้อยละ 61.7 – 99.6 จะเห็นได้ว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางสามารถใช้ประโยชน์กำจัดมลสารได้ แต่ปัญหาที่อาจเกิดขึ้น คือ ยูรบบกวน และใช้พื้นที่มาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)



2.6.2.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland : SF)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยมีตัวกลางที่ใช้ คือ หินบด กรวด หรือดินชนิดต่าง ๆ ซึ่งตัวกลางอาจมีชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้รวมกันได้ (ลักษณะ คณานิรันดร์, 2539) ตัวกลางหนาประมาณ 0.6 – 0.7 เมตร (ศุภา กาจนวนิชกูร, 2544) การไหลของน้ำเสียในชั้นตัวกลางจะขึ้นกับขนาดของรูพรุนตัวกลางที่ใช้ หากมีช่องว่างรูพรุนมากน้ำเสียจะไหลได้ดี (Morel and Diener, 2006) บริเวณใต้ชั้นตัวกลางจะอึดตัวด้วยน้ำตลอดเวลา ทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนขึ้น นอกจากนี้พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยังส่วนราก ทำให้จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนสามารถเจริญเติบโตได้บริเวณราก (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) ดังนั้น จึงสามารถเกิดกระบวนการบำบัดแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจนในระบบเดียวกันได้ (Brix, 1987; Cooper, Job, Green and Shutes, 1996) ซึ่งระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง เป็นระบบที่แยกน้ำเสียไม่ให้ถูกรบกวนจากแมลงหรือสัตว์ และป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคมานับเป็นอันกับคนได้ มักใช้บำบัดน้ำเสียจากบ่อเกรอะ และปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งขั้นสุดท้าย พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 มีหลายงานวิจัยนาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง กำจัดมลสารต่าง ๆ การศึกษาของ Poggi-Varaldo et al. (2002) นาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลางแนวราบ บำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี บีโอดี และของแข็งแขวนลอย เท่ากับร้อยละ 90, 91 และ 85 ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Mantovi et al. (2003) นาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์บำบัดน้ำเสียจากฟาร์มนม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เท่ากับร้อยละ 90.8, 91.9, 79.1 และ 60.6 ตามลำดับ แต่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวตัวกลาง มักพบปัญหาการอุดตันเกิดขึ้น



รูปที่ 2.8 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง (Morel and Diener, 2006)

2.6.3 กลไกการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน เพราะมีการปรับระดับดินที่พื้นบ่อและมีการควบคุมระบบการไหลของน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนหรือตัดแปลงกระบวนการทำงานต่าง ๆ ภายในบ่อได้ตามความต้องการ โดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ (Reed et al., 1988) พร้อมทั้งอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย การตกตะกอน การดูดซับโดยอนุภาคของตัวกลาง การสะสมในพืช การเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ และพืชในระบบสามารถกำจัดมลสารต่าง ๆ ได้ด้วยการออกซิไดซ์ ซึ่งกลไกการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยสรุป ดังแสดงในตารางที่ 2.7

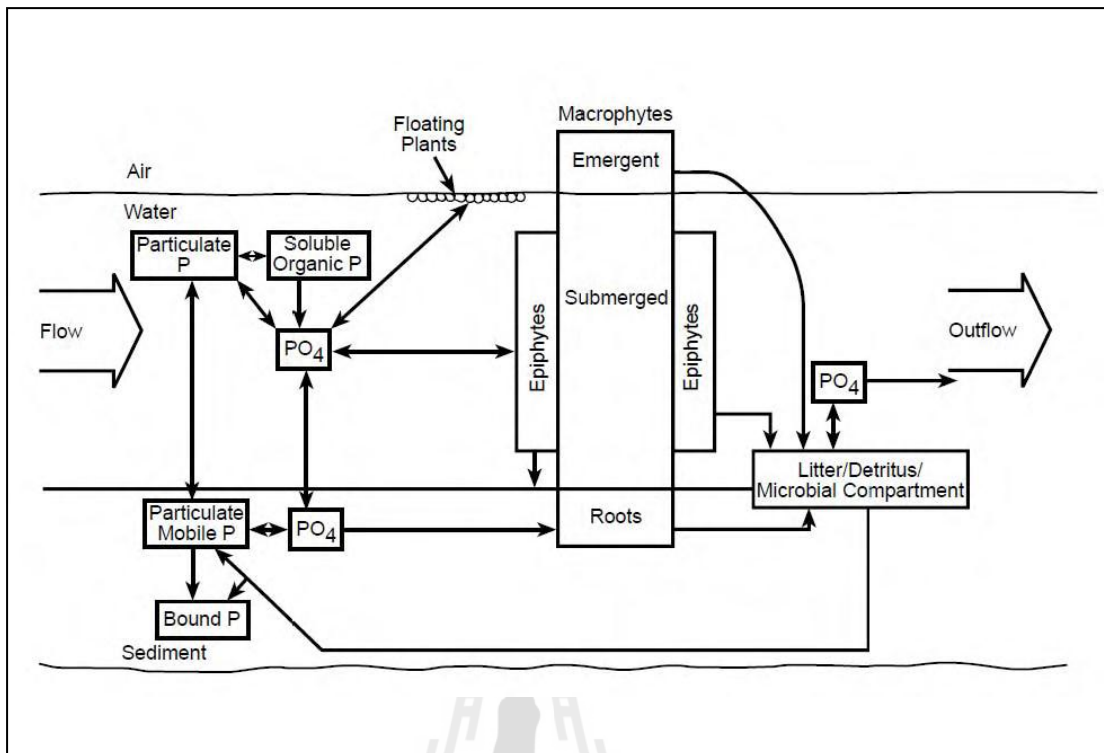
ตารางที่ 2.7 กลไกการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ของแข็งแขวนลอย	<ul style="list-style-type: none"> ● การตกตะกอน/การกรอง
บีโอดี	<ul style="list-style-type: none"> ● การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (ที่ใช้และไม่ใช้อากาศ) ● การตกตะกอน (การสะสมของสารอินทรีย์บนผิวหน้าของตะกอน)
ไนโตรเจน	<ul style="list-style-type: none"> ● ปฏิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันโดยจุลินทรีย์ ● การดูดซึมโดยพืช ● การระเหยของแอมโมเนีย
ฟอสฟอรัส	<ul style="list-style-type: none"> ● การดูดซับโดยดิน (ปฏิริยาการดูดซับ-ตกตะกอนโดยอลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และแร่ธาตุในดิน) ● การดูดซึมโดยพืช
เชื้อโรค	<ul style="list-style-type: none"> ● การตกตะกอน/การกรอง ● การตายตามธรรมชาติ ● การตายโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ● การปลดปล่อยสารปฏิชีวนะจากรากพืช

ที่มา : Brix (1993)

2.6.3.1 กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

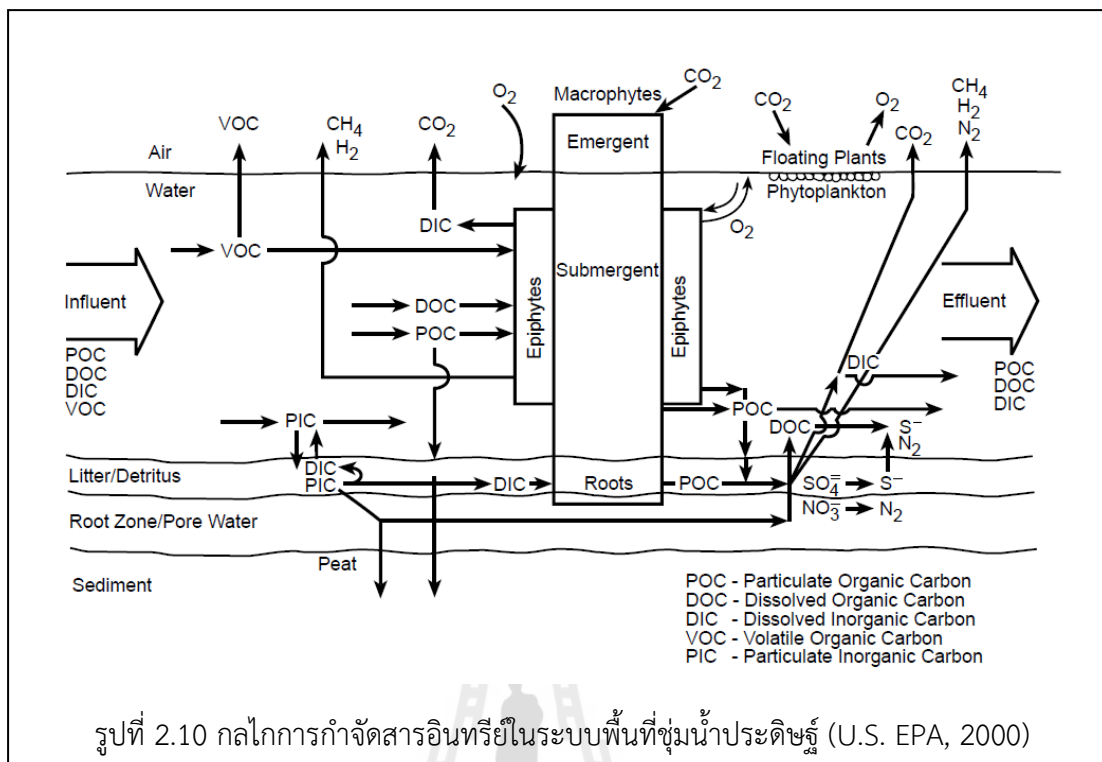
กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยทั่วไปพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีระยะเวลาเก็บกักน้ำหลายวัน โดยเฉพาะเมื่อน้ำเสียที่ผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีความเร็วของน้ำต่ำ มีพืชปกคลุม มีดินที่เหมาะสมจะช่วยในการกรองและการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและคุณภาพน้ำที่ออกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ดีขึ้น กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น ระยะเวลาเก็บกักเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย หากมีระยะเวลาเก็บกักนาน การไหลของน้ำค่อนข้างช้า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนทางกายภาพของของแข็งแขวนลอย นอกจากนี้ความหนาแน่นของพืชจะเพิ่มการจมตัวของของแข็งแขวนลอยโดยการตกตะกอน เนื่องจากพืชจะจับของแข็งแขวนลอยไว้ในชั้นตัวกลางที่มีการสะสมของซากพืชและซากสัตว์ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวได้ ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน สามารถกรองของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กผ่านชั้นของตัวกลาง ซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้ของแข็งแขวนลอยออกมานอกระบบ (Kadlec and Knight, 2006)



รูปที่ 2.9 กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์ (U.S. EPA, 2000)

2.6.3.2 กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์

กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า จุลินทรีย์มีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งในรูปสารอินทรีย์ละลายน้ำ และสารอินทรีย์ที่เกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมลงสู่ก้นบ่อแล้วเกิดการย่อยสลายซึ่มลงดิน การกำจัดสารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายนั้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์ โดยขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำ อัตราการเจริญของจุลินทรีย์ และแหล่งออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาการบำบัดสำหรับกรณีพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่สะสมอยู่ในชั้นกรอง และอัตราการซึ่มของน้ำผ่านชั้นกรอง โดยออกซิเจนต้องถ่ายเทได้ง่าย ส่วนสารอินทรีย์ละลายน้ำจะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะเกาะติดอยู่กับพืช และแขวนลอยอยู่ในน้ำ การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับให้พืชดูดซึ่มนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

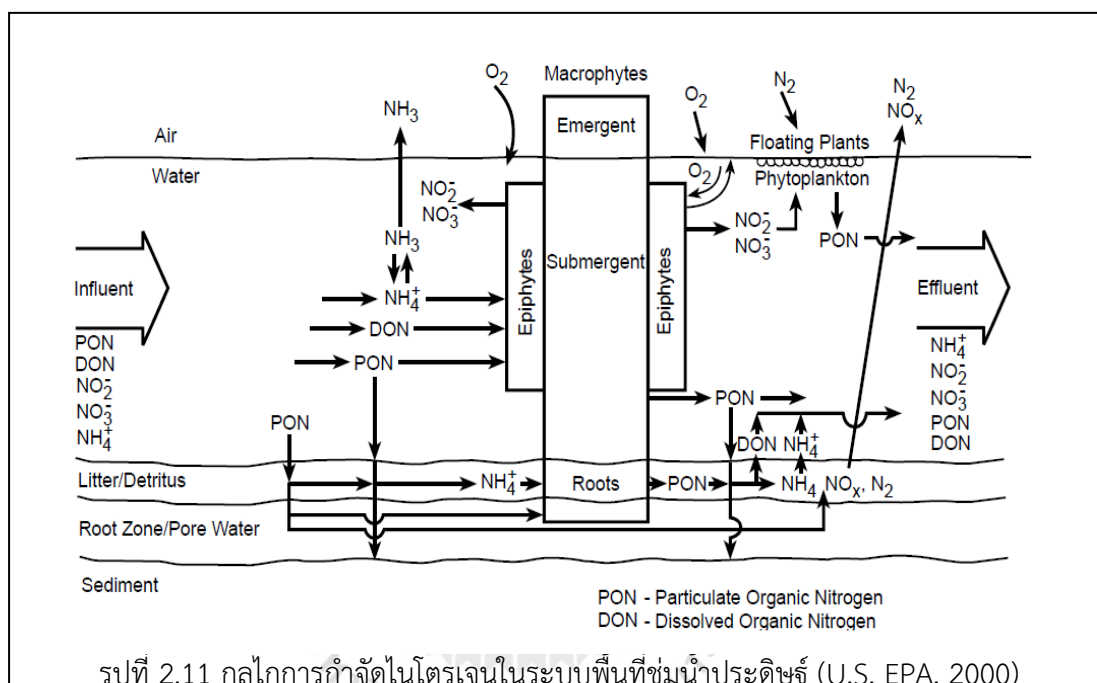


2.6.3.3 กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลไกการกำจัดไนโตรเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าในการกำจัดไนโตรเจนที่เกิดขึ้น มีทั้งการกำจัดด้วยกระบวนการทางกายภาพเคมี และชีวภาพ โดยส่วนใหญ่แล้วไนโตรเจนจะถูกกำจัดด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การดูดซึมไนโตรเจนเข้าไปในพืช และการระเหยของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ส่วนมากจะพบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนโตรเจน กระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนีย เป็นขั้นตอนแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน จากนั้นจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนไปเป็นไนเตรท โดยมีไนโตรที่เป็นการอยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดในน้ำหรือดินที่มีออกซิเจนเพียงพอ ซึ่งรวมถึงบริเวณรอบ ๆ รากพืชด้วย แต่ถ้าระบบอยู่ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนหรือออกซิเจน (Anoxic) กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้น และไนเตรท จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนโตรท และก๊าซไนโตรเจนในที่สุด

นอกจากการกำจัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่เกิดจากจุลินทรีย์แล้ว ยังเกิดการดูดซับไนเตรทและแอมโมเนียมด้วยตัวกลาง โดยประจุลบของไนเตรทจะถูกยึดติดกับไอออนบวกบริเวณพื้นผิวของตัวกลาง เช่น แร่ดินเหนียว ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางด้านไฟฟ้าคือ ประจุลบของไนเตรทจะถูกยึดอยู่กับประจุบวกของตัวกลาง และยังเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายเมื่อไนเตรทเข้าไปแทนที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับโครงสร้างของแร่ที่เป็นองค์ประกอบของตัวกลางได้

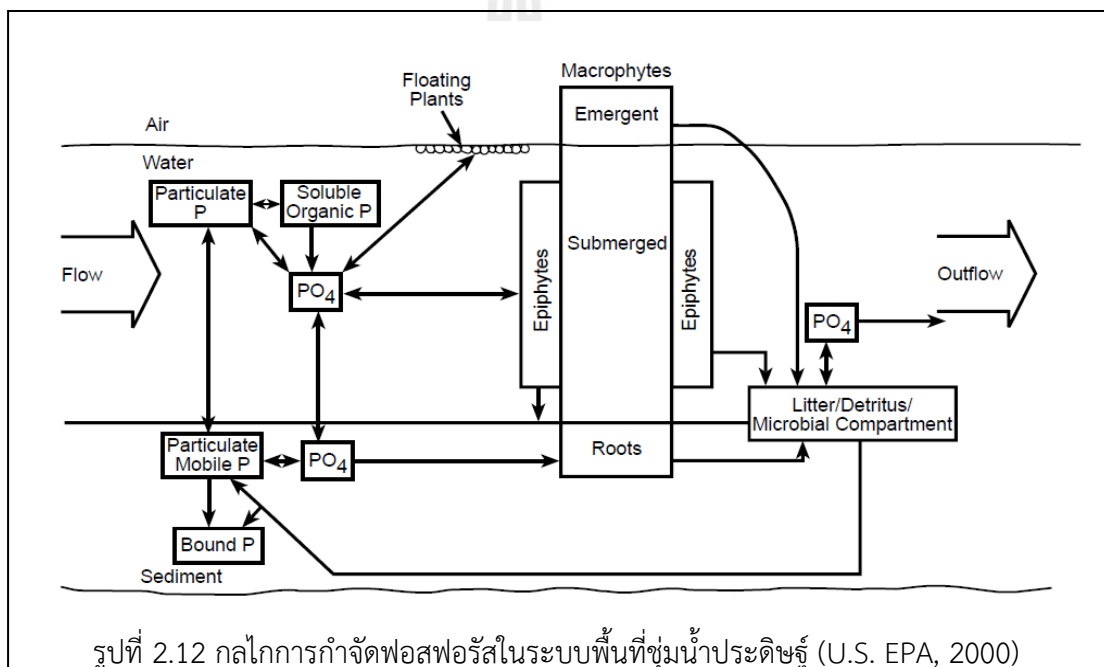
เช่น โลหะหนักพวกอะลูมิเนียม เหล็ก เป็นต้น การดูดซับแอมโมเนียมด้วยตัวกลางจะเป็นการดูดซับไอออนบวกของอนุภาคตัวกลางที่มีประจุบริเวณผิวเป็นลบ โดยแอมโมเนียมไนที่ถูกยึดติดอยู่ที่ผิวของตัวกลางจะเกิดการยึดแบบหลวม ๆ สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกชนิดอื่นได้ (ปัทมา วิทยากร, 2533) นอกจากนี้ แอมโมเนียมยังสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่เกาะอยู่บริเวณผิวของตัวกลางได้ เช่น โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน เป็นต้น (Demir, Gunay and Debik, 2002)



2.6.3.4 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า สารประกอบฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาจากน้ำที่ไหลเข้าและการพัดพาของบรรยากาศ ส่วนใหญ่จะพบฟอสฟอรัสในรูปละลายน้ำได้ และฟอสฟอรัสอินทรีย์ในรูปของแข็ง การกำจัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ การตกตะกอนผลึก การดูดซับโดยตัวกลาง การย่อยสลายของจุลินทรีย์ และการดูดซับโดยพืช ซึ่งส่วนใหญ่การกำจัดฟอสฟอรัสเกิดขึ้นที่ชั้นของตัวกลาง โดยการทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียมที่ประกอบอยู่ในตัวกลาง (Zhu, Jenssen, Maehlum and Krogstad, 1997; Bubba, Arias and Brix, 2003) จากนั้นพืชจะดูดซับผ่านทางราก และนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่อไป โดยเมื่อฟอสฟอรัสยึดติดกับตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แล้ว จะเกิดการดูดซับและตกตะกอนผลึก โดยความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกลางแต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของตัวกลางชนิดนั้น ๆ

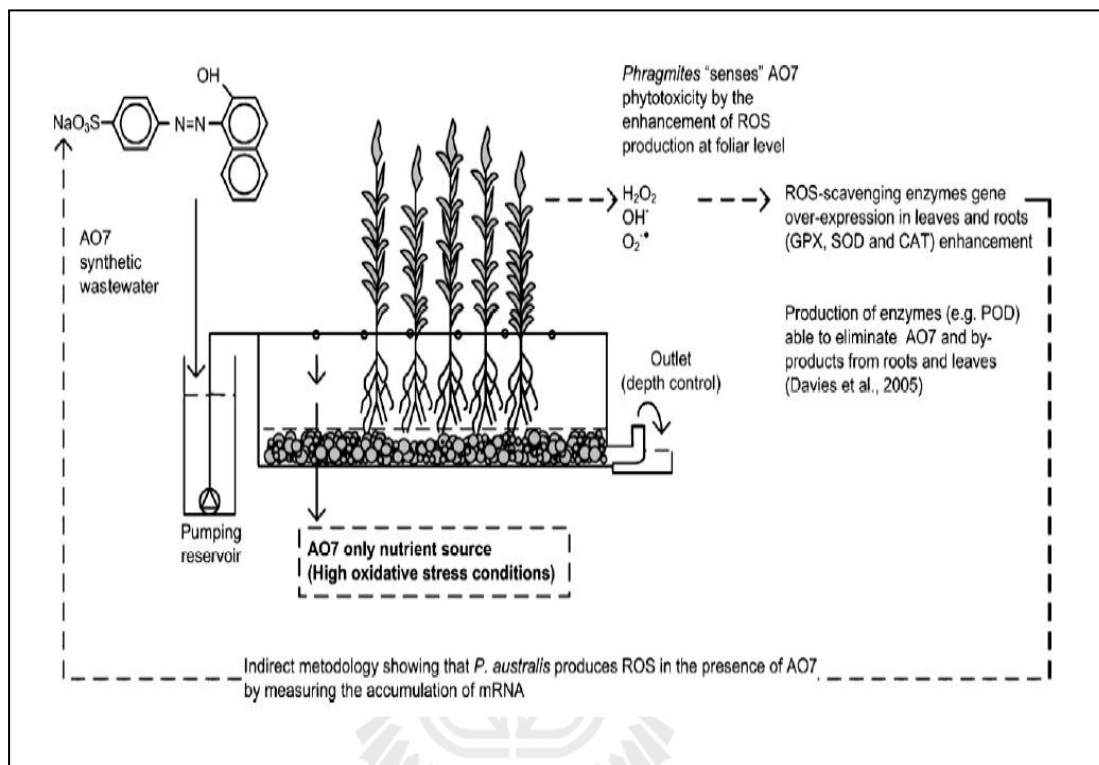
กระบวนการกักเก็บและแลกเปลี่ยนฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำทั่วไป จะเห็นได้ว่าวงจรของฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีส่วนประกอบสำคัญหลายอย่าง ได้แก่ น้ำ พืช สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก อนุภาคต่าง ๆ ในระบบ และตัวกลาง กลไกของการกำจัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สำคัญที่สุดคือการซึมลงไปในชั้นตัวกลางและเกิดการสะสมที่ตัวกลางชั้น ส่วนในแง่ของการดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ของพืชและกิจกรรมการนำไปใช้ประโยชน์ของสิ่งมีชีวิต เช่น ปลา หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำถือเป็นส่วนน้อย ในกรณีที่ต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงขึ้น การใช้ส่วนผสมระหว่างชั้นตัวกลางที่มีเหล็ก และอะลูมิเนียมได้รับความนิยมมาก โดยอาจจะมีการเติมทรายเข้าไปเพื่อช่วยปรับค่าการนำการไหล ช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบดีขึ้น (Steiner and Freeman, 1989)



2.6.3.5 กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประกอบด้วย จุลินทรีย์ ตัวกลาง และพืช โดยจุลินทรีย์จะมีหน้าที่ในการย่อยสลายสีย้อมในน้ำเสียฟอกย้อม โดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะใช้เอนไซม์ azo reductases ทำลายพันธะเอโซ ทำให้ความเข้มของสีย้อมลดลง และได้สารที่มีโมเลกุลเล็กกลอง คือ สารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Gingell and Walker, 1971) ส่วนจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนมีเอนไซม์ mono และ di-oxygenase catalyse ซึ่งสามารถรวมกับออกซิเจน และทำให้เกิดการแตกพันธะอะโรมาติก (Madigan, Martinko and Parker, 2003) ทำให้สามารถย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง สำหรับตัวกลางที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะทำหน้าที่ช่วยดูดซับสีย้อม และยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ได้อีกด้วย นอกจากนี้พืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ

ประติษฐ์จะทำหน้าที่ช่วยในการบำบัดสารมลพิษ โดยอาศัยกระบวนการทำงานของพืช เช่น การดูดซึมโดยตรง การดูดซึมสารมลพิษแล้วย่อยสลายด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืชเพื่อเคลื่อนย้ายเก็บ หรือทำให้สารมลพิษอยู่ในรูปที่เป็นอันตรายน้อยลง



รูปที่ 2.13 กลไกการกำจัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์ (Davies et al., 2009)

2.6.4 เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์

เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้พื้นผิวดังแสดงในตารางที่ 2.8 ประกอบไปด้วย

2.6.4.1 ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT)

มีหน่วยเป็นวัน กำหนดโดยตั้งสมมติฐานว่ามีการกวนผสมและมีการไหลแบบตามกัน ซึ่งในสภาพจริงจะไม่พบทั้ง 2 กรณี การหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงทำได้ยาก เพราะการไหลในระบบจะซับซ้อน เนื่องจากมีพืชเจริญเติบโตอยู่ และพืชจะไปแทนที่ปริมาตรน้ำจำนวนหนึ่งด้วย (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544)

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 ความลึกของตัวกลาง

มีหน่วยเป็นเมตร มีความสัมพันธ์กับความยาวของรากพืช หากความความลึกของชั้นตัวกลางมีความเหมาะสมกับความยาวของรากพืช จะส่งผลให้พืชสามารถพัฒนาระบบรากได้ดี

2.6.4.5 อัตราส่วนขนาดของระบบ

อัตราส่วนขนาดของระบบจะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของน้ำเสีย และมีศักยภาพลดการไหลลัดวงจรของระบบ โดย U.S. EPA (2000) แนะนำให้มีอัตราส่วนของความยาว : ความกว้าง ต่างกัน เช่น 3:1, 5:1 หรือ 10:1 เป็นต้น

ตารางที่ 2.8 เกณฑ์การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

รายละเอียด	หน่วย	ค่าที่แนะนำ U.S.EPA (2000)		ค่าที่แนะนำ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม แห่งประเทศไทย (2540)	
		FWS	SF	FWS	SF
ระยะเวลาที่เก็บน้ำ	วัน	< 10	< 10	4 – 15	5 – 10
อัตราการระบรทุกปีโอดี	กก./เฮกแตร์.วัน	10 – 100	70 – 160	< 110	80 – 120
ความลึกของน้ำ	เมตร	0.6 – 0.9	0.3 – 0.8	0.5	-
ความลึกตัวกลาง	เมตร	0.2 – 0.3	0.5 – 0.6	-	0.3 – 0.9
อัตราส่วนขนาดของระบบ	ยาว : กว้าง	3:1หรือ5:1	3:1หรือ5:1	2:1	-

2.7 หินดินดาน

หินดินดาน (Shale) หมายถึง หินชั้นหรือหินตะกอนที่เกิดจากการเรียงตัวหรือสะสมของ ดินตะกอน (Silt) และแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) เป็นส่วนใหญ่ ถูกอัดด้วยแรงดันผนวกกับเวลาที่ยาวนานจึงกลายเป็นหิน สภาพธรณีวิทยาของแหล่งหินดินดาน ปกติเกิดเป็นชั้น ๆ มักจะมีชั้นหินประเภทอื่นแทรกสลับอยู่ด้วย เช่น หินทราย (Sandstone) หินทรายแป้ง (Siltstone) หรือหินปูน (Limestone) หินดินดานที่มีทรายปะปนอยู่มากเรียกว่า Arenaceous หากมีดินเหนียวปะปนอยู่มากเรียกว่า Calcareous หินดินดานมักเป็นแหล่งสะสมของปิโตรเลียม หรือถ่านหิน (Coal) เมื่ออย่างไฟแล้วให้น้ำมัน และเมื่อนำไปกลั่นจะได้น้ำมันคุณภาพต่าง ๆ กัน จึงเรียกหินดินดานนั้นว่าหินน้ำมัน (Oil shale) (กรมทรัพยากรธรณี, 2548) ลักษณะของหินดินดานนั้นเป็นชั้นหินบาง ๆ เนื้อหินละเอียดมาก กะเทาะหรือหลุดเป็นแผ่นได้ง่าย มีสีต่างกัน เช่น แดง น้ำตาล เหลือง เทา เขียว และดำ มีค่า

ความพรุนสูง แต่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ต่ำ มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 แหล่งของ หินดินดานในประเทศไทยพบได้ในเกือบทุกจังหวัดในภาคกลางของประเทศไทย แต่ที่เป็นแหล่งใหญ่ คือ บริเวณ จังหวัดสระบุรี อัญญา ลพบุรี สมุทรปราการ นนทบุรี นอกจากนี้ยังพบที่ จังหวัดเลย สงขลา ยะลา และนครศรีธรรมราช หินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54 – 60 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11 – 16 และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 4 – 5 (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; อมรา ดาวไธสง, 2550; Martin Marietta Material, 2004) ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	Martin Marietta Material (2004)	เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา (2538)	อมรา ดาวไธสง (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 การใช้ประโยชน์หินดินดาน ด้านสิ่งแวดล้อม

หินดินดานสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ผสมทำ ปูนซีเมนต์โดยหินดินดานเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์โดยมีส่วนการใช้ ปริมาณร้อยละ 15.18 ของวัตถุดิบทั้งหมด (มยุรี ปาลวงค์, 2547) อุตสาหกรรมปิโตรเลียมได้มีการ ใช้หินน้ำมัน (Oil Shale) ซึ่งเป็นหินดินดานชนิดหนึ่งเกิดจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์จำพวกพืช และสัตว์ ในบริเวณที่เหมาะสมด้วยระยะเวลานับล้านปีโดยสารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกเปลี่ยนสภาพเป็น สารเคโรเจน ซึ่งผสมคลุกเคล้ากับตะกอนกลายเป็นหินน้ำมัน โดยหินน้ำมันมีคุณสมบัติสามารถถลุง ปิโตรเลียมเหลวและแก๊สได้ (วิวัฒน์ โติธิกุล, 2548) นอกจากนี้ ยังมีการใช้หินดินดานในอุตสาหกรรม ดินเผาและเซรามิกอีกด้วย

สำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อม ได้มีการนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์ จากการศึกษา พบว่า หิน น้ำมันและถ่านหินน้ำมันมีความสามารถในการดูดซับสีย้อม เช่น สีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอคทีฟได้ (Abu-El-Sha'r, Gharaibeh and Mahmoud, 1999; Al-Qodah, 2000) และหินดินดานสามารถใช้ เป็นตัวดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ และมีการนำหินดินดานมาใช้เป็นตัวกลาง

ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่า พืชสามารถเจริญเติบโตบนดินดินดานได้ และมีพัฒนาการของลำต้นใต้ดินและรากได้ดี (Drizo et al., 1997; 2000)

2.7.1.1 การใช้ดินดินดานในการบำบัดสีย้อม

ดินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54-60 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11-16 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 4-5 (เสวีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538) จากการศึกษาของอมรา ดาวโรสง (2550) ในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยจำแนกดินดินดานเป็น 5 ขนาด โดยดินดินดาน A มีขนาด 4.00 – 8.00 มิลลิเมตร ดินดินดาน B มีขนาด 2.00 – 4.00 มิลลิเมตร ดินดินดาน C มีขนาด 1.00 – 2.00 มิลลิเมตร ดินดินดาน D มีขนาด 0.50 – 1.00 มิลลิเมตร และดินดินดาน E มีขนาด 0.25 – 0.50 มิลลิเมตร ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่า ดินดินดานเหมาะแก่การนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งดินดินดานขนาด E พบว่ามีความสามารถในการดูดซับ ไนเตรท แอมโมเนียม และฟอสเฟตสูงสุดเท่ากับ 0.182, 0.182 และ 0.585 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับที่ระยะเวลา 13.00, 1.50 และ 22.50 วัน ตามลำดับ และพบว่าดินดินดาน C-E มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี แอมโมเนียม และฟอสเฟตอยู่ในช่วงร้อยละ 59.77 – 72.96, 57.04 – 72.04 และ 64.74 – 93.50 ตามลำดับ และจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรท แอมโมเนีย และฟอสเฟตของดินดินดานเปรียบเทียบกับตัวกลางกรวดและทราย พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรทของตัวกลางแต่ละชนิดเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังต่อไปนี้ ดินดินดาน E, D, C, B, A, กรวด และทราย เท่ากับร้อยละ 72.04, 68.56, 63.06, 57.60, 57.04, 46.73 และ 39.24 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตัวกลางแต่ละชนิดเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังต่อไปนี้ ดินดินดาน E, D, C, B, A, กรวด และทราย เท่ากับร้อยละ 69.06, 64.12, 60.55, 55.53, 55.22, 52.95 และ 52.90 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดเกิดจากตัวกลางดูดซับแอมโมเนียมไนโตรเจน และแอมโมเนียมไนโตรเจนยังสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนบวกที่เกาะอยู่บริเวณผิวของตัวกลางได้ และประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตของตัวกลางแต่ละชนิดเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังต่อไปนี้ ดินดินดาน E, D, C, B, A, กรวด และทราย เท่ากับร้อยละ 93.50, 86.35, 82.24, 78.02, 64.74, 56.11 และ 39.47 ตามลำดับ พบว่า ดินดินดานสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ โดยถูกดูดซับไว้ในตัวกลาง กลไกการตรึงและการดูดติดผิว (ปิติพร มโนคูน, 2554) เห็นได้ว่า ดินดินดานมีประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสมากกว่ากรวดและทราย และจากการศึกษาของสายรุ้ง นพขุนทด (2554) พบว่า สามารถนำดินดินดานมาเป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Remazol Deep Red RGB (Red), Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) และ Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) ด้วยกระบวนการดูดซับได้ และเมื่อทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมาทดสอบกับตัวกลางดินดินดานในระบบคอลัมน์แบบ Fixed Bed เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของคอลัมน์ดินดินดาน ผลการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี และสีของคอลัมน์ดินดินดานมีค่าเท่ากับร้อยละ 97 และ 90 ตามลำดับ และคอลัมน์ดินดินดานเหมาะสำหรับการนำไปใช้กับน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ เพราะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีสูง และอายุการใช้งานนานเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดซีไอดีในน้ำทิ้งหลังผ่าน

ระบบบำบัดทางชีวภาพอายุการใช้งานของระบบนานกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย่อยและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพประมาณ 5 และ 2.5 เท่า ตามลำดับ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า หินดินดานสามารถใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส สารอินทรีย์ และสีย้อม และมีการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

2.8 ต้นอ้อ

ชื่อสามัญ : ต้นอ้อ (Reed)

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

ต้นอ้อเป็นต้นไม้ที่ชอบขึ้นในที่ชุ่มชื้นหรือน้ำขัง จึงมักจะพบเห็นต้นอ้อขึ้นอยู่ริมหนองน้ำ บ่อหรือริมแม่น้ำในที่ทั่วไป โดยต้นอ้อเป็นพืชที่มีวงจรชีวิตมากกว่า 2 ปี และทนทานต่อน้ำท่วม เนื่องจากมีระบบรากมากมาย ลักษณะรากและลำต้นของต้นอ้อดังแสดงในรูปที่ 2.14 ปกติรากของต้นอ้อสามารถแพร่ขยายไปได้ลึก 0.6 – 1 เมตร สามารถดำรงชีวิตได้ที่อุณหภูมิ 10 – 33 องศาเซลเซียส ระดับความเค็มสูงสุดที่พืชทนได้ คือ 45 ส่วนในพันส่วน (ppt) และค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2 – 8 (Reed et al., 1988) ลักษณะของลำต้นมีความแข็งแรง และเป็นปล้อง มีความทนต่อสารพิษ สามารถปรับตัวเข้ากับลักษณะสมบัติของน้ำเสีย และสามารถช่วยกำจัดสีย้อมได้



รูปที่ 2.14 ลักษณะรากและลำต้นของต้นอ้อ

จากการศึกษาของ Brix (1997) และ Armstrong, Afreen-Zobayed, Blyth and Armstrong (1999) พบว่า ต้นอ้อสามารถดึงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศได้ประมาณ 0.02 - 12 กรัมออกซิเจนต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชในระบบและปริมาณออกซิเจนในดินหรือชั้นกรอง (Reed et al., 1988) โดยเอนไซม์ peroxidase (POD) ที่มีอยู่ในต้นอ้อนั้น มีความสำคัญในการกำจัดสีย้อม เนื่องจากเอนไซม์ peroxidase มีความสามารถในการกำจัดสารอะโรมาติกเอมีน, ฟีนอล และซัลโฟเนส (Azevedo et al., 2003; Veitch, 2004) ซึ่งสารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของสีย้อม และจากการศึกษาของ Davies et al. (2009) โดยศึกษากลไกของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัดสีย้อมเอโซเอซิด (Acid orange 7) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 อธิบายได้ว่า เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเอโซเอซิดเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกต้นอ้อ ภายในระบบจะเกิดกระบวนการทำลายสารพิษจากสีย้อม โดยก่อให้เกิดสารอนุมูลอิสระ เช่น ซุปเปอร์ออกไซด์ (Superoxide; O_2^-), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2), ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical; OH) เพิ่มขึ้นในระบบ (Asada K., 2006) ทำให้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เกิดสภาวะความเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) คือ สภาวะที่เกิดความไม่สมดุลของปริมาณอนุมูลอิสระ และสารต้านอนุมูลอิสระ ต้นอ้อที่ปลูกในระบบจะมีเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น Superoxide dismutase (SOD), Catalase (CAT), Peroxidase (POD) และ Glutathione peroxidase (GPX) ที่จะสามารถทำลายอนุมูลอิสระได้ จึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียพอกย้อมได้ นอกจากนี้ เอนไซม์ POD ที่มีอยู่ในต้นอ้อนั้น ยังมีความสำคัญในการกำจัดสีย้อม เนื่องจากเอนไซม์ POD มีความสามารถในการกำจัดสารอะโรมาติกเอมีน, ฟีนอล และซัลโฟเนส ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างสีย้อม ดังนั้น ต้นอ้อจึงกำจัดสีย้อมได้ และพบว่า ต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเอโซเอซิดร้อยละ 68 ± 8 และยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และทีโอดีร้อยละ 69 ± 8 และ 67 ± 4 ตามลำดับ และต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียพอกย้อมได้ ซึ่ง Ong et al. (2009) ได้ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสีย้อมแอซิดเอโซ (Acid Orange 7) ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง (up-flow constructed wetlands) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมระหว่างต้นอ้อ (*Phragmites communis*) และหน่อไม้ฝรั่ง (Manchurian wild rice) พบว่า ในชุดทดลองที่ปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 96 และกำจัดซีโอดี ได้ร้อยละ 82 ส่วนระบบที่ปลูก

หน่อไม้ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 96, และกำจัดซีโอติ ได้ร้อยละ 79 แต่ตรวจพบว่า พืชหน่อไม้ทำให้เกิดสภาวะซีดในระหว่างการเดินระบบ

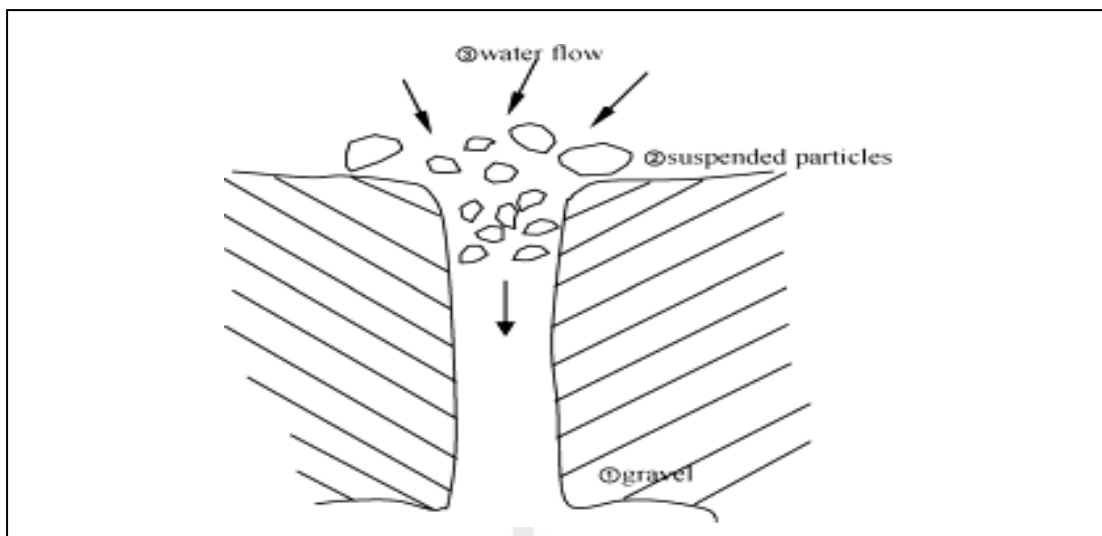
2.9 การอุดตันของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูง โดยส่วนใหญ่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว มักพบว่ามีปัญหาในเรื่องการอุดตันของตัวกลาง ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ การอุดตันที่เกิดขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านและประสิทธิภาพในการบำบัดค่าต่าง ๆ ลดลง อีกทั้งการอุดตันยังเป็นตัวจำกัดอายุการใช้งานระบบ ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัดและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการจัดการระบบ ปัจจุบันได้มีความพยายามในการลดปัญหาการอุดตันดังกล่าว โดยได้มีการวิจัยและศึกษาเพื่อพัฒนาระบบให้สามารถดำเนินงานได้ยาวนาน และลดปัญหาการอุดตันที่เกิดขึ้น

2.9.1 กลไกการอุดตัน

กลไกการอุดตันค่อนข้างซับซ้อนและเข้าใจยาก เนื่องจากการอุดตันเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวภาพ เคมี และกายภาพ เชื่อว่าการอุดตันส่วนใหญ่เกิดจากอนุภาคของของแข็งแขวนลอย ซึ่งของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร มีบทบาทสำคัญในการอุดตันของระบบ (Hua et al., 2010) กระบวนการตกตะกอน และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผลต่อการสกัดกั้นการผ่านภายในช่องว่างของตัวกลางทำให้เกิดการอุดตันขึ้นในระบบ (Chris, James and Martin, 1998) จากการศึกษาของ Langergraber et al. (2003) และ Winter and Goetz (2003) ระบุว่าของแข็งแขวนลอยมีบทบาทสำคัญในการอุดตัน แต่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีผลเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับของแข็งแขวนลอย

กลไกการอุดตันจะเริ่มที่อนุภาคขนาดใหญ่จะติดที่ผิวหน้าของตัวกลางและอนุภาคขนาดเล็กจะติดอยู่ในช่องว่างรูพรุนของตัวกลาง ซึ่งอนุภาคเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นเหมือนตะแกรง (Sieve) ที่ดักอนุภาคขนาดต่าง ๆ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งทำให้อัตราการกรอง อัตราการซึมผ่านของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็ก (Hua et al., 2010)

2.9.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตัน

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง มีกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เคมี และกายภาพ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ มีผลต่อการอุดตันรูพรุนของตัวกลาง ซึ่งการอุดตันทำให้ความสามารถในการซึมผ่านและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียลดลง เช่น ระบบอุดตันทำให้น้ำเสียซึ่งอยู่บนผิวหน้าของระบบ จนทำให้ไม่มีการบำบัดเกิดขึ้น ซึ่งปัญหาการอุดตันมีผลในด้านลบต่อทั้งการเดินระบบ และการบำรุงรักษาระบบ เป็นการจำกัดอายุการใช้งานระบบให้สั้นลง สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.9.2.1 การดักจับของแข็ง (Solids entrapment)

สารแขวนลอยจะถูกกรองและสะสมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง ด้วยกลไกการนำ (Transport) และการยึดติด (Attachment) (Yao, Habibian and O'Melia, 1971) ซึ่งกลไกนี้จะคล้ายกับการสร้างตะกอน โดยมีการชนกันระหว่างอนุภาค และเกิดกลไกการยึดติดกันของอนุภาค น้ำเสียที่มีองค์ประกอบหลายหลาย และมีขนาดอนุภาคหลายหลายก็จะมีช่วงความแตกต่างของกลไกการยึดติดกันของอนุภาค Kadlec and Wallace (2009) อธิบายไว้ว่า การตกตะกอนของอนุภาคขนาดใหญ่ จะมีกลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแน่นอนในระยะ 2 เมตรแรก ส่วนอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 1 - 2 ไมครอน จะถูกกำจัดได้ยากด้วยวิธีการทางกายภาพ แต่สามารถกำจัดได้ด้วยการตกตะกอนทางไฟฟ้า โดยการรวมตัวกันของอนุภาคเหล่านี้ ทำให้เกิดการสะสมอนุภาคขึ้นในระบบ มีผลทำให้อนุภาคเหล่านี้ไปลดช่องว่างรูพรุนของตัวกลางที่ใช้ในระบบ ซึ่งอนุภาคจะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ทำให้อนุภาคมีความสามารถในการยึดติดและเรียงตัวซ้อนกันและก่อให้เกิดส่วนที่ยื่นออกไปจากช่องว่างรูพรุนของตัวกลาง (Dentrites) ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการสกัดกั้นอนุภาคอื่น ๆ ไม่ให้ผ่านชั้นตัวกลางมากขึ้น (Hubbe, Chen and Heitmann, 2009)

2.9.2.2 การอุดตันจากจุลินทรีย์ (Biofilm clogging)

เมื่อเดินระบบผ่านไปเป็นระยะเวลาไม่นาน จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบจะมีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมชั้นของจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง

2.9.2.3 ผลจากพืชในระบบ (Vegetation contribution)

บทบาทของพืชในการอุดตันระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง คือ รากของพืชที่เจริญเติบโตไปตามชั้นของตัวกลางที่ใช้ในระบบ โดยรากของพืชมีผลที่ทำให้เกิดการอุดตันในระบบน้อยมาก ซึ่งจากการสังเกตของ Fisher (1990) พบว่า การแผ่ขยายรากของพืชในระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแวนอน ในการทดลองที่ประเทศออสเตรเลีย นั้น รากพืชจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของระบบ และจากการศึกษาของ Pedescoll et al. (2011) ทดลองใช้ต้นอ้อในตัวกลางกรวด บำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแวนอน ในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น จากนั้นจึงบำบัดน้ำทิ้งด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแวนอน โดยมี 3 ชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองไร้อากาศ ชุดการทดลองควบคุม และชุดการทดลองแบบกะ พบว่า ทั้งสามชุดการทดลองมีประสิทธิภาพค่อนข้างดีใกล้เคียงกัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและแอมโมเนียเท่ากับร้อยละ 80 ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 90 โดยรากของพืชส่วนปลายมีส่วนสำคัญในการสะสมสารอินทรีย์และของแข็งภายในระบบ และเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลา 3 ปี พบว่าค่าความพรุนของตัวกลางสำหรับระบบที่ไม่มีพืชลดลงน้อยกว่าระบบที่ปลูกพืช แสดงให้เห็นว่าพืชมีส่วนในการอุดตันในระบบ

2.9.2.4 ผลจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical effect)

ในกระบวนการบำบัดทางเคมี เช่น การการดูดซับ และการตกตะกอนเบื้องต้น สามารถทำให้เกิดการอุดตันได้ โดยการดูดซับทางกายภาพ-เคมี แต่โดยทั่วไปแล้ว ชั้นของการดูดซับนี้ไม่ได้มีผลจนทำให้ระบบเกิดการอุดตัน หรือมีผลทำให้ตัวกลางเกิดอุดตัน

2.9.2.5 องค์ประกอบของตัวอุดตัน (Clog matter composition)

ในการเดินระบบ มักมีการเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพ ซึ่งเกิดเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันในระบบขึ้น โดยอาจเกิดขึ้นจากการย่อยสลายของซากพืชในระบบทั้งที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของต้นพืช หรือเกิดจากการร่วงหล่นของใบพืชลงไปในระบบ ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพและเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ในระบบ และเกิดจากองค์ประกอบในน้ำเสีย ทำให้ระบบเกิดการสะสมสารอินทรีย์และสารอินทรีย์เป็นผลให้เกิดการอุดตัน เป็นต้น

2.9.3 สมการที่ใช้อธิบายกลไกการอุดตัน

การสะสมทางกายภาพ เคมีและชีวภาพในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้น สามารถทำให้เกิดการอุดตันในรูปพรุนของตัวกลางมีผลทำให้การบำบัดของระบบลดลง และยังทำให้อายุการใช้งานระบบสั้นลงด้วย ซึ่งระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแวนอนนั้นถูกออกแบบให้อายุการใช้งานที่ยาวนาน (Conley, Dick and Lion, 1991) แต่หากเกิดปัญหาการอุดตันขึ้นอาจทำให้อายุระบบสั้นลงเหลือเพียง 15 ปี (Bavor and Schulz, 1993; Cooper et al., 1996) หรืออาจ 10 ปี (Wallace and Knight, 2006) หรือเพียงแค่ 8 ปีก็เป็นที่ (Griffin, Wilson and Cooper, 2008)

โดยทั่วไปมีการวัดการอุดตันในรูปพรุนของตัวกลางโดยสามารถใช้สมการตามกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ในการอธิบาย และหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วไหลซึมกับความเร็วกายภาพ

$$V = ki = k\left(\frac{\Delta h}{l}\right) \quad (2.1)$$

โดยที่ V = ความเร็วของการไหลซึม, เมตร/วินาที
 k = สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน, เมตร/วินาที
 i = $\frac{\Delta h}{l}$ ความชันทางชลศาสตร์
 Δh = ความต่างระดับของน้ำในช่วงความยาวของการไหลซึม, เมตร
 l = ช่วงความยาวของการไหลซึม, เมตร

$$v = \frac{V}{e} \quad (2.2)$$

โดยที่ v = ความเร็วทางกายภาพ, เมตร/วินาที
 V = ความเร็วของการไหลซึม, เมตร/วินาที
 e = ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาระยะเวลาการเคลื่อนที่ของมลสารผ่านชั้นดิน หาได้จากสมการที่ 2.3

$$t = \frac{l}{v} \quad (2.3)$$

โดยที่ t = ระยะเวลาการเคลื่อนที่มลสารผ่านชั้นดิน, วินาที
 l = ช่วงความยาวของการไหลซึม, เมตร
 v = ความเร็วทางกายภาพ, เมตร/วินาที

ค่าความพรุน (Porosity) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมด โดยความพรุนหากมีค่ามากเท่าใดการซึมผ่านก็ยิ่งดีขึ้นหรือเร็วขึ้น การคำนวณความพรุนแสดงตามสมการที่ 2.4

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.4)$$

โดยที่ n = ค่าความพรุน
 e = ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน

2.9.4 การอุดตันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

กลไกการอุดตันระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ

- 1) ชั้นทางผ่านของอนุภาค
- 2) ชั้นการสะสมที่มีความหนา
- 3) ชั้นการอัดแน่นของการอุดตัน

ซึ่งการอุดตันจะลดลงตามระดับความลึกของชั้นตัวกลาง โดยมีอนุภาคของแข็งแขวนลอยติดอยู่ที่ผิวด้านบนของตัวกลางที่ระดับความลึก 0 – 4 เซนติเมตร โดยของแข็งที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร จะถูกดูดซับด้วยแรงไฟฟ้าสถิตและแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force) (Hua et al., 2010) ปัญหาที่พบบ่อยของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ ปัญหาการอุดตันของระบบ มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจาก การอุดตันทำให้การถ่ายเทออกซิเจนในระบบไม่ดี ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น อีกทั้งยังเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง อันจะนำไปสู่การเกิดโรคในคนจากยุง เป็นต้น การอุดตันนับเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน สาเหตุของการอุดตันเกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์และความผิดปกติของการไหลของน้ำในระบบ หรือจากการรวบรวมน้ำเสีย ทำให้มีปัญหาในเรื่องของการเดินระบบ และสาเหตุของปัญหาอาจมาจากขั้นตอนการออกแบบที่ไม่เหมาะสม และในขั้นตอนของการเดินระบบที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ที่ทับถมกันบนผิวหน้าของตัวกลาง (Turon, Comasa and Pocha, 2009) จากการศึกษาของ Ranieri and Thomas (2012) พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวนอนเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของนิเกิลและโครเมียม มีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อระยะเวลาผ่านไป ดังนี้ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลอยู่ในช่วง 82.7 – 30.8 และ ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมอยู่ในช่วง 78.5 – 65.4 ซึ่งการลดลงของประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลและโครเมียมเกิดจากพื้นที่ผิวดูดซับของตัวกลางอิมมัลชัน สาเหตุของการอุดตันเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กภายในระบบ ด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี เช่น การกรองอนุภาคของชั้นตัวกลางในระบบ และการดูดซับที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นตัวกลางในระบบ ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

2.10 สรุป

น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมักมีสารอินทรีย์ และสีที่ย้อมที่หลงเหลืออยู่ เมื่อปนเปื้อนไปในแหล่งน้ำสาธารณะ สีที่ย้อมมีผลทำให้เกิดการขัดขวางการส่องผ่านของแสง ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง และยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และห่วงโซ่อาหารโดยตรง ซึ่งระบบเอเอสเป็นระบบที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม แต่น้ำทิ้งที่ผ่านจากระบบเอเอส พบว่า ยังคงมีค่าซีไอที บีไอที ไม่ผ่านตามมาตรฐานกำหนด และสีที่ย้อมในน้ำทิ้งที่ผ่านจากระบบเอเอสยังคงหลงเหลืออยู่ในปริมาณสูง ดังนั้นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบเอเอส เนื่องจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถบำบัดสารอินทรีย์ สารอาหาร และสีที่ย้อมได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส โดยใช้ตัวกลางหินดินดาน และปลูกต้นอ้อในระบบ ผลการทดลองพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถบำบัดสารอินทรีย์ และสีที่ย้อมได้ดี เนื่องจาก หินดินดานมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ และดูดซับสีที่ย้อม และต้นอ้อซึ่งมีระบบรากทำให้สามารถกรอง

สารอินทรีย์และสารแขวนลอยได้ และต้นอ้อยยังมีเอนไซม์ POD ทำให้สามารถบำบัดสีย้อมได้ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังคงมีข้อจำกัด โดยเฉพาะระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง มักมีปัญหาการอุดตันของระบบ ซึ่งเกิดขึ้นที่ตัวกลางของระบบเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบลดลง อีกทั้ง ยังส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบสั้นลง ซึ่งกลไกการอุดตันที่เกิดขึ้นในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้นค่อนข้างซับซ้อนและเข้าใจยาก ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม เพื่อนำไปสู่การอธิบายถึงการอุดตันที่เกิดขึ้นภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยการนำระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง มีตัวกลางหินดินดานบ่าบ้น้ำทิ้งสังเคราะห์ จากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เปรียบเทียบกับตัวกลางที่ใช้ทั่วไปในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ กรวดผสมทราย เพื่อศึกษากลไกการดูดซับ มีขั้นตอนในการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษวิจัย

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งตั้งอยู่ด้านข้างอาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (F5) และตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง ณ ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 8 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2556 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557

3.3 ขั้นตอนการศึกษวิจัย

รายละเอียดของขั้นตอนการศึกษวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



3.3.1 การเตรียมตัวกลาง และศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง

การเตรียมตัวกลางโดยจำแนกขนาดตัวอย่างหินดินดาน กรวด และทราย โดยวิธี Sieve Analysis (ASTM, 2004) โดยเลือกใช้หินดินดานขนาด 4.00 – 8.00 มิลลิเมตร และ 0.25 – 2.00 มิลลิเมตร เลือกใช้กรวดขนาด 10.00 มิลลิเมตร และ 3.00 – 5.00 มิลลิเมตร และเลือกใช้ทรายขนาด 0.20 – 1.00 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในการเลือกใช้ขนาดของหินดินดาน อ้างอิงจากผลการศึกษาของ สายรุ้ง นพขุนทด (2554) และ ค่าแนะนำการเลือกใช้ตัวกลางของ U.S. EPA (1993)

ตารางที่ 3.1 ขนาดตัวกลางหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทรายที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียด	ชุดคอลัมน์หินดินดาน	ชุดคอลัมน์กรวดผสมทราย
Inlet and Outlet zone	ขนาด 4.00 – 8.00 มม.	กรวดขนาด 10.00 มม.
Treatment zone	ขนาด 0.25 – 2.00 มม.	กรวดขนาด 3.00 – 5.00 มม. ทรายขนาด 0.20 – 1.00 มม.

หลังจากจำแนกขนาดตัวกลางแล้ว นำหินดินดาน กรวด และทรายที่ได้ไปล้างเศษฝุ่นและดินออกจากหินดินดาน กรวด และทราย และนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความพรุน (Porosity) ความหนาแน่น (Density) ขนาดมวลคละ (Sieve Analysis) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability) วิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวกลาง

ปัจจัย	วิธีการวิเคราะห์/มาตรฐานอ้างอิง	อ้างอิง
ขนาด	ASTM D422-63	ASTM (2004)
ความพรุน	ASTM D 4612-03	
ความหนาแน่น	ASTM D 6938	
ขนาดมวลคละ	ASTM D-422	
สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	ASTM D2434	

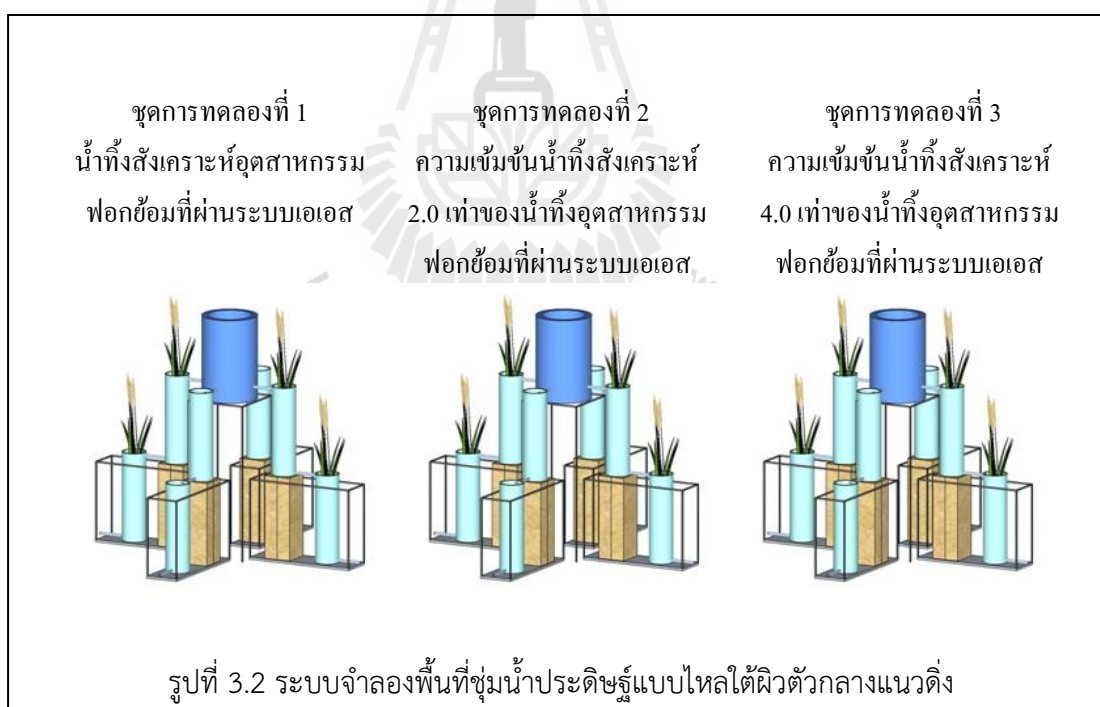
3.3.2 การออกแบบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

3.3.2.1 ขนาดระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นคอลัมน์ทำจากวัสดุ PVC โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร ความสูง 0.80 เมตร ทำการเจาะช่องและติดแผ่นอะคริลิกใสบริเวณด้านหน้าของคอลัมน์ โดยใน 1 ชุดการทดลองจะมีทั้งหมด 4 เซ็ต และใน 1 เซ็ต จะมีบ่อจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง จำนวน 2 คอลัมน์ต่อกันแบบอนุกรม

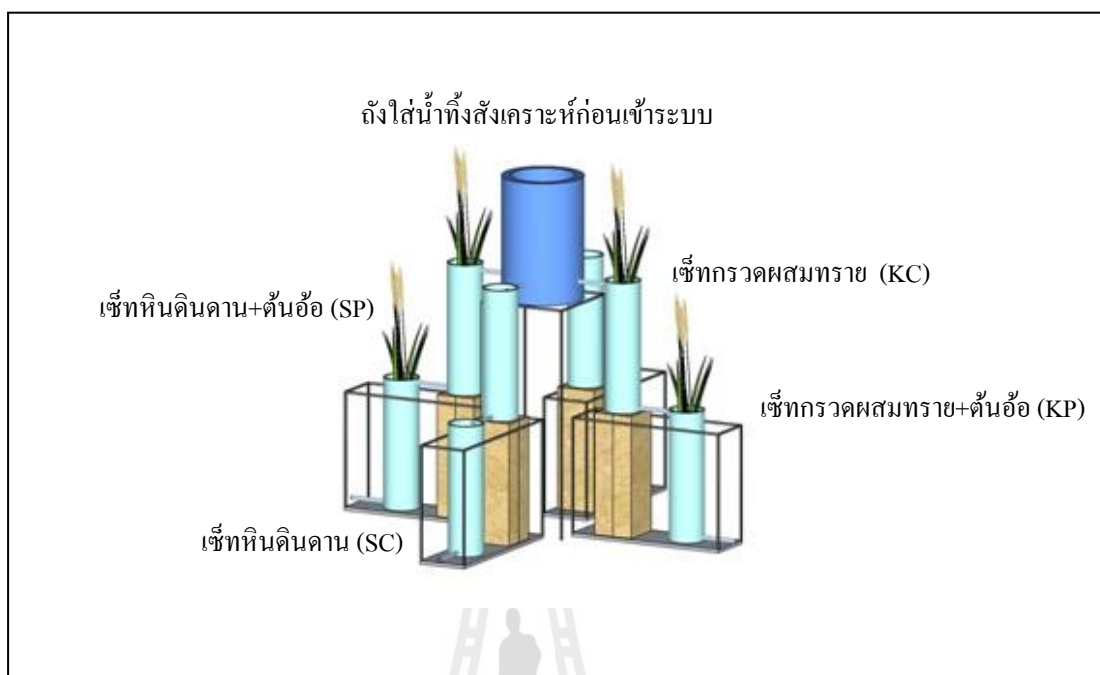
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีชุดการทดลองทั้งหมด 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แต่ละชุดการทดลองใช้น้ำที่สังเคราะห์อุทสาหรรมพอกยอมที่ผ่านระบบเอเอสแตกต่างกัน ดังนี้

- ชุดการทดลองที่ 1 ใช้น้ำที่สังเคราะห์อุทสาหรรมพอกยอมที่ผ่านระบบเอเอส
- ชุดการทดลองที่ 2 ใช้ความเข้มข้นซีไอดีและสียอมน้ำที่สังเคราะห์ 2.0 เท่าของน้ำที่อุทสาหรรมพอกยอมที่ผ่านระบบเอเอส
- ชุดการทดลองที่ 3 ใช้ความเข้มข้นซีไอดีและสียอมน้ำที่สังเคราะห์ 4.0 เท่าของน้ำที่อุทสาหรรมพอกยอมที่ผ่านระบบเอเอส



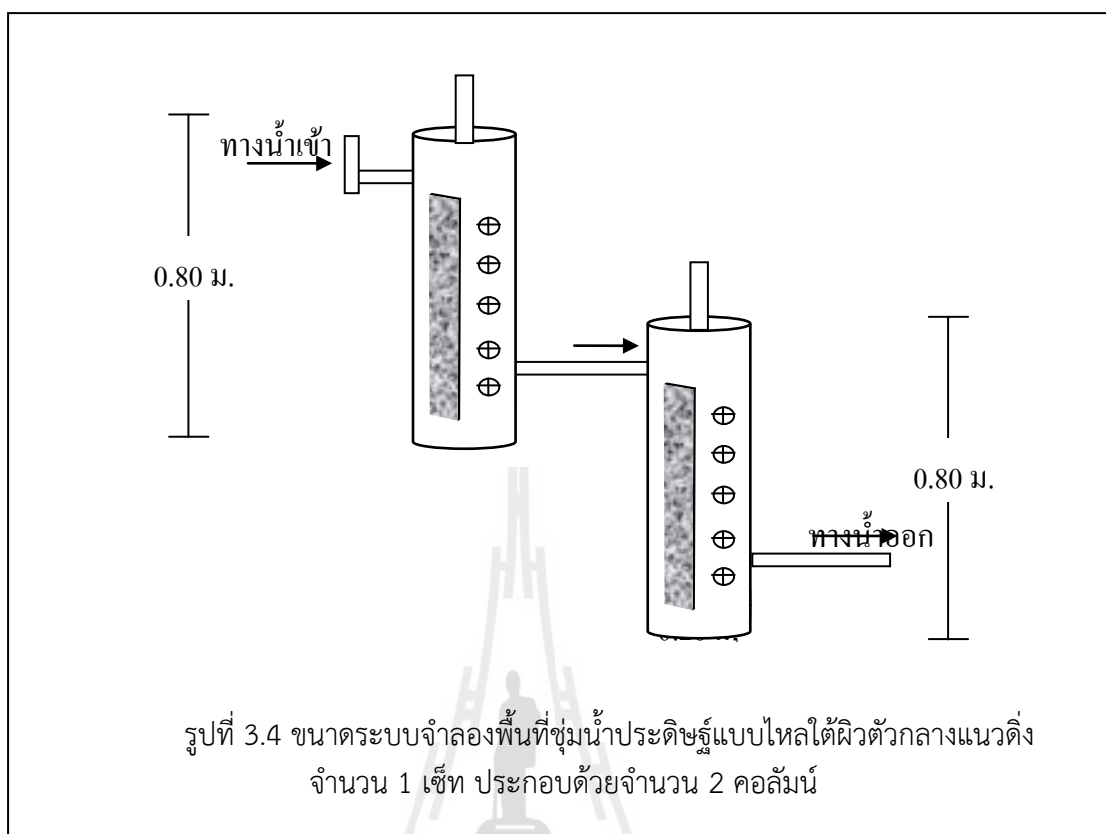
ในแต่ละชุดการทดลอง จะประกอบด้วย 4 เซ็ต ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- เซ็ตที่ 1 บรรจุกตัวกลางหินดินดานและปลุกต้นอ้อ (SP)
- เซ็ตที่ 2 บรรจุกตัวกลางหินดินดานไม่ปลุกต้นอ้อ (SC)
- เซ็ตที่ 3 บรรจุกตัวกลางกรวดผสมทรายและปลุกต้นอ้อ (KP)
- เซ็ตที่ 4 บรรจุกตัวกลางกรวดผสมทรายไม่ปลุกต้นอ้อ (KC)



รูปที่ 3.3 ชุดการทดลองระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง ประกอบด้วยทั้งหมด 4 เซต

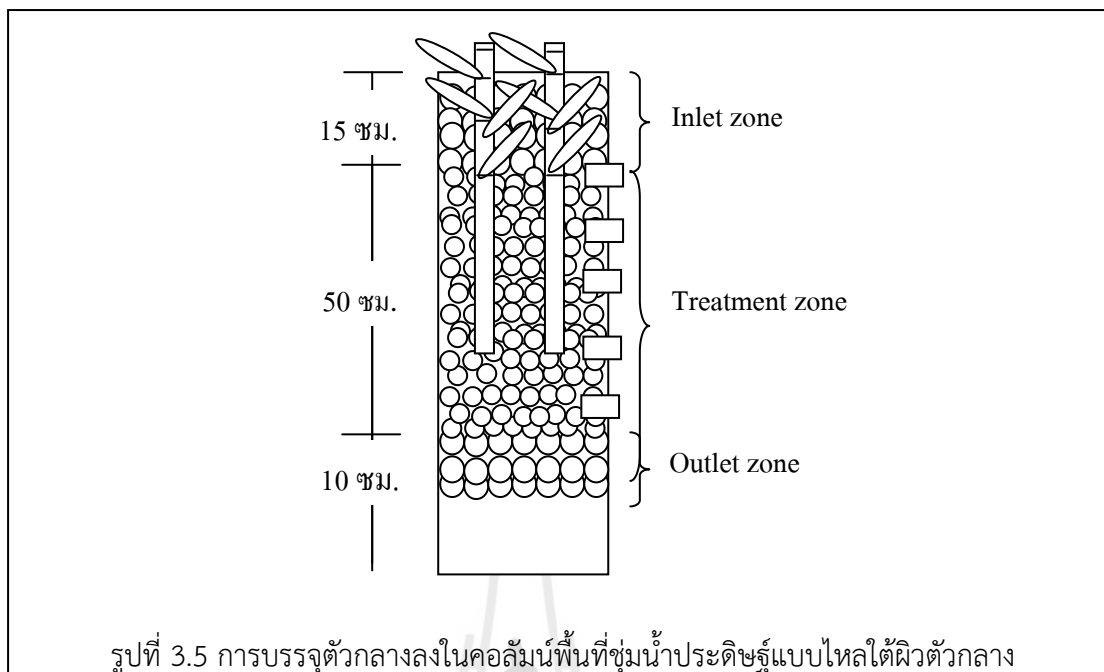
ใน 1 เซต จะมีบ่อจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง จำนวน 2 คอลัมน์ต่อกับแบบอนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยแต่ละคอลัมน์เป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.20 เมตร มีความสูง 0.80 เมตร ตรงกลางกระบอกมีท่อพีวีซีขนาดยาว 0.85 เซนติเมตร เจาะรูทุกระยะ 0.05 เมตร เพื่อใช้ในการตรวจวัดสถานะแวดล้อมของระบบ และใช้ในการควบคุมระดับน้ำ



3.3.2.2 การบรรจุตัวกลาง

ทำการบรรจุตัวกลางลงในคอลัมน์พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยนำตัวอย่างหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทรายที่ผ่านการจำแนกขนาด อ้างอิงตามขนาดตัวกลางสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยทั่วไป (U.S. EPA, 2000) รายละเอียดการบรรจุตัวกลางลงในแต่ละชุดคอลัมน์การทดลอง มีดังต่อไปนี้

- 1) ชุดคอลัมน์ตัวกลางหินดินดาน แบ่งออกเป็น 2 โซน ได้แก่
 - โซนน้ำเข้า – น้ำออก (Inlet – Outlet zone) ทำการบรรจุหินดินดานขนาด 4.00 – 8.00 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถกระจายน้ำเข้า และน้ำออก ได้ดี โดยบริเวณน้ำเข้าบรรจุชั้นหินดินดานสูง 15 เซนติเมตร และบริเวณน้ำออกบรรจุชั้นหินดินดานสูง 10 เซนติเมตร
 - โซนการบำบัด (Treatment zone) บรรจุหินดินดานขนาด 0.25 – 2.00 มิลลิเมตร ระดับความสูง 50 เซนติเมตร
- 2) ชุดคอลัมน์กรวดผสมทราย แบ่งออกเป็น 2 โซน ได้แก่
 - โซนน้ำเข้า – น้ำออก (Inlet – Outlet zone) ทำการบรรจุกรวดขนาด 10.00 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถกระจายน้ำเข้า และน้ำออกได้ดี โดยบริเวณน้ำเข้าบรรจุชั้นกรวดสูง 15 เซนติเมตร และบริเวณน้ำออกบรรจุชั้นกรวดสูง 10 เซนติเมตร
 - โซนการบำบัด (Treatment zone) บรรจุกรวดผสมทราย โดยใช้กรวดขนาด 3.00 – 5.00 มิลลิเมตร และทรายขนาด 0.20 – 1.00 มิลลิเมตร ระดับความสูง 50 เซนติเมตร



3.3.2.3 การเตรียมพืช

พืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัย คือ ต้นอ้อ มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Phragmites communis* (Cav.) Trin. Ex Steudel โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกพืช คือ เลือกต้นที่มีขนาดสมบูรณ์ ความสูงประมาณ 60 เซนติเมตร สีของใบมีสีเขียว ไม่ปรากฏสภาวะใบซีดเหลือง มีจำนวนใบไม่น้อยกว่า 3 – 4 ใบ ความหนาแน่นของรากมีขนาดใกล้เคียงกัน นำมาปลูกภายในบริเวณพื้นที่การศึกษา จนกระทั่งพืชสามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ตามปกติ จากนั้น จึงทำการย้ายพืชมาปลูกในชุดทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางประมาณ 2 – 3 สัปดาห์ เพื่อปรับสภาพเข้ากับสภาวะที่จะทำการทดลอง ก่อนเริ่มทำการเดินระบบ

3.3.2.4 สภาวะของการเดินระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นการนำระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง 2 คอลัมน์มาต่ออนุกรมกัน อ้างอิงเกณฑ์การออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของ U.S. EPA (2000) จากผลสรุปรงานวิจัยของ ศิริพรรณ คำแน่น (2555) พบว่า การบำบัดสารอินทรีย์และสีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง เดินระบบด้วยอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 69.78 – 78.33 กิโลกรัมบีโอดี/เฮกแตร์.วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด จากผลการศึกษาสามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราการไหล (Q) เข้าคอลัมน์พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้งได้เท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน ดังแสดงในสมการที่ 3.1 และนำมาคำนวณหาค่าระยะเวลาเก็บกักน้ำในคอลัมน์ (t_1 และ t_2) เท่ากับ 1.20 วัน ระยะเวลาเก็บกักระบบ ($T_{รวม}$) เท่ากับ 2.40 วัน ได้จากสมการที่ 3.2 รายละเอียดการออกแบบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และภาคผนวก ก

$$\text{อัตราการไหลพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง} \quad Q = \frac{LW[n d_w]}{t} \quad (3.1)$$

$$\text{ระยะเวลาเก็บกักของระบบ} \quad T_{\text{รวม}} = t_1 + t_2 \quad (3.2)$$

เมื่อ	Q	=	อัตราการไหล (ลบ.ม. ต่อวัน)
	L	=	ความยาวของระบบ (เมตร)
	W	=	ความกว้างของระบบ (เมตร)
	d_w	=	ระดับความลึกของน้ำ (เมตร)
	n	=	ค่าความพรุนของตัวกลาง
	$T_{\text{รวม}}$	=	ระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบ (วัน)
	t_1	=	ระยะเวลาเก็บกักของคอลัมน์แบบไหลใต้ผิวดักคอลัมน์ที่ 1 (วัน)
	t_2	=	ระยะเวลาเก็บกักของคอลัมน์แบบไหลใต้ผิวดักคอลัมน์ที่ 2 (วัน)

ตารางที่ 3.3 สรุปค่าการออกแบบระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

รายละเอียด	ชุดการทดลอง			หน่วย
	1	2	3	
ซีโอดี	106-488	212-976	424-1,952	มิลลิกรัมต่อลิตร
บีโอดี	13.8-48	27.6-96	55.2-192	มิลลิกรัมต่อลิตร
สีย้อม	127-229	254-458	508-916	Pt-Co
ความสูงของน้ำในแต่ละคอลัมน์	0.70	0.70	0.70	เมตร
ความสูงของตัวกลางในแต่ละคอลัมน์	0.75	0.75	0.75	เมตร
อัตราการไหลของระบบ	6.41	6.41	6.41	ลิตรต่อวัน
ระยะเวลาเก็บกักของในแต่ละคอลัมน์	1.20	1.20	1.20	วัน
ระยะเวลาเก็บกักรวมของระบบ	2.40	2.40	2.40	วัน

3.3.2.5 การเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส

การเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.4 มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 211.20 – 230.40 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าสีย้อมอยู่ในช่วง 133.57 – 152.62 Pt-Co ลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลองสรุปดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอสที่ใช้ศึกษาวิจัย

องค์ประกอบ	น้ำหนักของสาร (มิลลิกรัม) ต่อปริมาตร 1 ลิตร
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

ตารางที่ 3.5 สรุปลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลอง

รายละเอียด	ชุดการทดลอง			หน่วย
	1	2	3	
ซีไอดี	211.20-230.40	70.70-80.95	787.20-828.80	มิลลิกรัมต่อลิตร
บีไอดี	32.40-44.20	409.60-457.60	136.05-150.60	มิลลิกรัมต่อลิตร
สีย้อม	133.57-152.62	279.29-358.81	557.38-634.05	Pt-Co
ของแข็งทั้งหมด	437.50-512.50	810.00-907.50	1,190.00-1,250.00	มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย	90.00-135.00	175.00-220.00	307.50-337.50	มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4 การเดินระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

3.4.1 ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

ช่วงแรกของการเดินระบบ นำน้ำประปาเข้าไปในระบบและทำการเติมปุ๋ยน้ำเล็กน้อยเพื่อให้พืชปรับสภาพประมาณ 2 - 3 สัปดาห์ หลังจากนั้นจึงทำการเดินระบบต่อด้วยน้ำประปาอีกประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อเตรียมระบบก่อนการเดินระบบด้วยน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบเอเอส

3.4.2 การเดินระบบ

ทำการเดินระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (รูปที่ 3.6) สภาวะการเดินระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

3.4.3 การเก็บตัวอย่าง

ทำการเดินระบบตามหัวข้อ 3.4.2 รายละเอียดจุดเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และการเก็บตัวอย่างเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หมีดังต่อไปนี้

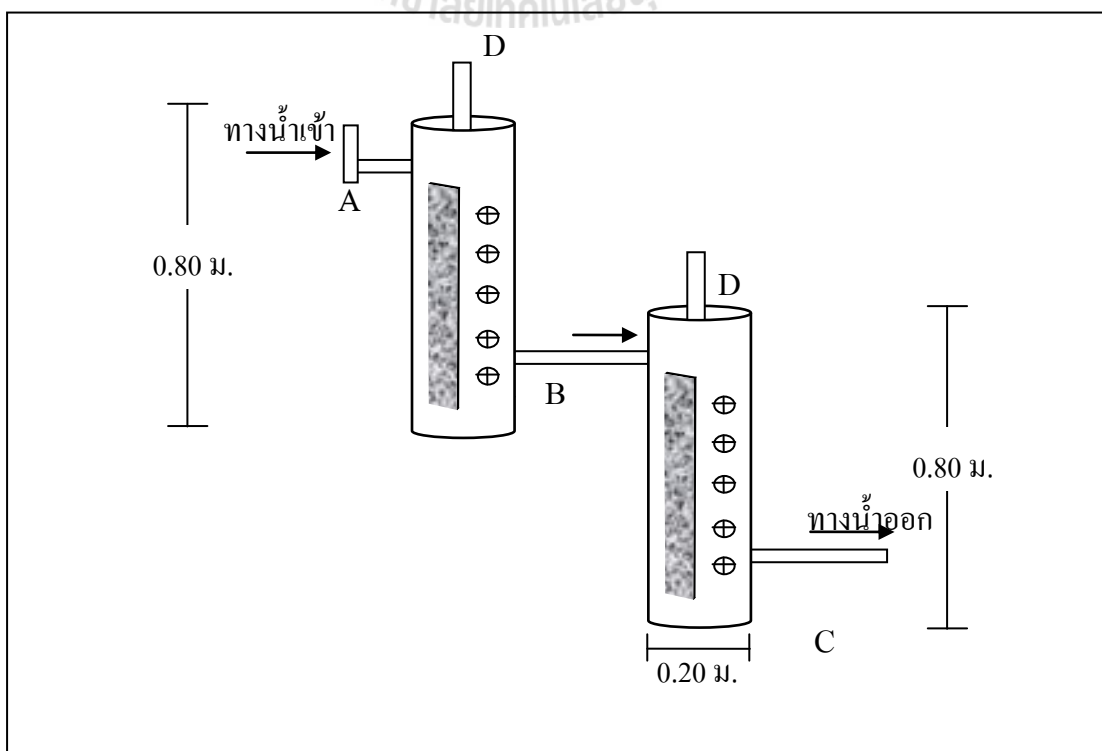
3.4.3.1 การเก็บตัวอย่างเพื่อประเมินการอุดตัน

1) เก็บตัวอย่างที่จุด A และ C ทุก 15 วัน เพื่อตรวจวิเคราะห์ค่าอัตราการซึมผ่าน (Infiltration Rate)

2) เก็บตัวอย่างที่จุด A, B และ C ทุกสัปดาห์ เพื่อตรวจวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids) และค่าของแข็งแขวนลอย (Total suspended solids) รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง



รูปที่ 3.7 จุดเก็บตัวอย่างระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินตัวกลางแวนดิง
ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินการอุดตัน

ปัจจัย	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
Infiltration Rate	วัดอัตราการไหล	Darcy's law
Particle size	Particle counter ยี่ห้อ HIAC Royco รุ่น 8000A	Hua et al. (2010)
Total solids	Gravimetric method	APHA et al. (2005)
Total suspended solids	Gravimetric method	APHA et al. (2005)

ตารางที่ 3.7 วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์ และสภาวะภายในระบบจำลอง

ลักษณะสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
COD	Close Reflux Method	APHA et al. (2005)
BOD ₅	5-day BOD Test	
Color	Spectrophotometric method	
Dissolved oxygen	DO meter	
pH	pH meter	
Temperature	Thermometer	
Oxidation Reduction Potential	ORP meter	

3.4.3.2 เก็บตัวอย่างเพื่อประเมินสภาวะภายในระบบจำลอง

เก็บตัวอย่างที่จุด D ภายในคอลัมน์ทุกสัปดาห์ เพื่อตรวจวิเคราะห์ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolve Oxygen) พีเอช (pH) อุณหภูมิ (Temperature) และค่าไออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

3.4.3.3 เก็บตัวอย่างเพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และสารอินทรีย์

เก็บตัวอย่างที่จุด A, B และ C ทุกสัปดาห์ เพื่อตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) และสี (Color) รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

3.4.3.4 วัดการเจริญเติบโตของพืช

คุณลักษณะทางกายภาพของพืช ได้แก่ ความชื้นของใบ วัดความสูงของพืชในระบบทุกสัปดาห์

3.4.3.5 วัดข้อมูลทางอุตุนิยมิวิทยา

ทำการวัดข้อมูลอุตุนิยมิวิทยาบริเวณที่ติดตั้งชุดการทดลองระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝนโดยทำการวัดความชื้นสัมพัทธ์ ด้วยเครื่องวัดความชื้นไฮโกรมิเตอร์ (Hygrometer) และวัดปริมาณน้ำฝนด้วยอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำฝน (Rain gauge)

3.4.4 การประเมินการอุดตัน

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันดังแสดงในตารางที่ 3.6 รายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

- ค่าอัตราการซึมผ่าน (Infiltration Rate) นำไปประเมินการอุดตันภายในระบบ สูตรการคำนวณหาอัตราการซึมผ่านได้จากสมการของดาร์ซี (Darcy's formula) ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$q = \frac{K\Delta H}{z} \quad (3.3)$$

โดย q = ความเร็วจำเพาะ (เซนติเมตรต่อวินาที)
 K = อัตราการซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
 ΔH = ความดันชลศาสตร์ (เซนติเมตร)
 z = ความหนาตัวกลาง (เซนติเมตร)

- ขนาดอนุภาค (Particle size) ทำการวัดขนาดอนุภาคในน้ำทิ้ง เพื่อดูขนาดอนุภาคที่มีผลต่อการอุดตันของระบบ
- ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) วัดค่าของแข็งทั้งหมด เพื่อดูปริมาณการสะสมของของแข็งทั้งหมดในระบบ รายละเอียดการคำนวณ ดังแสดงในภาคผนวก จ
- ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids) วัดค่าของแข็งแขวนลอย เพื่อดูปริมาณการสะสมของของแข็งแขวนลอยในระบบ รายละเอียดการคำนวณ ดังแสดงในภาคผนวก ฉ

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 การคาดการณ์อายุของระบบ

ประเมินอายุการใช้งานของระบบ นำค่าอัตราการซึมผ่าน ขนาดของอนุภาคในน้ำทิ้ง ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอย โดยวิเคราะห์รูปแบบการอุดตันในตัวกลาง แต่ละชนิดที่ใช้ในระบบ เปรียบเทียบระหว่าง ตัวกลางหินดินดาน และกรวดผสมทราย เพื่อนำไปประเมินรูปแบบการอุดตันของระบบ

3.5.2 ประเมินค่าประสิทธิภาพของระบบ

ประเมินค่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเข้า – น้ำออก จาก

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งในแต่ละชุดการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาค่าซีไอดี บีไอดี สีย้อม ของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย และนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (3.5)$$

โดย C_i = ความเข้มข้นน้ำเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_e = ความเข้มข้นน้ำออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.5.3 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

จากผลการศึกษากลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในตัวกลางแต่ละชนิดของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้ง นำไปหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำข้อมูลไปทดสอบความแตกต่างของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทราย ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS เวอร์ชัน 16.0 โดยทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิควิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (Analysis of Covariance: ANCOVA) สมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

1) กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และบีไอดี ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน เท่ากับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และบีไอดี ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และบีไอดี ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดานไม่เท่ากับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและบีไอดีของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.05

2) กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน เท่ากับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน ไม่เท่ากับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.05

3) กรณีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน เท่ากับ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน ไม่เท่ากับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย

จะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อ Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.05



บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้ ได้ศึกษาการอุดตันและคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางหินดินดาน เปรียบเทียบกับตัวกลางที่ใช้ทั่วไปในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ กรวดผสมทราย ในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส โดยมีรายละเอียดการศึกษา ดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยเก็บน้ำตัวอย่างในถังรวบรวมน้ำก่อนปล่อยเข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดักตัวกลางแนวตั้งของแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ลักษณะน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ค่าความเข้มข้นของบีโอดี และซีโอดี อยู่ในช่วง 32.40 – 150.60 และ 211.20 – 828.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด โดยมีความอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีอยู่ในช่วงระหว่าง 0.15 – 0.18 จะเห็นได้ว่ายังคงเหลือปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากในปริมาณสูง ส่วนค่าของแข็งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolve Solids) คิดเป็นร้อยละ 75 ของค่าของแข็งทั้งหมด เนื่องมาจากสีย้อมเอโซ ซึ่งเป็นสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ทำให้น้ำตัวอย่างมีค่าของแข็งละลายน้ำในปริมาณสูง จากผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ใช้ตลอดระยะเวลาในการศึกษาวิจัย จะเห็นได้ว่าค่าความแปรปรวน (Standard Deviation : S.D.) ของข้อมูลอยู่ในช่วง 2.24 – 26.73 ซึ่งมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาศึกษาวิจัย โดยเฉพาะค่าบีโอดี ซีโอดี และสีย้อม จากลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส นำมาคำนวณหาอัตราการระบรทุกสารที่เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดักตัวกลางแนวตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านระบบบำบัดเอเอส

พารามิเตอร์	หน่วย	ชุดการทดลอง 1		ชุดการทดลอง 2		ชุดการทดลอง 3	
		Min – Max	S.D.	Min – Max	S.D.	Min – Max	S.D.
บีโอดี	มก./ล.	32.40-44.20	3.38	70.70-80.95	2.24	136.05-150.60	3.59
ซีโอดี	มก./ล.	211.20-230.40	6.30	409.60-457.60	14.55	787.20-828.80	11.38
สีย้อม	Pt-Co	133.57-152.62	4.98	279.29-358.81	22.87	557.38-634.05	14.26
ของแข็งทั้งหมด	มก./ล.	437.50-512.50	21.19	810.00-907.50	24.50	1,190.00-1,250.00	18.62
ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	90.00-135.00	6.68	175.00-220.00	12.79	307.50-337.50	9.67
ของแข็งละลายน้ำ	มก./ล.	342.50-410.00	16.35	622.60-715.00	24.09	862.50-927.50	26.73

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 30 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.2 อัตราการบำบัดทุกสารที่เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ลักษณะสมบัติ	อัตราการบำบัดทุกสาร (กิโลกรัม/เฮกแตร์.วัน)		
	ชุดการทดลอง 1	ชุดการทดลอง 2	ชุดการทดลอง 3
อัตราการบำบัดทุกบีโอดี	66.11 – 90.19	144.26 – 165.18	277.61 – 307.30
อัตราการบำบัดทุกซีโอดี	430.95 – 470.13	835.79 – 933.73	1,606.27 – 1,691.16
อัตราการบำบัดทุกสีย้อม	272.55 – 311.42	569.88 – 732.15	1,137.33 – 1,293.77
อัตราการบำบัดทุกของแข็งทั้งหมด	892.72 – 1,045.75	1,652.80 – 1,851.75	2,528.18 – 2,550.61
อัตราการบำบัดทุกของแข็งแขวนลอย	183.64 – 275.47	357.09 – 448.91	627.45 – 688.67
อัตราการบำบัดทุกของแข็งละลายน้ำ	698.87 – 836.60	1,270.21 – 1,458.55	1,759.92 – 1,892.56

หมายเหตุ : 1) จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 30 ตัวอย่าง

2) ความเข้มข้นสีย้อมในหน่วย Pt-Co ดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.2 ตัวกลางหินดินดาน และกรวดผสมทรายที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

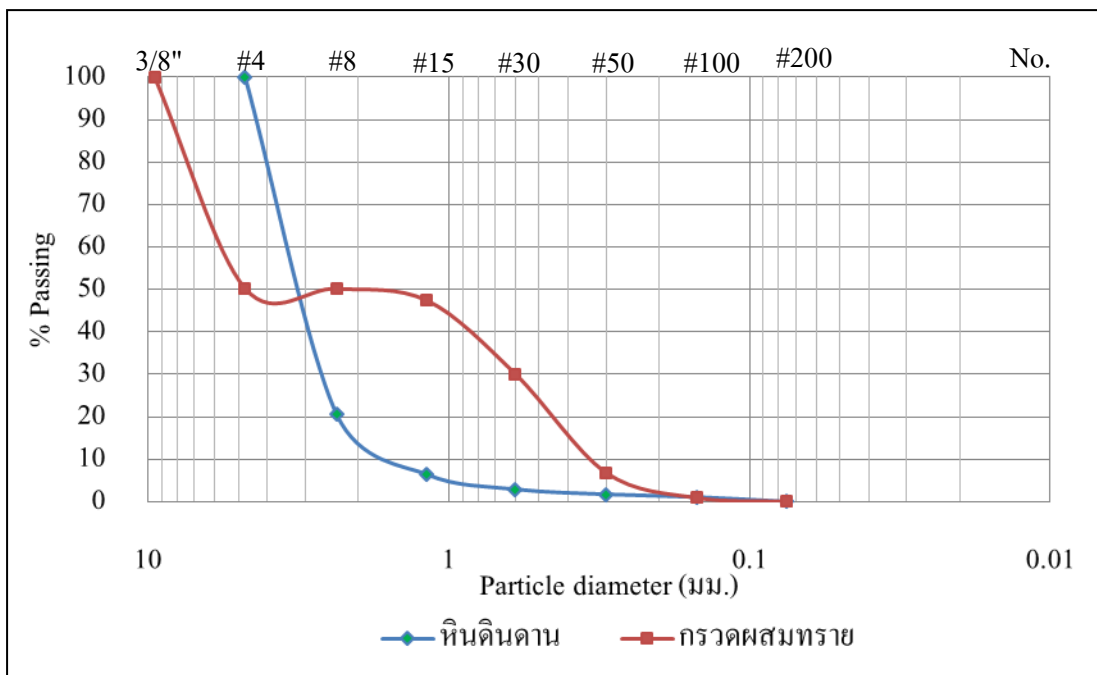
ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกลางหินดินดานเปรียบเทียบกับตัวกลางทั่วไป ได้แก่ กรวดผสมทรายที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าตัวกลางหินดินดานมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.34 และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 0.18 เซนติเมตรต่อวินาที มีค่าสูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทรายที่มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.30 และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 0.11 เซนติเมตรต่อวินาที การเลือกใช้ตัวกลางสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำ

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	หินดินดาน	กรวดผสมทราย
ความพรุน	-	0.34	0.30
สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	เซนติเมตรต่อวินาที	0.18	0.11
ความหนาแน่น	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	1.34	2.04

ประติษฐ์จะมีผลต่อการไหลของน้ำเสียภายในระบบ หินที่มีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูงจะช่วยลดปัญหาการอุดตันที่จะเกิดขึ้นภายในระบบได้ แต่หินขนาดใหญ่มีข้อจำกัด คือ จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารต่าง ๆ ในน้ำเสียต่ำ (U.S. EPA, 1993) หินดินดานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้มีขนาดและค่าความพรุนอยู่ในช่วงค่าที่ U.S. EPA แนะนำ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 สำหรับใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง ผลการศึกษาความหนาแน่นของตัวกลางหินดินดานพบว่ามีค่า เท่ากับ 1.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร น้อยกว่าตัวกลางกรวดผสมทรายที่มีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 2.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรเกือบ 2 เท่า หินดินดานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นชั้นหินบาง ๆ เนื้อหินละเอียดมาก กะเทาะหรือหลุดเป็นแผ่นได้ง่าย ส่วนตัวกลางกรวดผสมทรายที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้จากการนำเอากรวดและทรายผสมในอัตราส่วนที่เท่ากันและเมื่อนำไปวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวม (Particle Size Distribution) เพื่อดูการกระจายตัวของตัวกลางที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จากผลการศึกษาขนาดคละของมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า ขนาดของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีขนาดคละกันแบบสม่ำเสมอ (Uniform graded) มีค่า Effective size เท่ากับ 1.7 มิลลิเมตร และตัวกลางกรวดผสมทรายมีขนาดคละกันขาดช่วง (Gap graded) เนื่องจากมีตัวกลางกรวดและทรายผสมกัน มีค่า Effective size เท่ากับ 0.35 มิลลิเมตร จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าตัวกลางหินดินดานมีค่า Effective size สูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย ดังนั้นหินดินดานจึงมีช่องว่างในการไหลของน้ำได้ดีกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย เนื่องมาจากค่า Effective size คือขนาดของตัวกลางที่เล็กกว่าร้อยละ 10 ซึ่งตัวกลางที่มีขนาดเล็กจะแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างตัวกลางที่มีขนาดใหญ่ จึงเป็นตัวควบคุมการไหลของน้ำและทำให้มีช่องว่างในการไหลของน้ำลดลง ส่งผลให้ระบบมีโอกาสในการเกิดการอุดตันได้เร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากอนุภาคในน้ำเสียจะสามารถติดค้างช่องว่างระหว่างตัวกลางได้มากขึ้น และหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาดคละกันแบบสม่ำเสมอ (Uniform graded) ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการกรองมลสารในน้ำเสียได้ดีกว่าตัวกลางที่มีขนาดคละกันไม่ดีส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกรองมลสารได้ต่ำ (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2526)

จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวกลางทั้งหินดินดานและกรวดทรายที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ อยู่ในช่วงที่แนะนำสำหรับตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์โดย U.S. EPA ส่วนค่าความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านซึ่งจะมีผลต่ออายุการอุดตันของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประติษฐ์ พบว่าตัวกลางหินดินดานจะมีค่าสูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย



รูปที่ 4.1 ขนาดมวลคละของตัวกลางหินดินดาน และตัวกลางกรวดผสมทราย

4.3 สภาวะแวดล้อมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ผลการตรวจวิเคราะห์สภาวะแวดล้อมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง ตลอดช่วงระยะเวลาการเดินระบบ 196 วัน ดังสรุปในตารางที่ 4.4 จากการตรวจวัดทุก ๆ 7 วัน พบว่า ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดังกล่าวของชุดการทดลองที่มีหินดินดานเป็นตัวกลาง มีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง (+39.1) – (+61.3) มิลลิโวลต์ และชุดการทดลองที่มีกรวดผสมทรายเป็นตัวกลาง มีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง (+39.1) – (+61.3) มิลลิโวลต์ เช่นเดียวกัน ค่าโออาร์พีสามารถบ่งบอกถึงสภาวะการมีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนของระบบ โดยหากมีค่าโออาร์พีมากกว่า +100 มิลลิโวลต์ แสดงว่าระบบจะอยู่ในสภาวะมีออกซิเจน แต่หากค่า โออาร์พีน้อยกว่า -100 มิลลิโวลต์ แสดงว่าระบบเกิดสภาวะไม่มีออกซิเจน (Suthersan, 2002) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 3 ชุดการทดลองอยู่ในสภาวะกึ่งมีออกซิเจน เพราะโออาร์พีมีค่าเป็นบวก แต่มีค่าน้อยกว่า +100 มิลลิโวลต์ เนื่องจากในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดังกล่าว น้ำที่ไหลอยู่ใต้ผิวดังกล่าว ทำให้ปริมาณออกซิเจนภายในระบบค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านผิวดิน ระบบจำลองนี้ได้รับออกซิเจนจากช่องว่างของตัวกลางและจากรากพืช และจากผลการตรวจวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำของชุดการทดลองที่มีหินดินดานเป็นตัวกลางและชุดกรวดผสมทราย พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1.90 – 3.24 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลการตรวจวัดค่า

ตารางที่ 4.4 สภาวะแวดล้อมในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Min - Max)

ชุดการทดลอง	เซ้ท	โออาร์พี (มิลลิโวลท์)	ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ชุดการทดลองที่ 1	SP	(+39.3) – (+60.4)	1.95 – 3.15	6.00 – 7.23	15.7 – 31.1
	SC	(+39.1) – (+61.3)	1.90 – 3.20	6.10 – 7.09	15.8 – 31.0
	KP	(+39.1) – (+61.1)	1.93 – 3.24	6.15 – 7.33	15.8 – 31.0
	KC	(+40.2) – (+61.0)	1.92 – 3.13	6.09 – 7.31	15.8 – 31.1
ชุดการทดลองที่ 2	SP	(+39.6) – (+60.8)	1.98 – 3.14	6.09 – 7.23	15.7 – 31.0
	SC	(+40.5) – (+59.4)	1.90 – 3.24	6.09 – 7.71	15.9 – 31.0
	KP	(+40.5) – (+61.3)	1.95 – 3.15	6.22 – 7.33	15.9 -31.1
	KC	(+40.7) – (+61.0)	1.95 – 3.07	6.09 – 7.08	15.8 – 31.0
ชุดการทดลองที่ 3	SP	(+40.0) – (+61.2)	1.93 – 3.05	6.05 – 7.33	15.9 – 31.1
	SC	(+41.0) – (+59.7)	1.90 – 3.14	6.05 – 7.40	15.9 – 31.0
	KP	(+40.9) – (+59.9)	1.90 – 3.14	6.05 – 7.21	15.9 – 31.0
	KC	(+39.9) – (+59.8)	1.91 – 3.17	6.15 – 7.33	15.8 – 31.1

โออาร์พีและค่าความพรุนของตัวกลางทั้งสองชนิดที่มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน มีผลทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศสามารถผ่านชั้นตัวกลางในระบบได้ อีกทั้งพืชยังมีส่วนช่วยในการถ่ายเทออกซิเจนจากบรรยากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับระบบด้วย ค่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 6.00 – 7.71 และอุณหภูมิภายในของทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 15.7 – 31.1 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าผลการศึกษาช่วงค่าพีเอชและอุณหภูมิมีความเหมาะสมสำหรับการดำรงชีวิตของต้นอ้อและจุลินทรีย์ในระบบ Reed, Middlebrooks, and Crites (1988) แนะนำว่าค่าพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นอ้อควรอยู่ในช่วง 2.0 – 8.0 และอุณหภูมิควรอยู่ในช่วง 10.0 – 35.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.4 ข้อมูลทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยบริเวณที่ตั้งระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ผลการตรวจวัดข้อมูลทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยบริเวณที่ตั้งระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ทุกๆ 7 วัน พบว่าปริมาณน้ำฝนมีค่าอยู่ในช่วง 10.1 – 27.3 มิลลิเมตร ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 69 – 82 และอุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 16.8 – 32.1 องศาเซลเซียส ค่าทางอุตุนิยวิทยาและสภาพอากาศเป็นปัจจัยประการหนึ่งที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น อากาศที่ร้อนจัดจะส่งผลต่อการระเหยและการใช้น้ำของพืชต่อวัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด (Bowmer, 1987) จากผลการตรวจวัดข้อมูลทางอุตุนิยวิทยา จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำฝนมีค่าปานกลางและอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วงที่ไม่ร้อนจัด เนื่องมาจากทำการทดลองเดินระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในช่วงเดือนกรกฎาคม – เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2557 สภาพภูมิอากาศอยู่ในช่วงที่ต้นอ้อสามารถเจริญเติบโตได้ดี (รายละเอียดผลการศึกษแสดงในภาคผนวก ค)

4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากผลการตรวจวิเคราะห์ น้ำเข้า – ออก จากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอติ บีโอติ สีย้อม และค่าของแข็ง ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 ชุดการทดลองที่ 2 และชุดการทดลองที่ 3 มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 430.95 – 470.13, 835.79 – 933.73 และ 1,606.27 – 1,691.16 กิโลกรัมซีโอติ/เฮกแตร์.วัน ตามลำดับ โดยใช้ค่าคุณภาพน้ำ ณ สถานะคงตัว (Steady state) นำมาคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด รายละเอียดผลการศึกษา มีดังต่อไปนี้

4.5.1 การบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอติและบีโอติ

4.5.1.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์

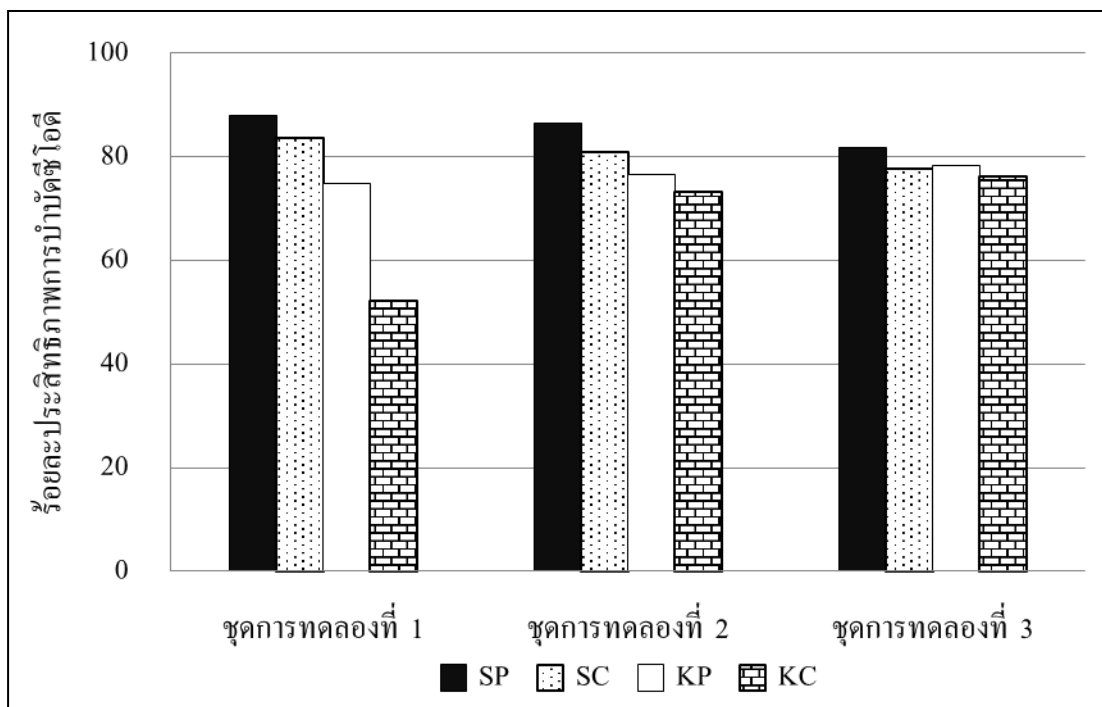
ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเดินระบบ 196 วัน ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 น้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นซีโอติอยู่ในช่วง 211.20 – 230.40, 409.60 – 457.60 และ 787.20 – 828.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีความเข้มข้นบีโอติอยู่ในช่วง 32.40 – 44.20, 70.70 – 80.95 และ 136.05 – 150.60 มิลลิกรัมต่อ

ลิตร ตามลำดับ ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำทิ้งผ่านระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ณ สถานะคงตัวตั้งแต่วันที่ 42 นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี และบีไอดีของชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกัน คือ มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, เซ้ท SC, เซ้ท KP และ เซ้ท KC ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 88.04, 83.61, 74.81 และ 52.23 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.5 และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดีเท่ากับร้อยละ 92.57, 92.46, 85.71 และ 84.22 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีของชุดการทดลองที่ 1 ตลอดระยะเวลา 196 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) และ 4.4 (ข) และชุดการทดลองที่ 2 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 86.58, 80.83, 76.51 และ 73.16 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด บีไอดีเท่ากับร้อยละ 91.43, 89.65, 86.35 และ 85.91 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีของชุดการทดลองที่ 2 ตลอดระยะเวลา 196 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) และ 4.4 (ง) และชุดการทดลองที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, เซ้ท KP, เซ้ท SC และ เซ้ท KC ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 81.76, 78.21, 77.59 และ 76.21 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดี มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, เซ้ท SC, เซ้ท KP และ เซ้ท KC ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดบีไอดีเท่ากับร้อยละ 89.44, 89.20, 88.60 และ 87.99 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีของชุดการทดลองที่ 3 ตลอดระยะเวลา 196 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (จ) และ 4.4 (ฉ)

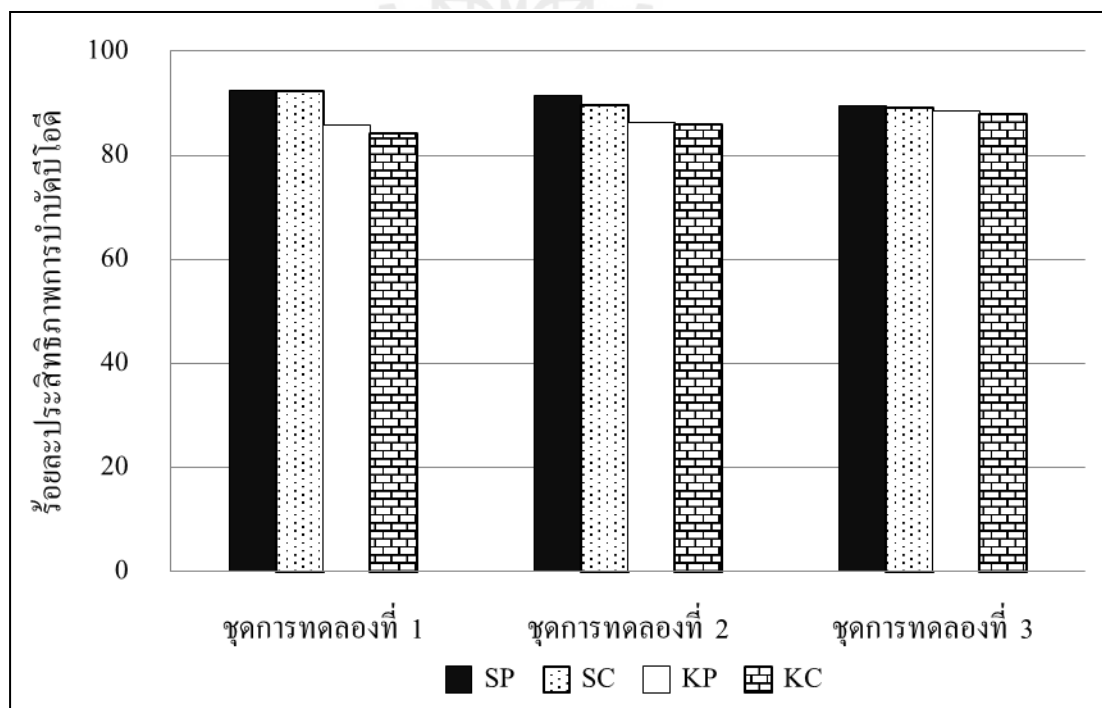
จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย เนื่องมาจากกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้แก่ การกรอง การตกตะกอนและกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ โดยตัวกลางในระบบจะเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ สอดคล้องกับการศึกษาของ อมรา ดาวโรสง (2550) เปรียบเทียบตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าตัวกลางหินดินดานขนาด 2.00 - 4.00 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีเท่ากับร้อยละ 48.55 - 72.96 สูงกว่าตัวกลางกรวดและทรายที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีเท่ากับร้อยละ 45.27 และ 42.24 ตามลำดับ นอกจากนี้จุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามพืชและตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีบทบาทในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย การศึกษาในครั้งนี้พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เซ้ทที่ปลูกต้นอ้อ มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์สูงกว่าเซ้ทที่ไม่ปลูกต้นอ้อ จะเห็นได้ว่าเซ้ทที่มีการปลูกต้นอ้อ ได้แก่ เซ้ท SP และ เซ้ท K มีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและบีไอดีสูงกว่าเซ้ทควบคุมที่

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดี

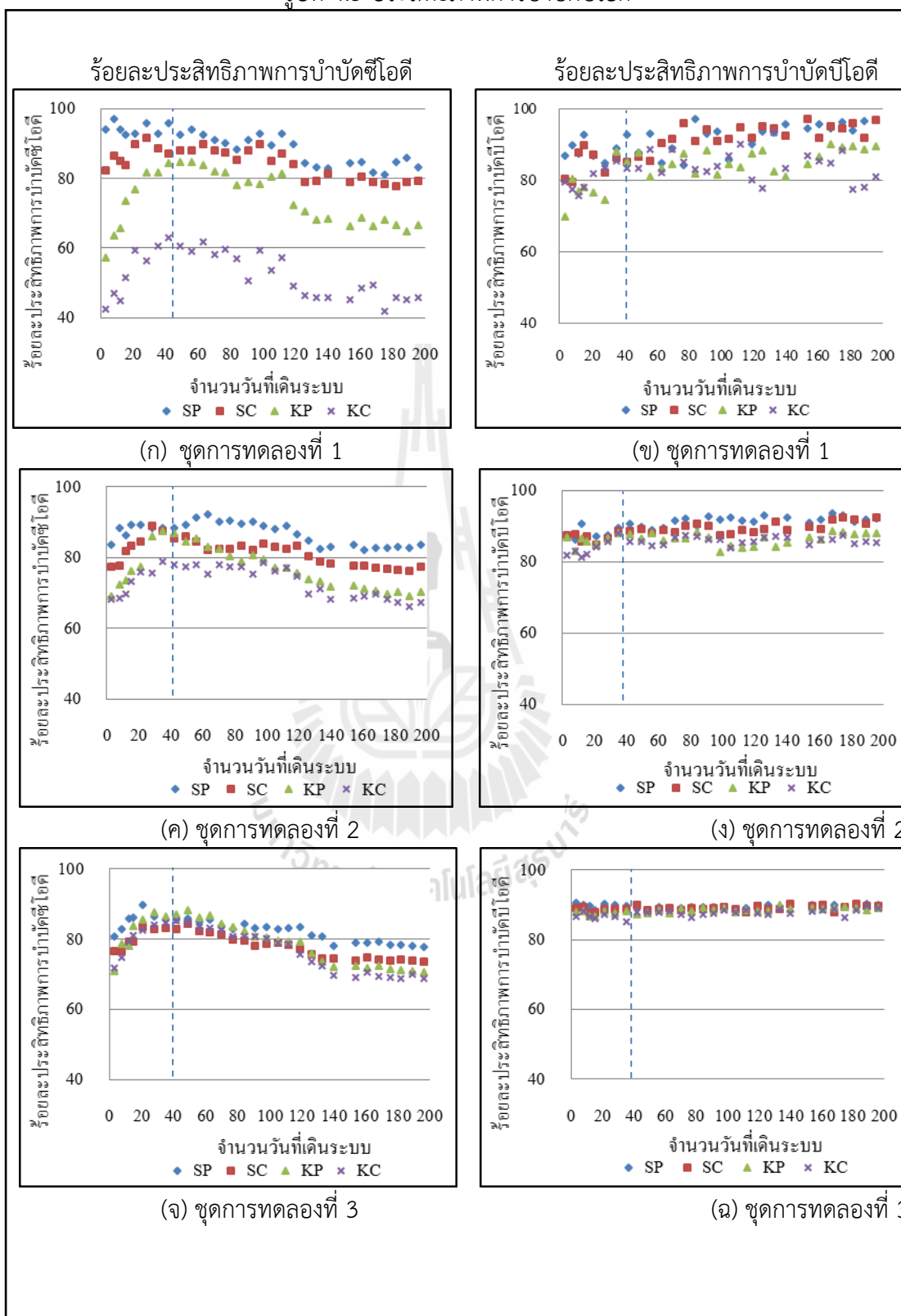
ชุดการทดลอง	เชื้อ	ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการบำบัด mean \pm S.D.	บีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการบำบัด mean \pm S.D.
		น้ำเข้า Min – Max	น้ำออก Min – Max		น้ำเข้า Min – Max	น้ำออก Min – Max	
ชุดการทดลองที่ 1	SP	211.20 – 230.40	9.60 – 41.60	88.04 \pm 4.46	32.40 – 44.20	1.05 – 5.53	92.57 \pm 4.00
	SC		22.24 – 51.20	83.61 \pm 4.38		1.03 – 6.28	92.46 \pm 3.43
	KP		32.00 – 80.00	74.81 \pm 7.44		3.57 – 6.65	85.71 \pm 3.03
	KC		83.20 – 128.00	52.23 \pm 6.72		2.50 – 8.72	84.22 \pm 4.13
ชุดการทดลองที่ 2	SP	412.80 – 457.60	32.00 – 80.00	86.58 \pm 3.50	70.70 – 80.95	5.20 – 8.73	91.43 \pm 1.20
	SC		57.60 – 105.60	80.83 \pm 3.18		5.65 – 9.48	89.65 \pm 1.52
	KP		57.60 – 137.60	76.51 \pm 5.69		8.78 – 12.73	86.35 \pm 1.65
	KC		92.80 – 150.40	73.16 \pm 4.51		9.30 – 12.10	85.91 \pm 1.00
ชุดการทดลองที่ 3	SP	787.20 – 825.60	115.20 – 179.20	81.76 \pm 2.84	136.05 – 148.40	13.28 – 16.20	89.44 \pm 0.47
	SC		128.00 – 211.20	77.59 \pm 3.46		13.70 – 16.83	89.20 \pm 0.64
	KP		96.00 – 236.80	78.21 \pm 6.16		13.75 – 18.28	88.60 \pm 0.67
	KC		121.60 – 249.60	76.21 \pm 6.10		14.40 – 18.68	87.99 \pm 0.78



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติ



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอติและบีโอติ ตลอดระยะเวลา 196 วัน

ไม่ปลูกต้นอ้อ ได้แก่ เซ้ท SC และ เซ้ท KC ผลการศึกษาที่ได้เช่นเดียวกับงานของ Mbuligwe (2005) ที่พบว่า พีชที่ปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีส่วนช่วยในการบำบัดสารอินทรีย์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสูงกว่าชุดที่ไม่มีการปลูกพีชถึงร้อยละ 17.5 – 21.7 และสอดคล้องกับการศึกษาของ ศิริพรรณ คำแน่น (2555) พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางต่ออนุกรมด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางที่ปลูกต้นอ้อบำบัดน้ำทิ้งฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ไม่มีการปลูกต้นอ้อร้อยละ 3.96 เนื่องจากพีชมีกลไกการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึม นอกจากนี้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพีชมีส่วนช่วยเพิ่มค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ ส่งผลดีต่อการบำบัดสารอินทรีย์อีกด้วย (Banat, Al-Asheh and Al-Makhadmed, 2003) แต่เมื่อเดินระบบผ่านไปเป็นระยะเวลาาน การสะสมของสารอินทรีย์และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เกาะบริเวณรากพีชและที่ผิวตัวกลางจะมีผลให้ช่องว่างของตัวกลางลดลง ส่งผลให้เกิดการอุดตันในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ลดลง

4.5.1.2 ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ทางสถิติ

จากผลวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและบีโอดีของทั้ง 3 ชุดการทดลอง นำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (One Way ANOVA) พบว่า เซ้ท SP ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อของทั้ง 3 ชุดการทดลอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดีสูงกว่าเซ้ท SC, เซ้ท KP และเซ้ท KC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และเมื่อนำค่าประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดีของเซ้ท SP ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยเซ้ท SP ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อของชุดการทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูงกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ ชุดการทดลองที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้วยกลไกกำจัดสารอินทรีย์ภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ การกรอง การตกตะกอน และนำไปใช้โดยพีช และภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะต้องมีอัตราที่เหมาะสมกับความสามารถของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ (Davies et al., 2005) แต่เมื่อเดินระบบผ่านไปเป็นระยะเวลาาน จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบจะมีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมชั้นของจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งการเจริญเติบโตของชั้นจุลินทรีย์ในระบบมีผลทำให้เกิดการสกัดกั้นการผ่านของอนุภาคในน้ำเสียภายในช่องว่างของตัวกลางก่อให้เกิดการอุดตันขึ้นในระบบ (Chris, James and Martin, 1998) มีผลให้อายุการใช้งานของระบบสั้นลง

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี และบีไอดีของแต่ละชุดการทดลอง

เซ็ท	เซ็ท	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (ซีไอดี)						ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (บีไอดี)					
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3	
		Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
KC	KP	0.000	แตกต่าง	0.058	ไม่แตกต่าง	0.529	ไม่แตกต่าง	0.533	ไม่แตกต่าง	0.700	ไม่แตกต่าง	0.013	แตกต่าง
	SC	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.783	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SP	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.002	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
KP	KC	0.000	แตกต่าง	0.058	ไม่แตกต่าง	0.529	ไม่แตกต่าง	0.533	ไม่แตกต่าง	0.700	ไม่แตกต่าง	0.013	แตกต่าง
	SC	0.000	แตกต่าง	0.007	แตกต่าง	0.975	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.015	แตกต่าง
	SP	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.082	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
SC	KC	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.783	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	KP	0.000	แตกต่าง	0.007	แตกต่าง	0.975	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.015	แตกต่าง
	SP	0.069	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.029	แตกต่าง	1.000	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.625	ไม่แตกต่าง
SP	KC	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.002	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	KP	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.082	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SC	0.069	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.029	แตกต่าง	1.000	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.625	ไม่แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 22 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และบีโอดี ระหว่างเซ็ปต์ที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ชุดการทดลอง	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (ซีโอดี)		ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (บีโอดี)	
		Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
ชุด 1	ชุด 2	0.387	ไม่แตกต่าง	0.271	ไม่แตกต่าง
	ชุด 3	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
ชุด 2	ชุด 1	0.387	ไม่แตกต่าง	0.271	ไม่แตกต่าง
	ชุด 3	0.000	แตกต่าง	0.022	แตกต่าง
ชุด 3	ชุด 1	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	ชุด 2	0.000	แตกต่าง	0.022	แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 22 ตัวอย่าง

4.5.1.3 สรุปผลการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และบีโอดี

จากผลการศึกษาระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลาง แนวตั้งเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและบีโอดีของน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมพอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เซ็ปต์ที่มีตัวกลางดินดานมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและบีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 77.59 – 88.04 และ 89.20 – 92.57 ตามลำดับ สูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและบีโอดีสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการปลูกต้นอ้อ

2. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและ บีโอดีของทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อ (SP) ของชุดการทดลองที่ 1 ที่อัตราการบำบัดสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 430.95 – 470.13 กิโลกรัมซีโอดี/เฮกแตร์.วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและบีโอดีสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. อัตราการบำบัดสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.5.2 การบำบัดสีย้อม

4.5.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

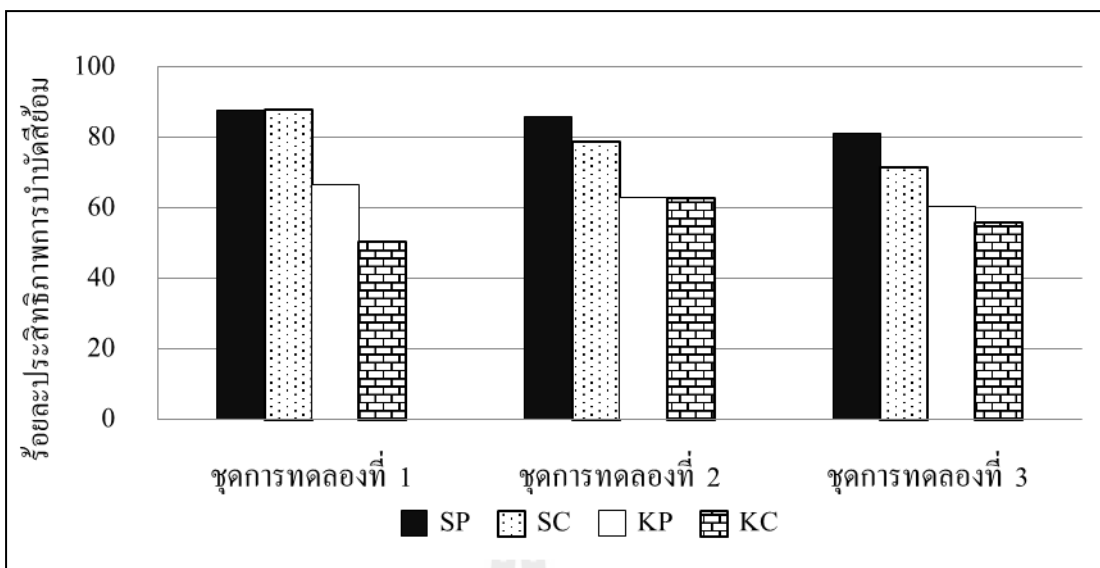
ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเดินระบบ 196 วัน ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยน้ำเข้าระบบมีความเข้มข้นสีย้อมอยู่ในช่วง 133.57 – 152.62, 279.29 – 358.81 และ 557.38 – 634.05 Pt-Co ตามลำดับ หลังจากน้ำทิ้งผ่านระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ณ สถานะคงตัวตั้งแต่วันที่ 84 นำมา

คำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกัน คือ มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, เซ้ท SC, เซ้ท KP และ เซ้ท KC ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเท่ากับร้อยละ 87.93, 87.93, 66.68 และ 50.66 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเท่ากับร้อยละ 85.91, 78.98, 62.94 และ 62.88 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และชุดการทดลองที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเท่ากับร้อยละ 81.40, 71.49, 60.62 และ 55.85 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของทั้ง 3 ชุดการทดลอง ตลอดระยะเวลา 196 วัน มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นของการเดินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) - (ค)

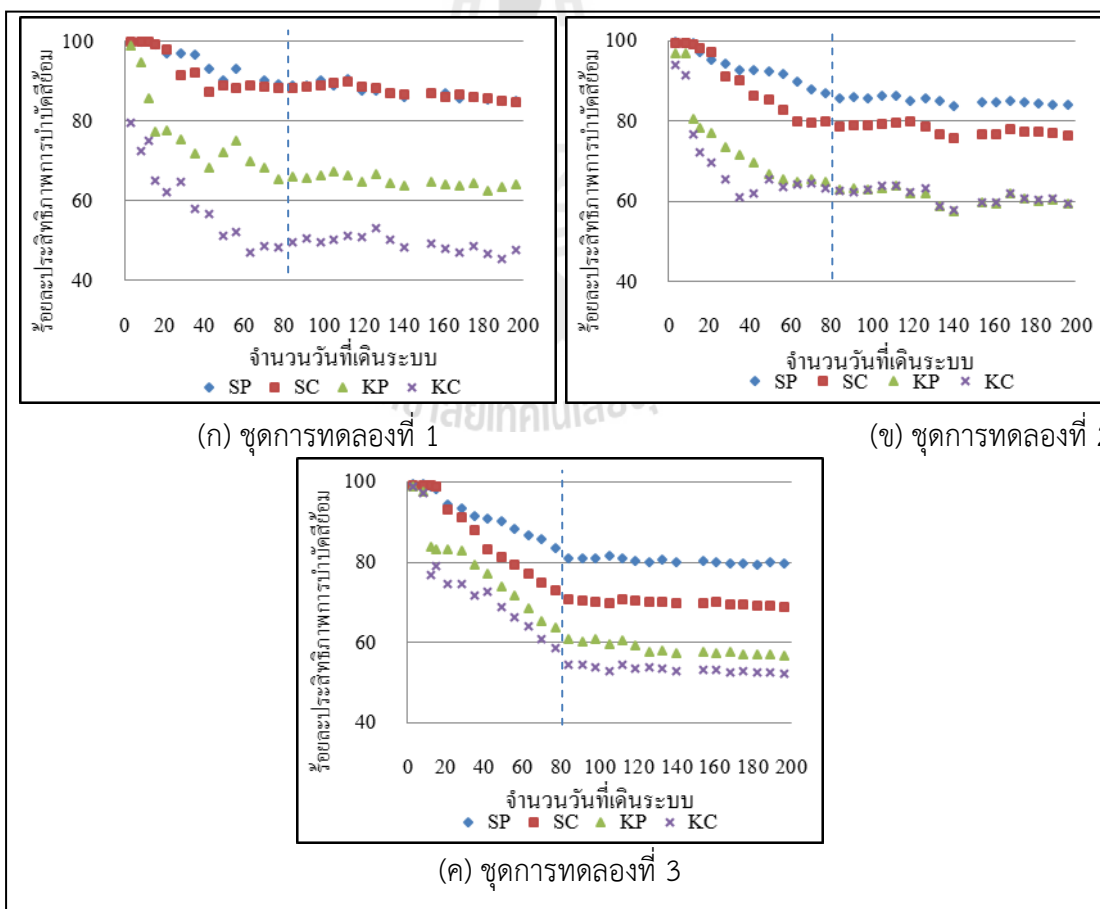
จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดาน มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย เนื่องจากตัวกลางของระบบซึ่งจะมีส่วนช่วยในกลไกการกรอง การตกตะกอน และการดูดซับสีย้อม และองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน มีสารโลหะออกไซด์ ได้แก่ SiO_2 , AlO_3 , CaO และ Fe_2O_3 ซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับสีย้อมโดยโลหะออกไซด์ที่ผิวหน้าของหินดินดานเมื่ออยู่ในสารละลายสีย้อมในสภาวะกรด ที่ผิวหน้าของสารดูดซับจะถูกเติมโปรตอนด้วยไฮโดรเจนไอออนที่ผิวหน้าของหินดินดาน จึงแสดงประจุบวก ทำให้หินดินดานมีความสามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมที่มีประจุลบได้ (Ozacar and Sengil, 2003) และมีการศึกษาจำนวนมากพบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อม เช่น การศึกษาของ Al-Qodah (2000) ได้นำเถ้าของหินดินดานมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ พบว่าเถ้าของหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมอยู่ในช่วง 100 – 160 มิลลิกรัมสีย้อมต่อกรัมตัวดูดซับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ สายรุ่ง นพขุนทด (2554) พบว่า หินดินดานขนาด 0.15 – 2.00 มิลลิเมตร สามารถดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟชนิด Blue ซึ่งเป็นสีย้อมในกลุ่มเอโซได้สูงโดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 0.4479 – 1.1409 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาของ ศิริพรรณ คำแน่น (2555) นำหินดินดานเป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางต่ออนุกรมกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลาง เพื่อบำบัดน้ำทิ้งฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 98.61 กลไกการกำจัดสีย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการกำจัดโดยหินดินดาน 0.071

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

ชุดการทดลอง	เชื้อ	สีย้อม (Pt-Co)		ร้อยละการบำบัด mean \pm S.D.
		น้ำเข้า Min – Max	น้ำออก Min – Max	
ชุดการทดลองที่ 1	SP	141.67 – 151.19	14.05 – 22.14	87.93 \pm 3.45
	SC		15.00 – 22.62	87.93 \pm 3.39
	KP		48.81 – 53.57	66.68 \pm 8.21
	KC		70.71 – 77.86	50.66 \pm 7.48
ชุดการทดลองที่ 2	SP	314.52 – 352.62	47.38 – 54.05	85.91 \pm 3.59
	SC		68.33 – 79.29	78.98 \pm 5.32
	KP		125.95 – 136.90	62.94 \pm 8.71
	KC		125.48 – 136.90	62.88 \pm 8.06
ชุดการทดลองที่ 3	SP	616.43 – 626.90	113.57 – 127.38	81.40 \pm 4.60
	SC		181.19 – 193.57	71.49 \pm 6.95
	KP		242.14 – 270.24	60.62 \pm 9.68
	KC		281.67 – 297.38	55.85 \pm 10.75



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดเสีย



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดเสีย ตลอดระยะเวลา 196 วัน

กรัมต่อวัน รองลงมา คือ พีชและกลไกอื่น ๆ 0.001 กรัมต่อวัน และสอดคล้องกับผลการศึกษาค้างนี้ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเซตที่มีการปลูกต้นอ้อ SP และ KP มีประสิทธิภาพการบำบัด สีย้อมสูงกว่าเซตควบคุมที่ไม่ปลูกต้นอ้อ SC และ KC และสอดคล้องกับการศึกษาของ Davies et al. (2009) ทำการปลูกต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัดสีย้อมเอโซเซอิด พบว่าต้นอ้อมี เอนไซม์ที่ต้านอนุมูลอิสระ จึงทำให้ต้นอ้อสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำเสียฟอกย้อมได้ และมีเอนไซม์ POD ในต้นอ้อมีความสามารถในการกำจัดอะโรมาติกเอมีน ฟีนอลและซัลโฟเนส ที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเอโซ จึงสามารถบำบัดสีย้อมได้ (Azevedo et al., 2003; Veitch, 2004)

4.5.2.2 ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมทางสถิติ

จากผลวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 เมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า เซต SP ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อของแต่ละชุดการทดลอง มีประสิทธิภาพในการบำบัด สีย้อมสูงกว่าเซต SC, เซต KP และเซต KC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และเมื่อนำค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของเซต SP ทั้ง 3 ชุด การทดลอง ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า เซต SP ของชุดการ ทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อสามารถบำบัดสีย้อมได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นของสีย้อม ในน้ำเข้าอยู่ในช่วง 133.57 – 152.62 Pt-Co (ชุดการทดลองที่ 1) เนื่องจากตัวกลางหินดินดานมี องค์ประกอบทางเคมีเป็นสารโลหะออกไซด์ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Fe_2O_3 เป็นต้น (เสวีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; อมรา ดาวโรสง, 2550; Martin Marietta Material, 2004) ซึ่งโลหะออกไซด์ ที่ผิวหน้าของหินดินดานเมื่ออยู่ในสารละลายสีย้อม ที่ผิวหน้าของหินดินดานจะถูกเติมด้วยไฮโดรเจน ไอออน (H^+) ทำให้ผิวหน้าของหินดินดานแสดงประจุบวกมีผลให้หินดินดานสามารถดูดซับโมเลกุลของ สีย้อมที่เป็นประจุลบได้ (สายรุ้ง นพขุนทด, 2554)

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของแต่ละชุดการทดลอง

เซ็ท	เซ็ท	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (สีย้อม)					
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3	
		Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
KC	KP	0.000	แตกต่าง	0.998	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SC	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SP	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
KP	KC	0.000	แตกต่าง	0.998	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SC	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SP	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
SC	KC	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	KP	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SP	1.000	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
SP	KC	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	KP	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SC	1.000	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 16 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมระหว่างเซตที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ชุดการทดลอง	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (สีย้อม)	
		Sig.	ผลการทดสอบ
ชุด 1	ชุด 2	0.000	แตกต่าง
	ชุด 3	0.000	แตกต่าง
ชุด 2	ชุด 1	0.000	แตกต่าง
	ชุด 3	0.000	แตกต่าง
ชุด 3	ชุด 1	0.000	แตกต่าง
	ชุด 2	0.000	แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 16 ตัวอย่าง

4.5.2.3 สรุปผลการบำบัดสีย้อม

จากผลการศึกษาระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง แนวตั้งเพื่อบำบัดสีย้อม ของน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมพอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เซตตัวกลางดินดาน (เซต SP และ เซต SC) มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงกว่าเซตตัวกลางกรวดผสมทราย (เซต KP และ เซต KC) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการปลูกต้นอ้อ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่า เซต SP ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อของชุดการทดลองที่ 1 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเท่ากับ 133.57 – 152.62 Pt-Co มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.5.3 การบำบัดของแข็ง

4.5.3.1 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็ง

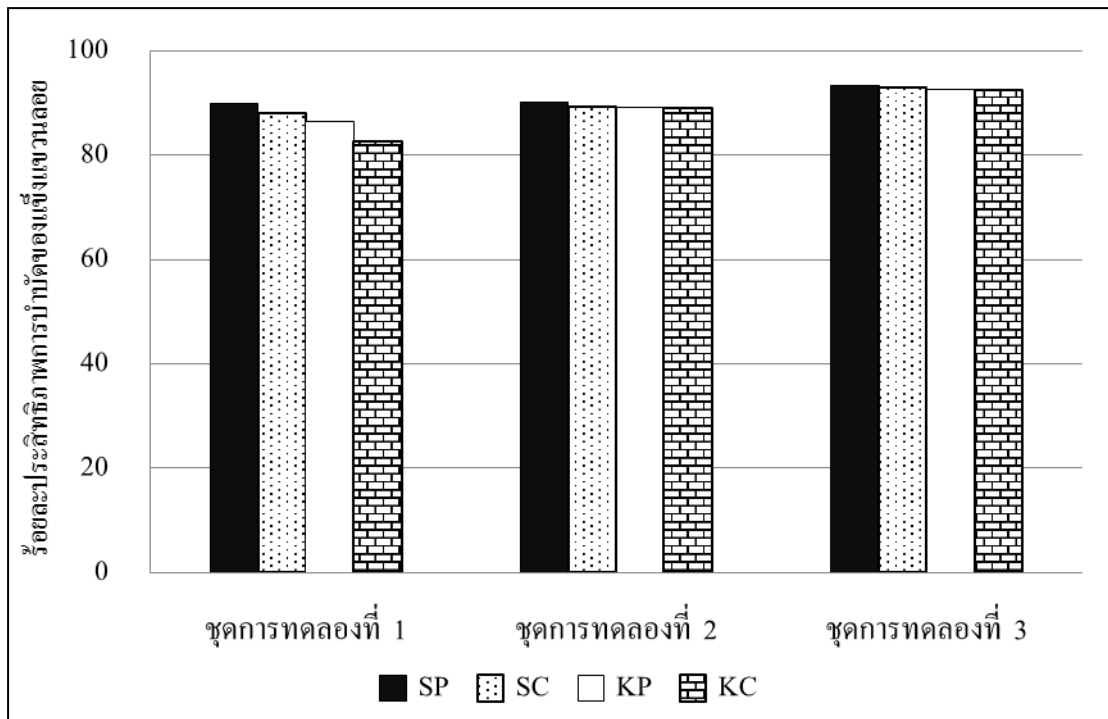
ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเดินระบบ 196 วัน ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.11 น้ำเข้าระบบมีค่าของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 437.50 – 512.50, 810.00 – 907.50 และ 1,190.00 – 1,250.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 90.00 – 135.00, 175.00 – 220.00 และ 307.50 – 337.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่าของแข็งละลายน้ำอยู่ในช่วง 342.50 – 410.00, 622.50 – 715.00 และ 862.50 – 927.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์น้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของทั้ง 3 ชุดการทดลอง ณ สถานะคงตัวตั้งแต่วันที่ 84 นำมาคำนวณ

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำ พบว่า ชุดการทดลอง ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, เซ้ท SC, เซ้ท KP และ เซ้ท KC ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 89.93, 88.01, 86.54 และ 82.54 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 90.22, 89.25, 89.24 และ 88.94 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และชุดการทดลองที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 93.27, 92.88, 92.68 และ 92.53 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของแต่ละชุดการทดลอง ตลอดระยะเวลา 196 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) - (ค) และเมื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำของทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่าชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีแนวโน้มเหมือนกัน คือ มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, เซ้ท SC, เซ้ท KP และ เซ้ท KC ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำเท่ากับร้อยละ 81.11, 80.35, 65.30 และ 56.93 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำเท่ากับร้อยละ 54.57, 53.01, 52.14 และ 45.75 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และชุดการทดลองที่ 3 มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, เซ้ท SC, เซ้ท KC และ เซ้ท KP ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำเท่ากับร้อยละ 47.15, 42.12, 37.90 และ 38.08 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำของแต่ละชุดการทดลอง ตลอดระยะเวลา 196 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ง) - (ฉ)

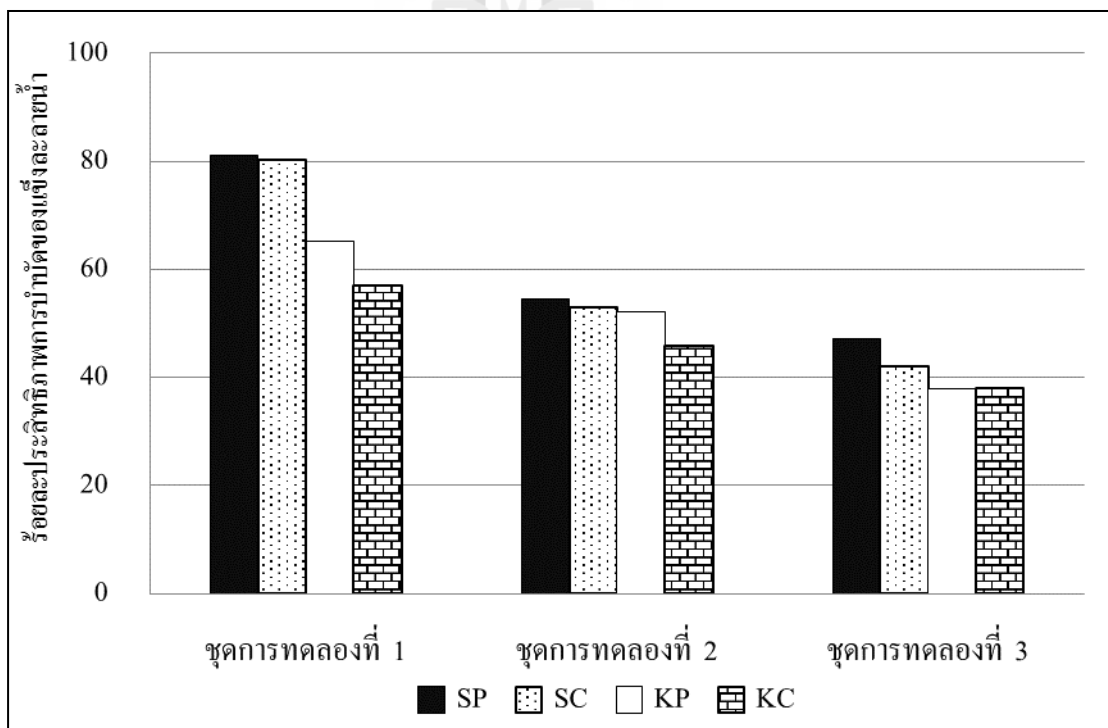
จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานมีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย กลไกในการกำจัดของแข็งในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ กระบวนการตกตะกอน การกรอง การเกาะติดของจุลินทรีย์ เป็นต้น (U.S. EPA, 2000) ซึ่งกระบวนการดังกล่าว ตัวกลางและพืชภายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีส่วนช่วยในกระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าวของแข็งเหล่านี้จะสะสมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางด้วยกลไกการนำ (Transport) และการยึดติด (Attachment) กับตัวกลางหรือพืชภายในระบบ (Yao, Habibian and O'Melia, 1971) หินดินดานที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ มีลักษณะเนื้อหินละเอียดมาก จึงทำให้มีความสามารถในการกรองสารแขวนลอยในน้ำเสียได้ดี และพืชที่ปลูกในระบบยังมีส่วนช่วยในการกรองอนุภาคในน้ำเสียได้ด้วย เนื่องจากพืชจะมีระบบรากซึ่งจะดักจับอนุภาคและของแข็งแขวนลอยไว้ในชั้นตัวกลาง สอดคล้องกับผลการศึกษาคั้งนี้ซึ่งพบว่าเซ้ทที่ปลูกต้นอ้อ (SP และ KP) มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งสูงกว่าเซ้ทที่ไม่ปลูกต้นอ้อ (SC และ KC) จากการศึกษาาระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งเพื่อบำบัดของแข็งของน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส ตัวกลางในระบบจำลอง

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำ

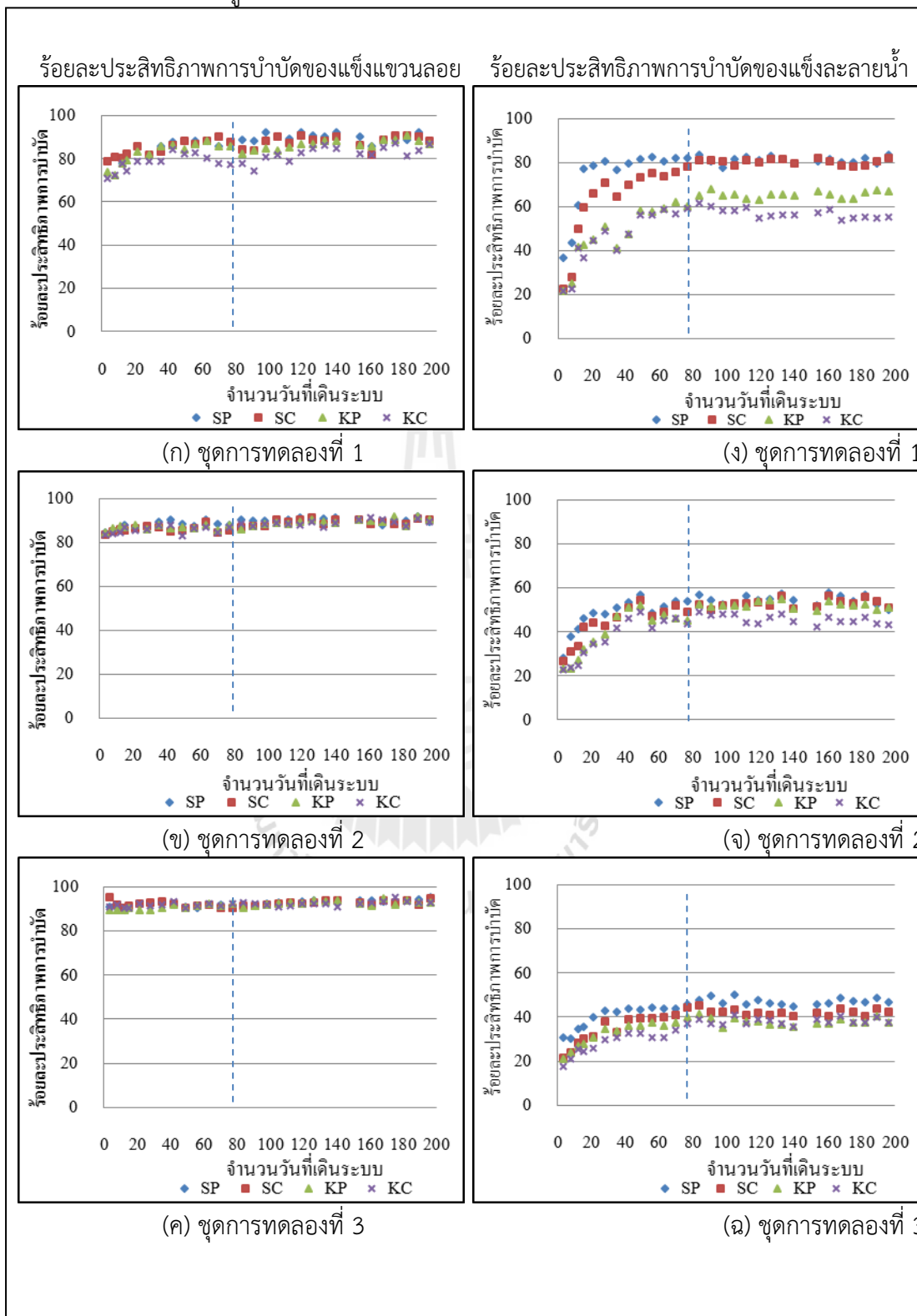
ชุดการทดลอง	เซ็ท	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการบำบัด mean \pm S.D.	ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการบำบัด mean \pm S.D.
		น้ำเข้า Min – Max	น้ำออก Min – Max		น้ำเข้า Min – Max	น้ำออก Min – Max	
ชุดการทดลองที่ 1	SP	107.50 – 135.00	10.00 – 17.50	89.93 \pm 1.82	362.50 – 395.00	62.50 – 85.00	81.11 \pm 1.59
	SC		12.50 – 22.50	88.01 \pm 2.72		67.50 – 80.00	80.35 \pm 1.27
	KP		12.50 – 20.00	86.54 \pm 2.25		122.50 \pm 141.25	65.30 \pm 1.38
	KC		17.50 – 27.50	82.54 \pm 3.45		152.50 \pm 172.50	56.93 \pm 2.23
ชุดการทดลองที่ 2	SP	192.50 – 220.00	17.50 – 25.00	90.22 \pm 1.02	622.50 – 695.00	287.50 \pm 315.00	54.57 \pm 2.30
	SC		17.50 – 27.50	89.25 \pm 1.34		295.00 \pm 322.50	53.01 \pm 1.97
	KP		17.50 – 30.00	89.24 \pm 1.57		302.50 \pm 322.50	52.14 \pm 1.47
	KC		17.50 – 27.50	88.94 \pm 1.23		337.50 \pm 370.00	45.75 \pm 2.01
ชุดการทดลองที่ 3	SP	315.00 – 337.50	15.00 – 27.50	93.27 \pm 0.94	862.50 – 927.50	457.50 \pm 477.50	47.15 \pm 1.53
	SC		17.50 – 27.50	92.88 \pm 0.99		500.00 \pm 527.50	42.12 \pm 1.42
	KP		17.50 – 30.00	92.68 \pm 1.12		535.00 \pm 570.00	37.90 \pm 1.71
	KC		15.00 – 30.00	92.53 \pm 1.06		540.00 \pm 570.00	38.08 \pm 1.46



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแวนลอย



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำ



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำ ตลอดระยะเวลา 196 วัน

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีส่วนช่วยดักจับของแข็งแขวนลอยไว้ในชั้นตัวกลาง และช่วยกรองของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กขณะผ่านชั้นของตัวกลาง จะสามารถป้องกันการปนเปื้อนของของแข็งแขวนลอยออกนอกระบบ (Kadlec and Knight, 2006) และตัวกลางภายในระบบยังก่อให้เกิดการสะสมของอนุภาค เนื่องจากอนุภาคในน้ำเสียจะติดที่ผิวหน้าของตัวกลาง และอนุภาคขนาดเล็กจะติดอยู่ในช่องว่างรูพรุนของตัวกลาง มีผลทำให้อัตราการกรอง และอัตราการซึมผ่านลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งและมีผลทำให้ระบบเกิดการอุดตันได้เร็วยิ่งขึ้น(Hua et al., 2010)

4.5.3.2 ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทางสถิติ

จากผลวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการบำบัดของแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 เมื่อนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า เซ้ท SP ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยสูงกว่าเซ้ท SC, เซ้ท KP และเซ้ท KC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.12 เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของเซ้ท SP ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า เซ้ท SP ของชุดการทดลองที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 93.27 เนื่องมาจากชุดการทดลองที่ 3 มีอัตราการระบรทุกสารเข้าสู่ระบบสูงที่สุด จึงทำให้มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงและเกิดการสะสมในระบบ มีผลต่อการอุดตันของตัวกลางในระบบ และเมื่อทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าเซ้ท SP ของทั้ง 3 ชุดการทดลอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งละลายน้ำสูงกว่าเซ้ท SC, เซ้ท KP และเซ้ท KC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.12 เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำเซ้ท SP ของทั้ง 3 ชุดการทดลอง ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติ พบว่า เซ้ท SP ของทั้ง 3 ชุดการทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า เซ้ท SP ของชุดการทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำได้สูงที่สุด ตัวกลางและพืชในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีกลไกการกรองและการตกตะกอน ทำให้เกิดการสะสมของแข็งในระบบมีผลให้ช่องว่างตัวกลางลดลงเนื่องจากอนุภาคจะยึดติดและเรียงตัวซ้อนกัน เป็นการทำให้เกิดการสกัดกั้นอนุภาคอื่นๆ ไม่ให้ผ่านชั้นตัวกลาง (Hubbe, Chen and Heitmann, 2009) มีผลต่อการอุดตันของตัวกลางและทำให้อายุการใช้งานของระบบสั้นลง

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำของแต่ละชุดการทดลอง

เซ้ท	เซ้ท	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (ของแข็งแขวนลอย)						ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (ของแข็งละลายน้ำ)					
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3	
		Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
KC	KP	0.000	แตกต่าง	0.910	ไม่แตกต่าง	0.977	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.987	ไม่แตกต่าง
	SC	0.000	แตกต่าง	0.906	ไม่แตกต่าง	0.781	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SP	0.000	แตกต่าง	0.036	แตกต่าง	0.191	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
KP	KC	0.000	แตกต่าง	0.910	ไม่แตกต่าง	0.977	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.987	ไม่แตกต่าง
	SC	0.399	ไม่แตกต่าง	1.000	ไม่แตกต่าง	0.949	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.597	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SP	0.003	แตกต่าง	0.161	ไม่แตกต่าง	0.377	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.005	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
SC	KC	0.000	แตกต่าง	0.906	ไม่แตกต่าง	0.781	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	KP	0.300	ไม่แตกต่าง	1.000	ไม่แตกต่าง	0.949	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.597	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SP	0.177	ไม่แตกต่าง	0.165	ไม่แตกต่าง	0.703	ไม่แตกต่าง	0.566	ไม่แตกต่าง	0.122	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
SP	KC	0.000	แตกต่าง	0.036	แตกต่าง	0.191	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	KP	0.003	แตกต่าง	0.161	ไม่แตกต่าง	0.377	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง	0.005	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	SC	0.177	ไม่แตกต่าง	0.165	ไม่แตกต่าง	0.703	ไม่แตกต่าง	0.566	ไม่แตกต่าง	0.122	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 16 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำระหว่างเซตที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง

ชุด	ชุด	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (ของแข็งแขวนลอย)		ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ (ของแข็งละลายน้ำ)	
		Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
ชุด 1	ชุด 2	0.812	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	ชุด 3	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
ชุด 2	ชุด 1	0.812	ไม่แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	ชุด 3	0.000	แตกต่าง	0.002	แตกต่าง
ชุด 3	ชุด 1	0.000	แตกต่าง	0.000	แตกต่าง
	ชุด 2	0.000	แตกต่าง	0.002	แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 16 ตัวอย่าง

4.5.3.3 สรุปผลการบำบัดของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำ

จากผลการศึกษาระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง แนวตั้งเพื่อบำบัดของแข็ง ของน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมพอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เซตตัวกลางดินดานมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งสูงกว่าเซตตัวกลางกรวดผสมทราย และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการปลูกต้นอ้อ
2. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่า เซต SP ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อของชุดการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเซต SP ของชุดการทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.6 การเจริญเติบโตของพืชในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้ง เซตตัวกลางหินดินดานที่ปลูกต้นอ้อ (เซต SP) ประกอบด้วย 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน ได้แก่ คอลัมน์ SPM ต่ออนุกรมกับคอลัมน์ SPO และเซตตัวกลางกรวดผสมทรายที่ปลูกต้นอ้อ (เซต KP) ประกอบด้วย 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน ได้แก่ คอลัมน์ KPM ต่ออนุกรมกับคอลัมน์ KPO โดยเริ่มต้นปลูกต้นอ้อจำนวน 2 ต้นต่อคอลัมน์ มีความสูง 60 เซนติเมตร ลำต้นมีขนาดสมบูรณ์ไม่ปรากฏสภาวะใบซีดเหลือง ทำการวัดการเจริญเติบโตของพืชทุก ๆ 15 วัน ของทั้ง 2 คอลัมน์ เซต SP และ KP ของทุกชุดการทดลอง และ

นำมาหาค่าเฉลี่ย ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตของต้นอ้อในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง ตลอดช่วงระยะเวลาการเดินระบบ 196 วัน สรุปในตารางที่ 4.14 พบว่า เซ็ท SP ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยเส้นรอบวงของต้นอ้อมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2.18 – 2.31 เซนติเมตรต่อต้น มีความสูงของต้นอ้ออยู่ในช่วง 69.2 – 81.6 เซนติเมตรต่อต้น และมีจำนวนต้น 7.8 – 8.8 ต้นต่อคอลัมน์ ต้นอ้อเป็นพืชที่ชอบขึ้นในพื้นที่ชุ่มชื้น สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพน้ำท่วมขังได้ดี รากของต้นอ้อสามารถแผ่ขยายได้ลึกลงไปในดินถึง 0.6 – 1.0 เมตร (Reed et al., 1988) มีความสามารถทนต่อสารพิษ ปรับตัวเข้ากับลักษณะสมบัติน้ำเสียได้ง่าย ดังนั้น ต้นอ้อจึงสามารถเจริญเติบโตได้ในตัวกลางหินดินดานและตัวกลางกรวดผสมทรายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งและบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสได้ดี

ตารางที่ 4.14 การเจริญเติบโตของพืชในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ชุดการทดลอง	คอลัมน์	การเจริญเติบโตของพืชเฉลี่ย		
		เส้นรอบวง (ซม.)	ความสูง (เซนติเมตร)	จำนวน (ต้น)
ชุดการทดลองที่ 1	SPM	2.19	81.6	8.6
	SPO	2.28	76.5	8.5
	KPM	2.18	70.7	8.1
	KPO	2.20	72.6	8.1
ชุดการทดลองที่ 2	SPM	2.21	71.2	7.8
	SPO	2.20	73.7	8.4
	KPM	2.25	70.1	7.7
	KPO	2.26	81.3	8.6
ชุดการทดลองที่ 3	SPM	2.18	69.2	8.5
	SPO	2.31	71.4	8.8
	KPM	2.19	77.8	7.8
	KPO	2.21	88.7	9.3

4.7 การคาดการณ์อายุใช้งานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่านของแต่ละชุดการทดลองระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นำมาใช้ในการคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ รายละเอียดผลการศึกษา มีดังต่อไปนี้

4.7.1 ค่าอัตราการซึมผ่าน

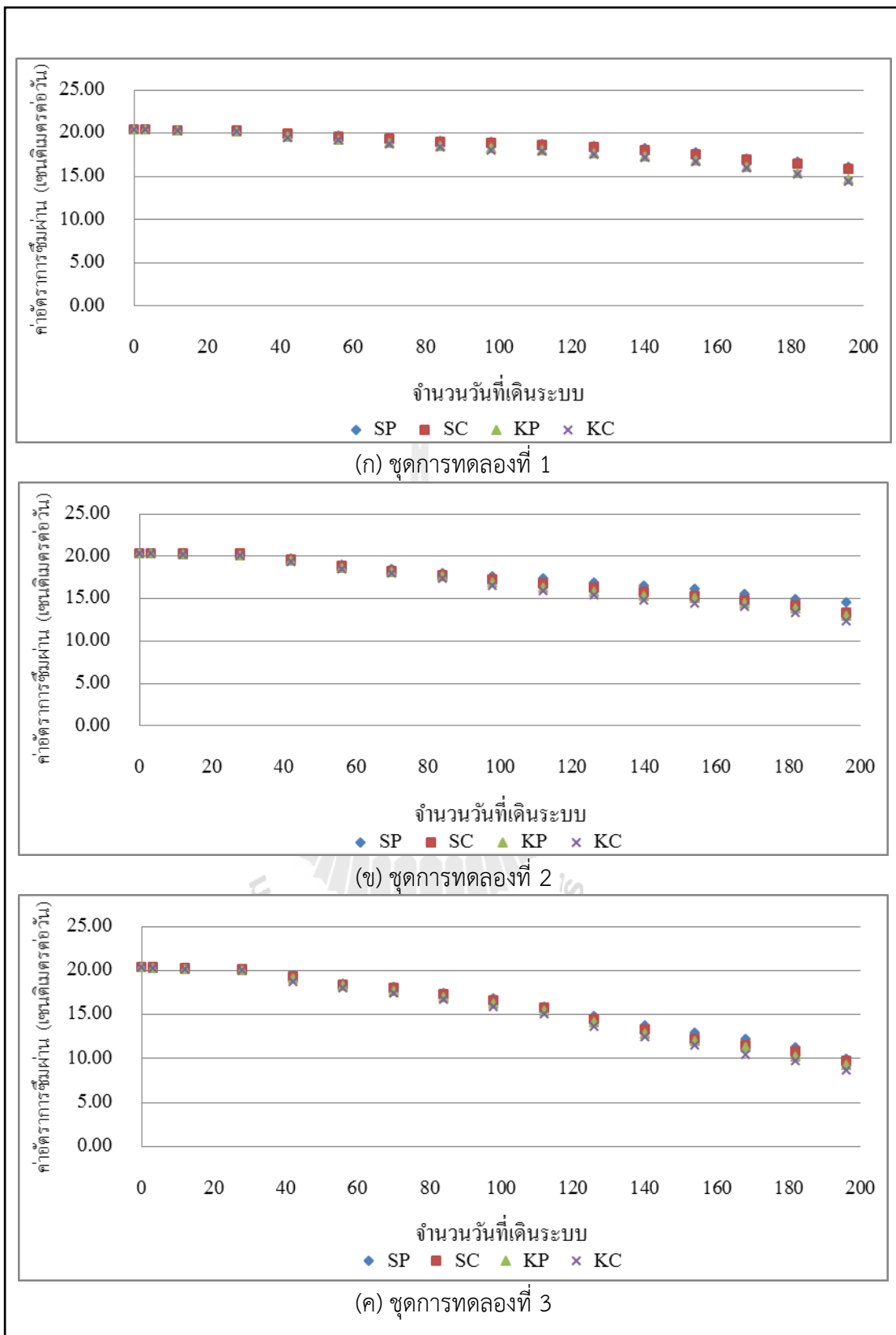
4.7.1.1 เปรียบเทียบค่าอัตราการซึมผ่านของตัวกลางหินดินดานกับตัวกลาง

กรวดผสมทราย

ผลการศึกษาของค่าอัตราการซึมผ่านของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ค่าอัตราการซึมผ่านเริ่มต้นของระบบมีค่า เท่ากับ 20.41 เซนติเมตรต่อวัน ของทุกชุดการทดลอง พบว่าเมื่อเดินระบบค่าอัตราการซึมผ่านของระบบมีค่าลดลงเรื่อย ๆ โดยพบว่า ค่าอัตราการซึมผ่านของทุกชุดการทดลองที่ระยะเวลา 196 วัน มีค่าเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซ้ท SP, SC, KP และ KC ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ 1 มีค่าอัตราการซึมผ่านเท่ากับ 16.15, 15.89, 14.68 และ 14.46 เซนติเมตรต่อวัน ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ 2 มีค่าอัตราการซึมผ่านเท่ากับ 14.55, 13.41, 13.03 และ 12.36 เซนติเมตรต่อวัน ตามลำดับ และชุดการทดลองที่ 3 มีค่าอัตราการซึมผ่านเท่ากับ 10.03, 9.78, 9.30 และ 8.73 เซนติเมตรต่อวัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) - (ค) แสดงให้เห็นแนวโน้มการลดลงของค่าอัตราการซึมผ่านของแต่ละชุดการทดลองตลอดระยะเวลา 196 วัน ค่าอัตราการซึมผ่านของเซ้ทตัวกลางหินดินดาน (เซ้ท SP และ SC) มีอัตราการลดลงน้อยกว่าเซ้ทตัวกลางกรวดผสมทราย (เซ้ท KP และ KC) ทั้ง 3 ชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าตัวกลางหินดินดานมีแนวโน้มการใช้งานได้นานกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย สอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวกลางหินดินดาน เช่น ค่าความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทรายทำให้มีช่องว่างสำหรับการ

ตารางที่ 4.15 ค่าอัตราการซึมผ่านของแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	เซ้ท	ค่าอัตราการซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวัน)		
		เริ่มต้น	ระยะเวลาผ่านไป 98 วัน	ระยะเวลาผ่านไป 196 วัน
ชุดการทดลองที่ 1	SP	20.41	18.95	16.15
	SC		18.85	15.89
	KP		18.28	14.68
	KC		18.09	14.46
ชุดการทดลองที่ 2	SP	20.41	17.71	14.55
	SC		17.29	13.41
	KP		16.91	13.03
	KC		16.59	12.36
ชุดการทดลองที่ 3	SP	20.41	16.88	10.03
	SC		16.66	9.78
	KP		16.27	9.30
	KC		15.92	8.73



รูปที่ 4.10 ค่าอัตราการซึมผ่าน ตลอดระยะเวลา 196 วัน

ไหลของน้ำเสียและอนุภาคต่าง ๆ ในน้ำทิ้งที่ผ่านจากระบบเอเอสมากกว่า Hubbe et al. (2009) พบว่าช่องว่างรูพรุนของตัวกลางทำหน้าที่ในการดูดติดและสกัดกั้นอนุภาคไม่ให้ผ่านตัวกลางมีผลทำให้ อัตราการกรองและอัตราการซึมผ่านของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดปัญหาการอุดตันภายในระบบ ขึ้น ทำให้น้ำเสียซึ่งอยู่บนผิวหน้าของระบบ จนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหรือแทบไม่เกิดการบำบัด ทำให้อายุการใช้งานของตัวกลางในระบบสั้นลง เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการซึมผ่านระหว่างเซ็ทที่ปลูกพืช (SP และ KP) กับเซ็ทที่ไม่ปลูกพืช (SC และ KC) ทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่า เซ็ทที่ปลูกพืชมีอัตราการลดลงน้อยกว่าเซ็ทที่ไม่ปลูกพืช เนื่องจากรากพืชจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของระบบ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Fisher (1990) สังเกตการเจริญเติบโตของต้นอ้อในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวนอนในการบำบัดน้ำเสีย พบว่ารากของพืชจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของตัวกลางและเหง้าของพืชมีส่วนช่วยขยายช่องว่างของตัวกลาง แสดงให้เห็นว่าพืชในระบบมีส่วนช่วยในการไหลของน้ำ เป็นการลดการอุดตันที่จะเกิดขึ้นภายในระบบ และลมยังมีส่วนช่วยให้ลำต้นและรากของพืชบริเวณชั้นผิวหน้าตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดช่องว่างสำหรับการไหลของน้ำอีกด้วย แต่ทั้งนี้ลมจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มช่องว่างของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบบ่อได้ดีกว่าแบบคอลัมน์ (Brix, 1997) นอกจากนี้มีงานวิจัยพบว่า ต้นอ้อมีการคายน้ำเฉลี่ย 11,749 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกแตร์.ปี หรือคิดเป็น 3.2 ลิตรต่อตารางเมตร.วัน (Ryan E. Rapp, 2012) เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่าต้นอ้อมีการคายน้ำเฉลี่ย 0.1 ลิตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 1.56 ของน้ำที่เข้าสู่ระบบ และพบว่าอัตราการคายระเหยน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีปริมาณน้อยมากคิดเป็นร้อยละ 1.73 สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศศิวิมล สุดแสน (2554) พบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีการคายระเหยน้ำคิดเป็นร้อยละ 0.85 – 1.61 จะเห็นได้ว่าอัตราการคายน้ำของพืชที่ปลูกในระบบและอัตราการคายระเหยน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีปริมาณน้อยมาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่าน นำข้อมูลไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของเซ็ทการทดลอง (เซ็ท SP, เซ็ท SC, เซ็ท KP และเซ็ท KC) ของแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.16 เมื่อพิจารณาค่าอัตราการซึมผ่านเมื่อระยะเวลาผ่านไป 196 วันของทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่า เซ็ท SP มีค่าอัตราการซึมผ่านสูงกว่าเซ็ท SC, เซ็ท KP และเซ็ท KC ตามลำดับ และเมื่อนำค่าอัตราการซึมผ่านเซ็ท SP ของทั้ง 3 ชุดการทดลองนำไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.17 พบว่าเซ็ท SP ของชุดการทดลองที่ 1 มีแนวโน้มอายุการใช้งานนานกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องมาจากชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มีอัตราการระบรทุกสารเข้าสู่ระบบสูงกว่าชุดการทดลองที่ 1 จึงมีความเข้มข้นและองค์ประกอบของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบสูงกว่า มีผลทำให้เกิดการอุดตันภายในระบบได้เร็วขึ้น เนื่องจากอนุภาคในน้ำเสียจะถูกสะสมในระบบมากขึ้น ทำให้อัตราการซึมผ่านลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดการอุดตันในระบบได้เร็วขึ้นและทำให้อายุการใช้งานระบบได้ไม่ยาวนาน ดังนั้น จะเห็นได้ว่าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เซ็ท SP ซึ่งใช้หินดินดานเป็นตัวกลางและปลูกต้นอ้อของชุดการทดลองที่ 1 ที่มีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์น้อยที่สุดคาดการณ์ว่าจะมีอายุการใช้งานของตัวกลางในระบบนานกว่าเซ็ทอื่น ๆ

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าอัตราการซึมผ่านของแต่ละชุดการทดลอง

เซ็ท	เซ็ท	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ					
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3	
		Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ	Sig.	ผลการทดสอบ
KC	KP	0.998	ไม่แตกต่าง	0.991	ไม่แตกต่าง	0.996	ไม่แตกต่าง
	SC	0.706	ไม่แตกต่าง	0.931	ไม่แตกต่าง	0.969	ไม่แตกต่าง
	SP	0.598	ไม่แตกต่าง	0.694	ไม่แตกต่าง	0.925	ไม่แตกต่าง
KP	KC	0.998	ไม่แตกต่าง	0.991	ไม่แตกต่าง	0.996	ไม่แตกต่าง
	SC	0.808	ไม่แตกต่าง	0.990	ไม่แตกต่าง	0.996	ไม่แตกต่าง
	SP	0.710	ไม่แตกต่าง	0.855	ไม่แตกต่าง	0.979	ไม่แตกต่าง
SC	KC	0.706	ไม่แตกต่าง	0.931	ไม่แตกต่าง	0.969	ไม่แตกต่าง
	KP	0.808	ไม่แตกต่าง	0.990	ไม่แตกต่าง	0.996	ไม่แตกต่าง
	SP	0.998	ไม่แตกต่าง	0.960	ไม่แตกต่าง	0.998	ไม่แตกต่าง
SP	KC	0.598	ไม่แตกต่าง	0.694	ไม่แตกต่าง	0.925	ไม่แตกต่าง
	KP	0.710	ไม่แตกต่าง	0.855	ไม่แตกต่าง	0.979	ไม่แตกต่าง
	SC	0.998	ไม่แตกต่าง	0.960	ไม่แตกต่าง	0.998	ไม่แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 16 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าอัตราการซึมผ่านระหว่างเซตที่ดีที่สุดของแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ชุดการทดลอง	ผลทดสอบความแตกต่างทางสถิติ	
		Sig.	ผลการทดสอบ
ชุด 1	ชุด 2	0.528	ไม่แตกต่าง
	ชุด 3	0.021	แตกต่าง
ชุด 2	ชุด 1	0.528	ไม่แตกต่าง
	ชุด 3	0.214	ไม่แตกต่าง
ชุด 3	ชุด 1	0.021	แตกต่าง
	ชุด 2	0.214	ไม่แตกต่าง

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 16 ตัวอย่าง

4.7.1.2 สรุปผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่าน

จากผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่าน ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้ง เพื่อบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีเซตตัวกลางดินดานมีค่าอัตราการซึมผ่านสูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลูกต้นอ้อมีค่าอัตราการซึมผ่านสูงกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการปลูกต้นอ้อ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

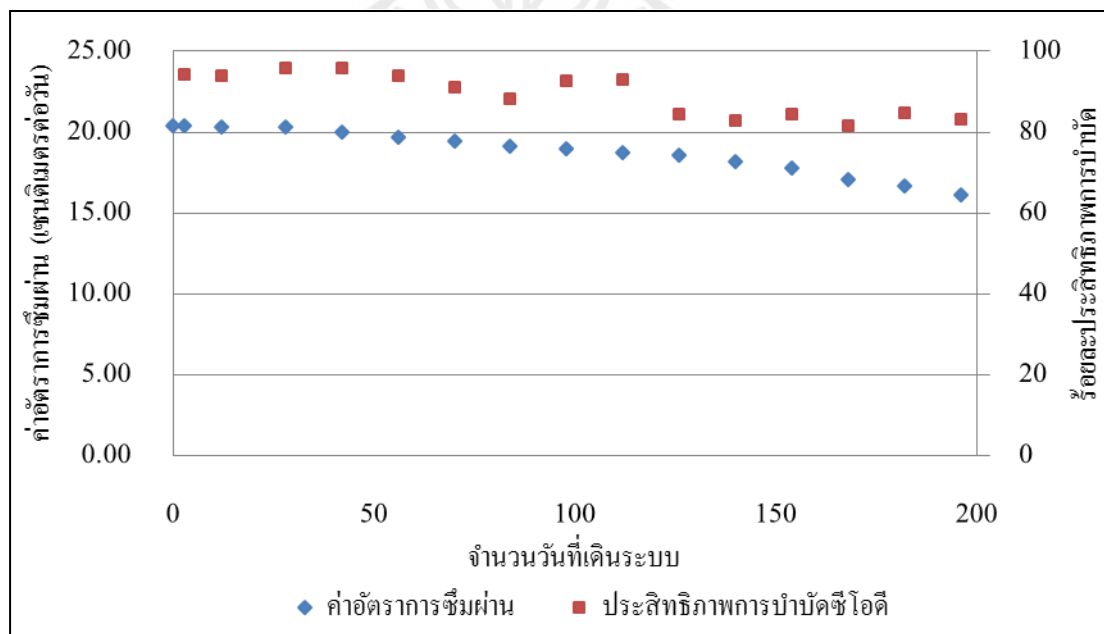
2. เปรียบเทียบค่าอัตราการซึมผ่านทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่าเซต SP ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลูกต้นอ้อของชุดการทดลองที่ 1 มีการลดลงของค่าอัตราการซึมผ่านน้อยกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คาดการณ์ว่าจะมีอายุการใช้งานได้นานกว่าเซตอื่น ๆ

4.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับประสิทธิภาพการบำบัด

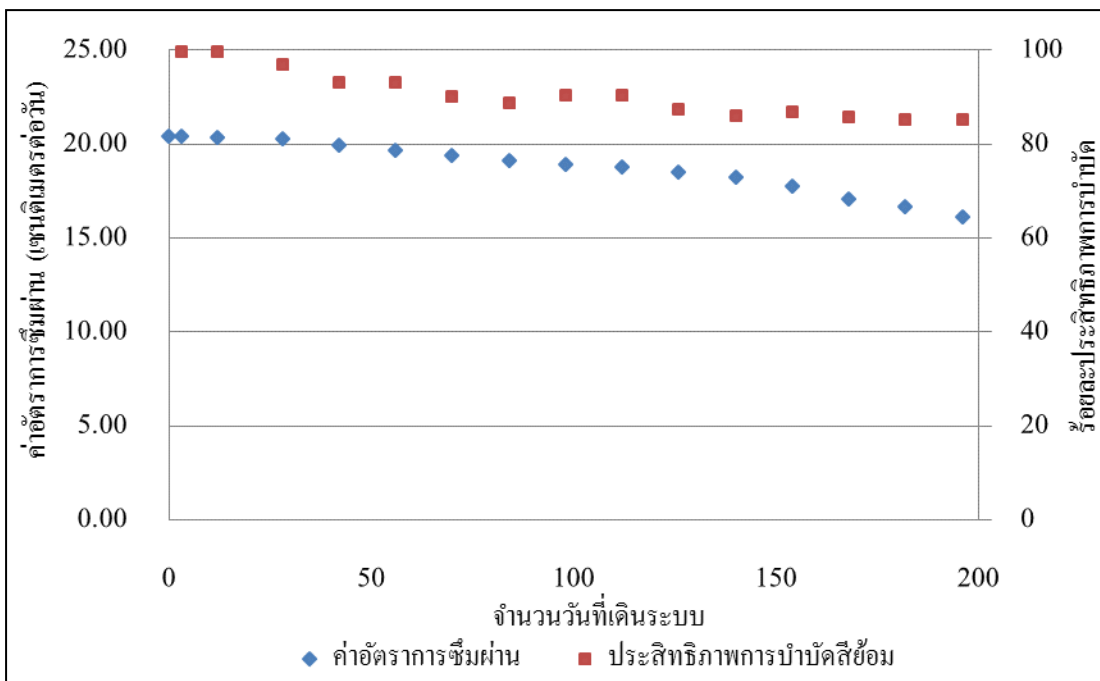
จากผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่านและประสิทธิภาพการบำบัดสารต่าง ๆ พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป 196 วัน ค่าอัตราการซึมผ่านและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และสีย้อมมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 เนื่องจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีกลไกการกรอง การดูดซับ และมีจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ทำให้เกิดชั้นไบโอฟิล์มเคลือบที่ผิวหน้าตัวกลางและเกิดการสะสมของมลสารต่าง ๆ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ภายในระบบ ส่งผลทำให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพการบำบัดและค่าอัตราการซึมผ่าน มีหลายงานวิจัยสรุปว่าการที่ไบโอฟิล์มจะเพิ่มมากขึ้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ป้อนเข้า

สู่ระบบ โดยชั้นไบโอฟิล์มส่งผลทำให้สภาพนำชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity) ลดลง (Ragusa et al., 2004; García et al., 2007; Tietz et al., 2007; Caselles-Osorio and García, 2006) ไบโอฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้นนี้มีส่วนสำคัญในการช่วยดักจับมลสารในน้ำเสีย (Mays and Hunt, 2005) และทำให้ชั้นไบโอฟิล์มเคลือบบนผิวตัวกลางมีชั้นหนามากขึ้น ลดช่องว่างรูพรุนระหว่างชั้นตัวกลาง ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านลดลง (Wallace and Knight, 2006)

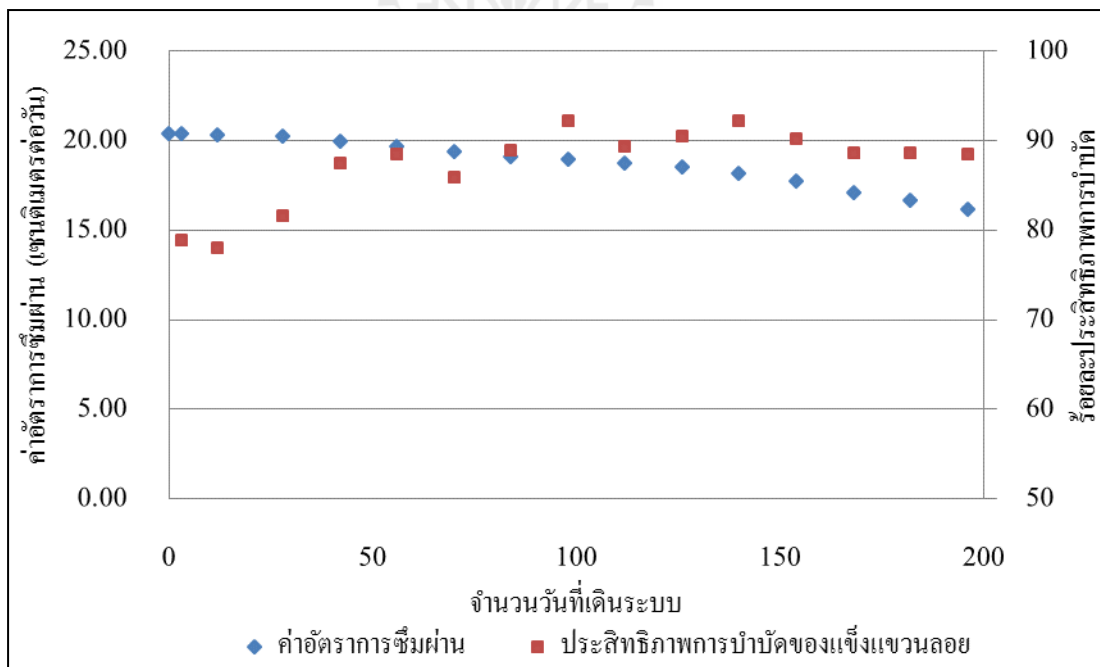
จากผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่านและประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำ พบว่าในช่วงแรกระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำ เมื่อเดินระบบต่อมาจะพบว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงมากขึ้นในขณะที่อัตราการซึมผ่านมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 แตกต่างจากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และสีย้อมที่มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากของแข็งจะถูกสะสมภายในระบบโดยกลไกการกรองและการตกตะกอนทำให้เกิดการสะสมตะกอนในตัวกลาง ทำให้ช่องว่างรูพรุนของตัวกลางมีขนาดเล็กลงส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านลดลงและเป็นสาเหตุให้ระบบเกิดการอุดตัน (Hua et al., 2010) ทำให้สามารถกำจัดของแข็งออกจากน้ำทิ้งได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าเมื่อเดินระบบไปมากกว่า 160 วัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งเริ่มมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับกราฟที่ 4.11 และ 4.12 สำหรับการบำบัดซีโอดีและสีย้อม แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณารูปแบบการอุดตันของระบบร่วมด้วย



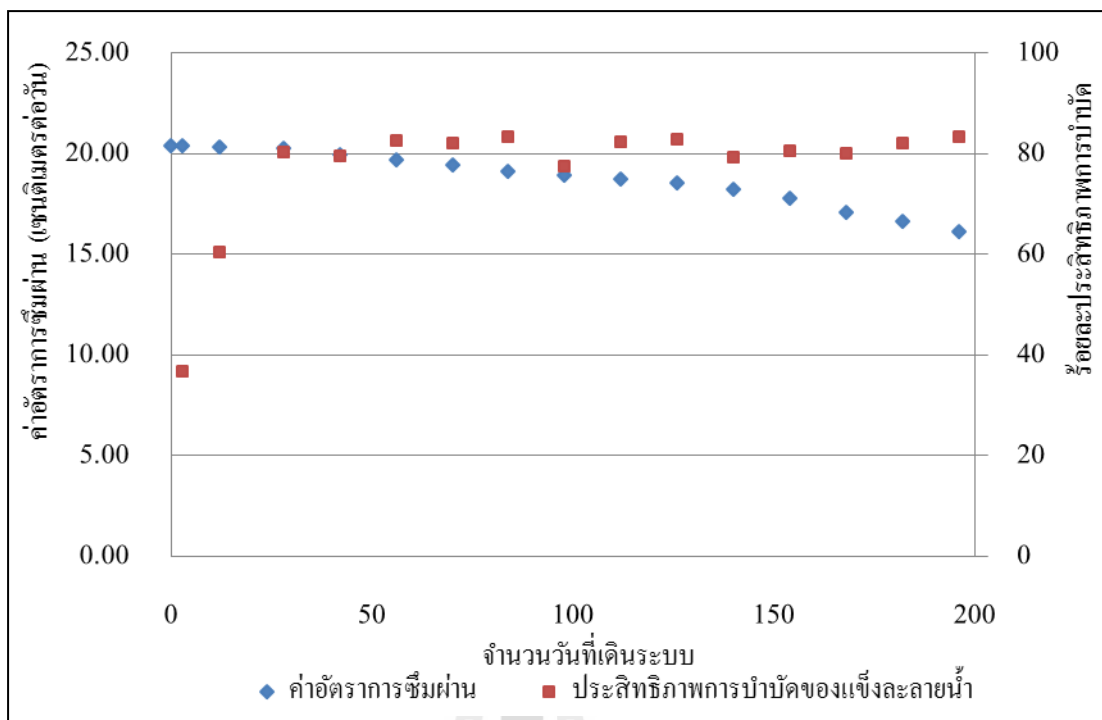
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดสี่ร้อย ของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP



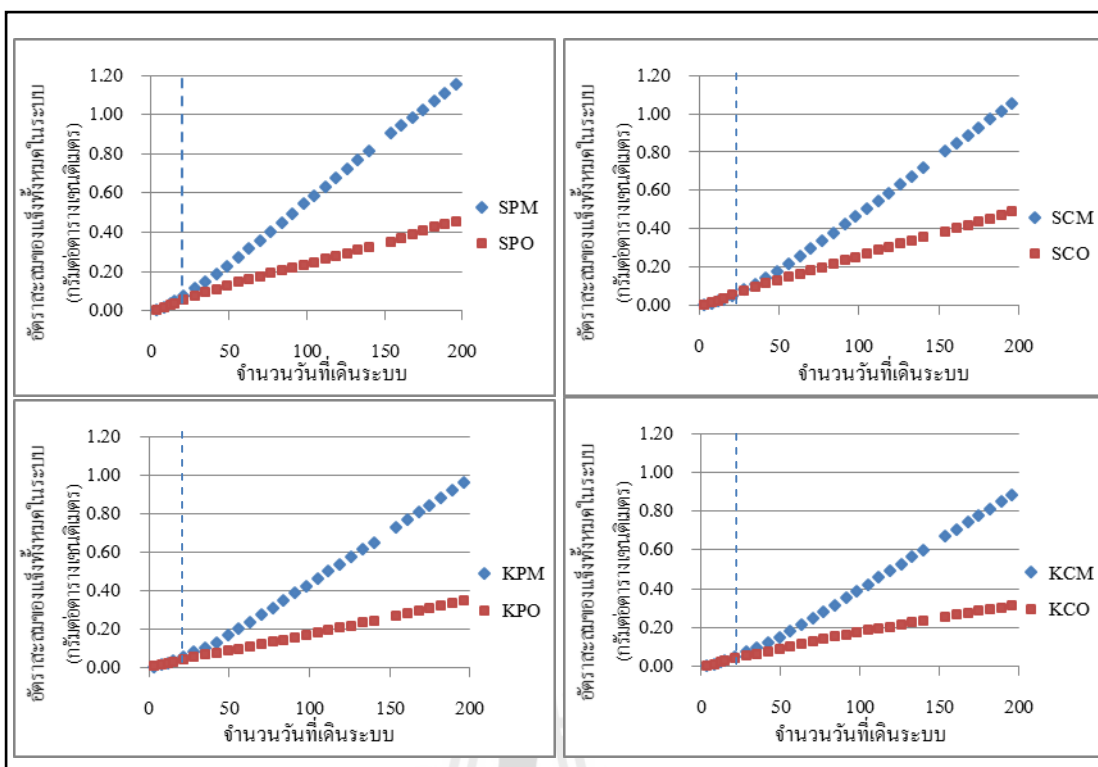
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่าน และประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำของชุดการทดลองที่ 1 เซ็ต SP

4.7.3 รูปแบบการอุดตันของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

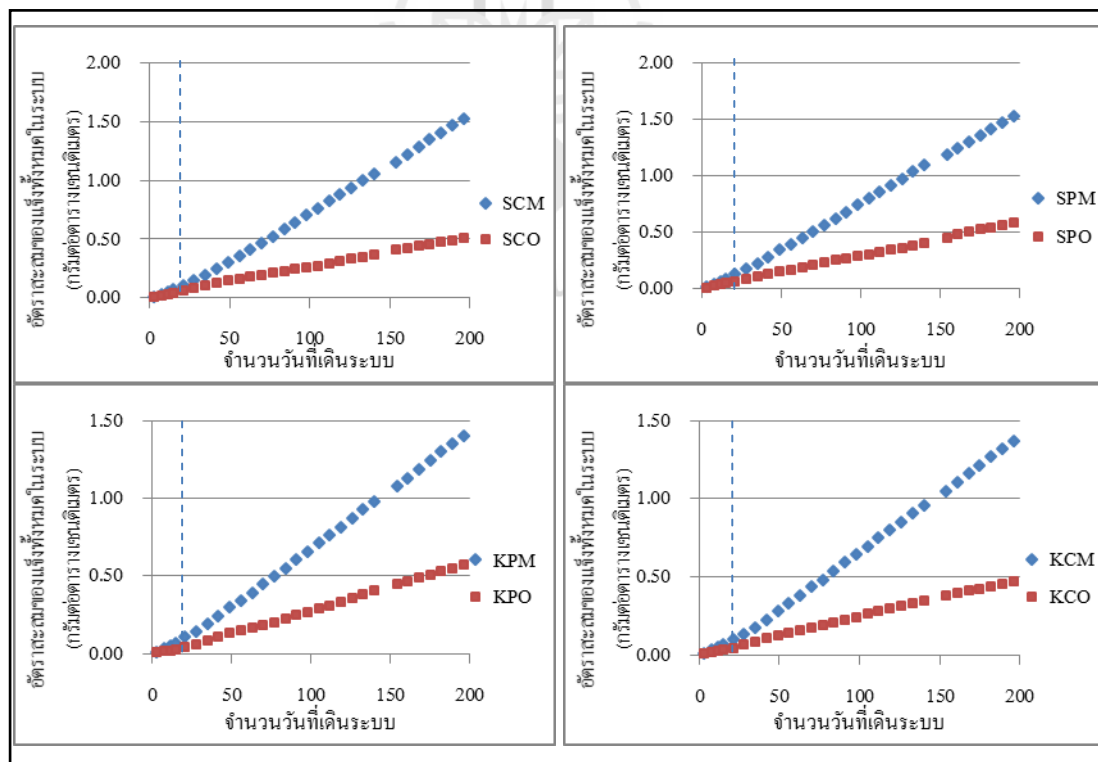
จากผลการวิเคราะห์น้ำเข้า – น้ำออก ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางแนวตั้งชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ประกอบด้วย เซ็ต SP, เซ็ต SC, เซ็ต KP และเซ็ต KC ตามลำดับ แต่ละเซ็ตประกอบด้วย 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน ได้แก่ คอลัมน์แรก (SPM, SCM, KPM และ KCM) ต่ออนุกรมกับคอลัมน์ที่สอง (SPO, SCO, KPO และ KCO) ตามลำดับ เพื่อประเมินรูปแบบการอุดตันของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.7.3.1 การสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

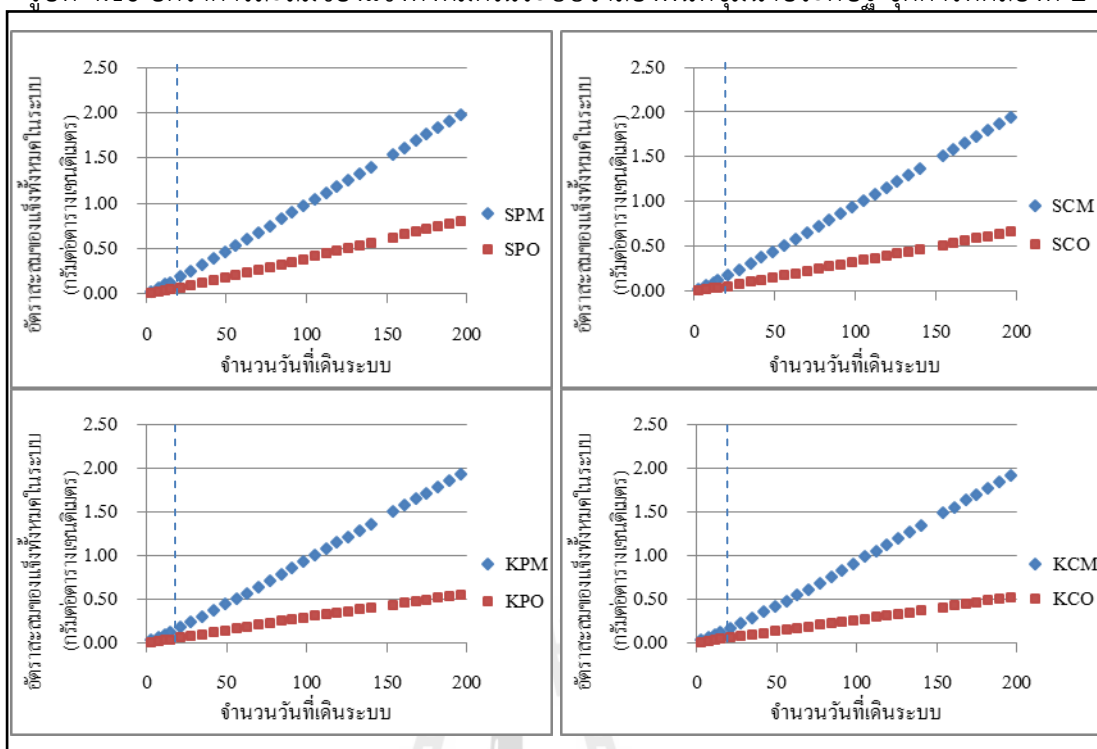
จากผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 นำมาคำนวณค่าอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.17 พบว่าในช่วง 15 วันแรก ค่าอัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดของทั้ง 2 คอลัมน์ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปคอลัมน์แรก (SPM, SCM, KPM และ KCM) ของแต่ละชุดการทดลองมีอัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดเพิ่มสูงกว่าคอลัมน์ที่สอง (SPO, SCO, KPO และ KCO) จะเห็นได้จากกราฟอัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดคอลัมน์แรกและคอลัมน์ที่สองของทั้ง 3 ชุดการ



รูปที่ 4.15 อัตราการสะสมของแรงแห่งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.16 อัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2

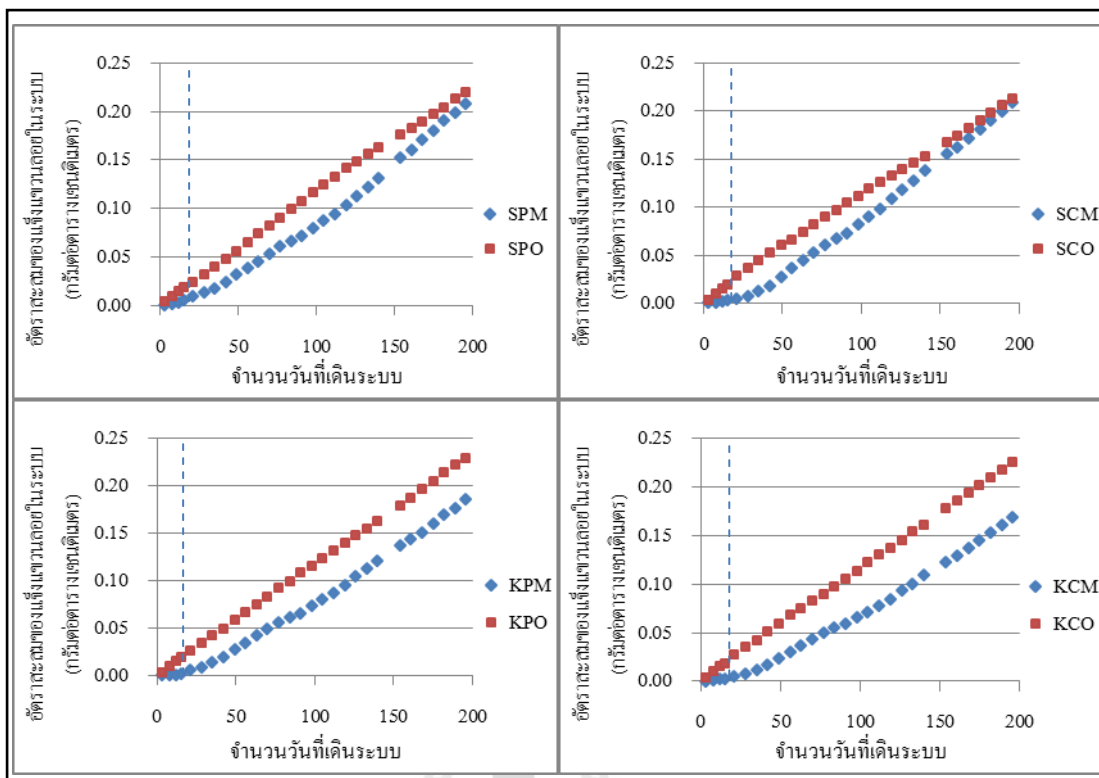


รูปที่ 4.17 อัตราการสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3

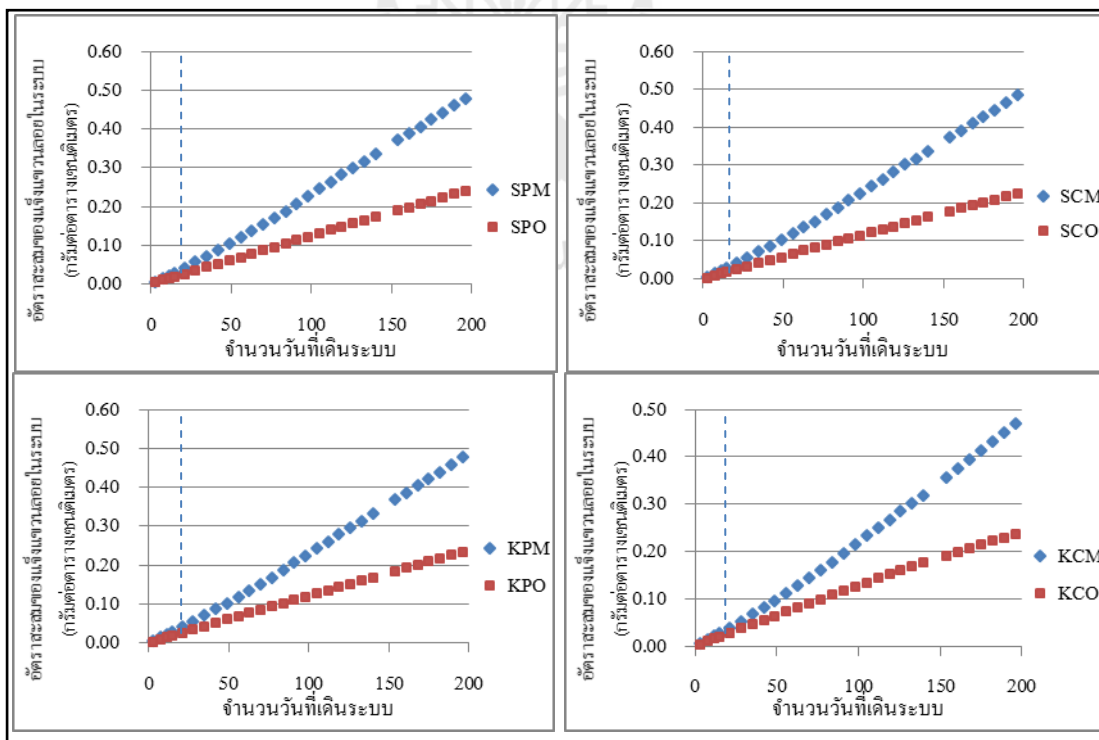
ทดลองเมื่อระยะเวลาเดินระบบนานขึ้นระยะห่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสองยังมีระยะห่างมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการสะสมของแข็งในคอลัมน์ที่สองมีปริมาณลดลง เนื่องจากของแข็งจะถูกกรองภายในคอลัมน์แรกและติดแน่นที่ผิวตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ทำให้เหลือปริมาณของแข็งทั้งหมดที่สามารถลอดผ่านช่องว่างตัวกลางในคอลัมน์แรกมายังคอลัมน์ที่สองมีจำนวนลดลง อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในคอลัมน์ที่สองจึงลดลงตามไปด้วย มีผลทำให้ระยะห่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสองเพิ่มมากยิ่งขึ้น

4.7.3.2 การสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

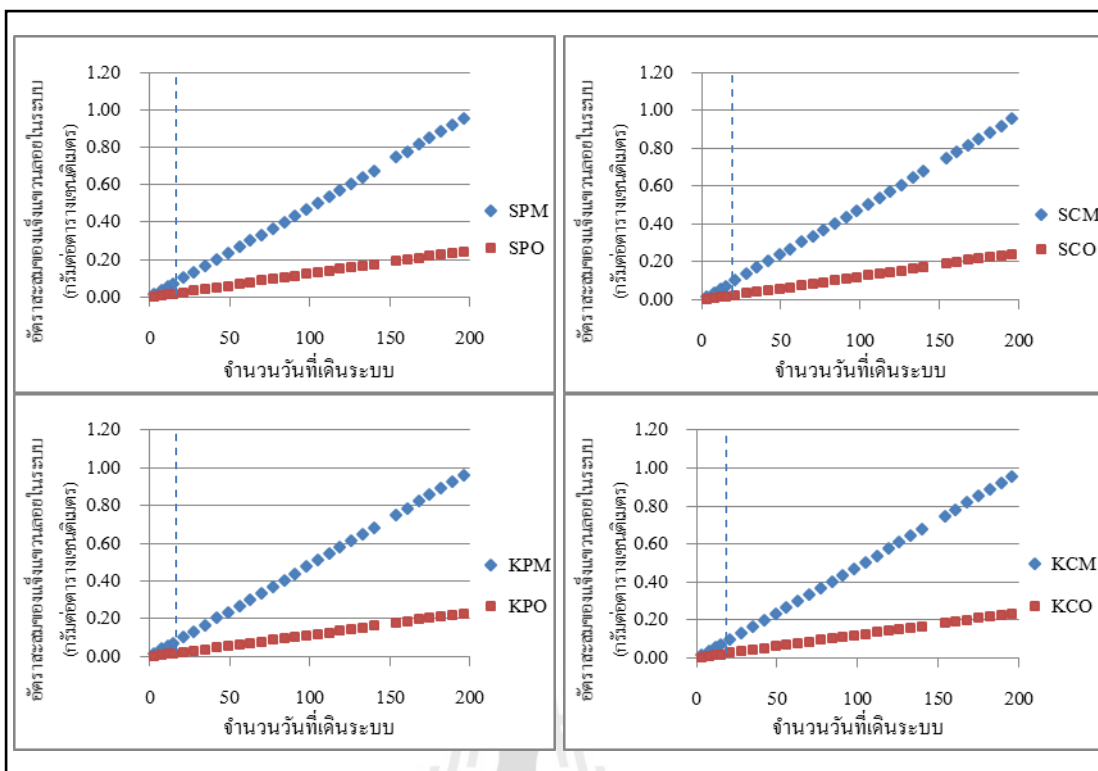
จากผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำที่สังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 นำมาคำนวณค่าอัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 - 4.20 พบว่าในช่วง 15 วันแรก ค่าอัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยของทั้ง 2 คอลัมน์ในแต่ละชุดการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อระยะเวลาผ่านไป คอลัมน์ที่สอง (SPO, SCO, KPO และ KCO) ของชุดการทดลองที่ 1 มีอัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยสูงกว่าคอลัมน์แรก (SPM, SCM, KPM และ KCM) เล็กน้อย เมื่อเพิ่มอัตราการบรรทุกสารเข้าสู่ระบบ พบว่าคอลัมน์แรก (SPM, SCM, KPM และ KCM) ของชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มีอัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยสูงกว่าคอลัมน์ที่สอง (SPO, SCO, KPO และ KCO) เนื่องจากของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียถูกกำจัดโดยตัวกลางในระบบ



รูปที่ 4.18 อัตราการสะสมของแรงเฉือนล้อยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.19 อัตราการสะสมของแรงเฉือนล้อยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2



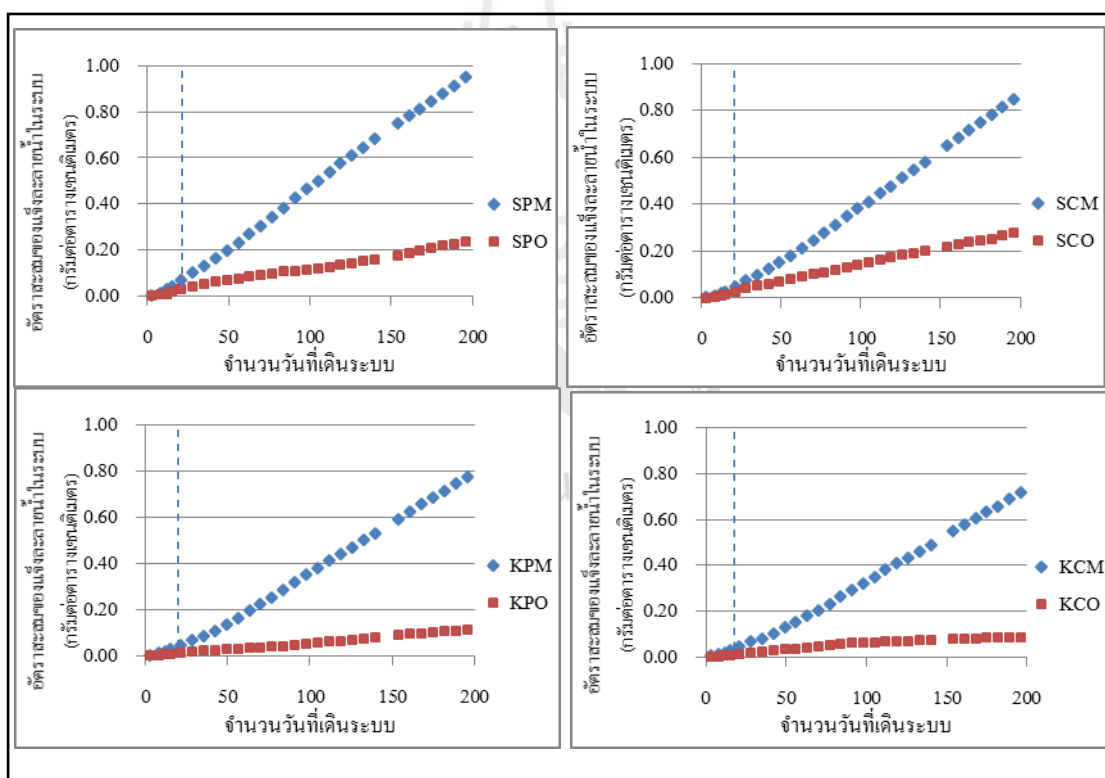
รูปที่ 4.20 อัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ด้วยกลไกการกรอง การดูดติดที่ผิวตัวกลางและการตกตะกอนภายในคอลัมน์แรก และเมื่อระยะเวลาผ่านไปของแข็งแขวนลอยถูกสะสมเพิ่มมากขึ้นที่คอลัมน์แรก ทำให้มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สามารถลอดผ่านช่องว่างตัวกลางมายังคอลัมน์ที่สองมีปริมาณลดลง ดังนั้น จึงมีอัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบลดลงด้วย เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยระหว่างเข้ที่ปลูกพืช (เข้ที่ SP และ เข้ที่ KP) และเข้ที่ไม่ปลูกพืช (เข้ที่ SC และ เข้ที่ KC) ของแต่ละชุดการทดลอง พบว่ามีอัตราการสะสมของแข็งแขวนลอยใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Hua et al. (2010) พบว่าการสะสมของแข็งแขวนลอยในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งเกิดขึ้นตามความลึกช่วงแรกของชั้นตัวกลางส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องด้วยกลไกการกรองและการดูดติดที่รูพรุนของตัวกลาง และเมื่อระยะเวลาผ่านไปการสะสมของแข็งแขวนลอยเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดเป็นชั้นหนาคุดตันช่องว่างรูพรุนตัวกลาง (Baveye et al., 1998) จนเป็นอุปสรรคต่อไหลของน้ำ ก่อให้เกิดการอุดตันของระบบในที่สุดและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด

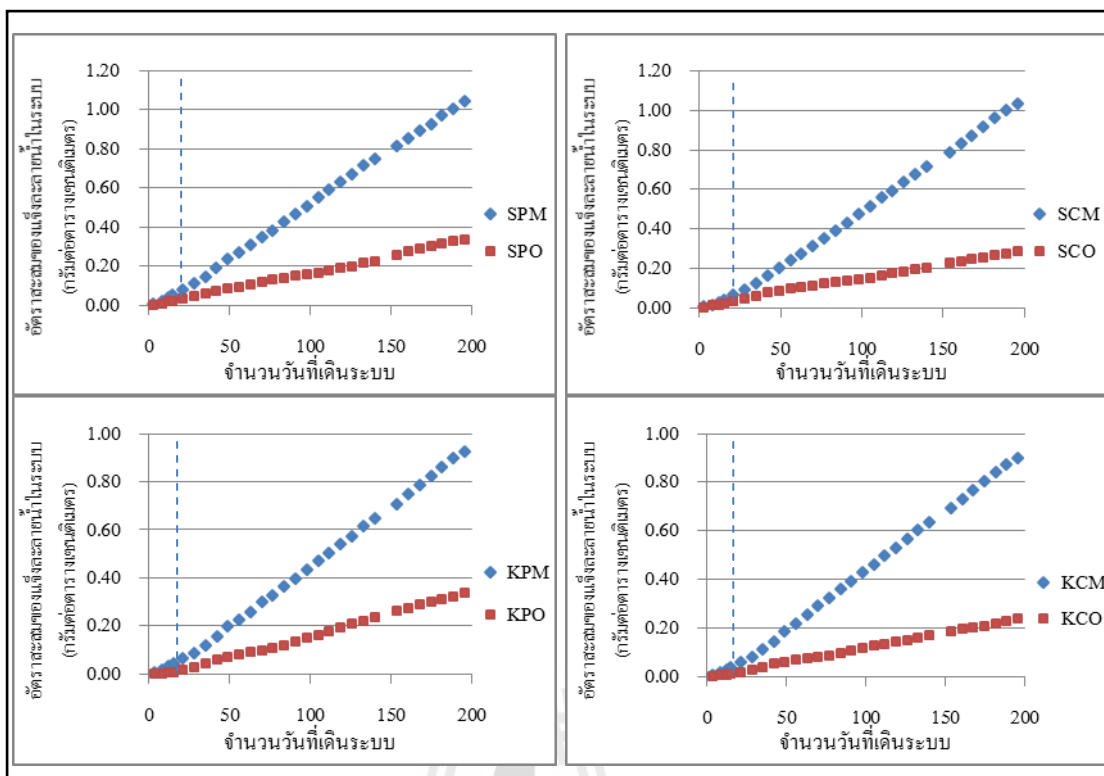
4.7.3.3 การสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งละลายน้ำของน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 นำมาคำนวณค่าอัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 - 4.23 พบว่าอัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ของทั้ง 2 คอลัมน์ในแต่ละชุดการ

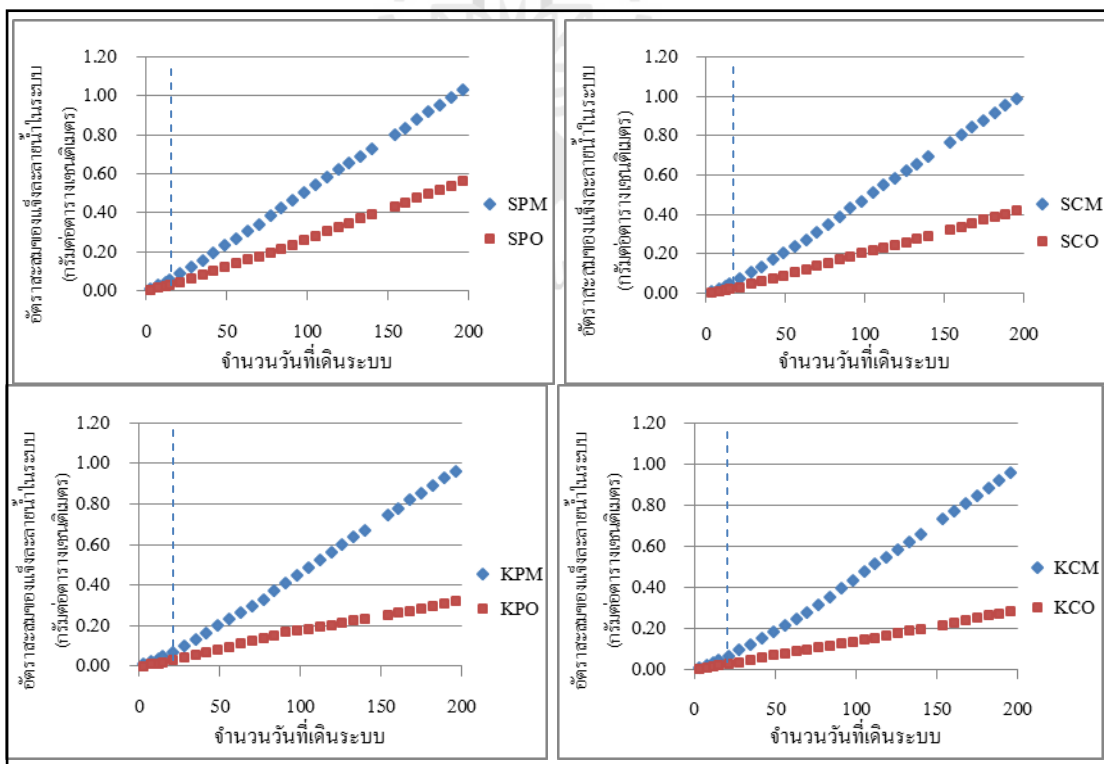
ทดลอง เมื่อระยะเวลาผ่านไป คอลัมน์แรก (SPM, SCM, KPM และ KCM) มีค่าอัตราสะสมของแข็งละลายน้ำสูงกว่าคอลัมน์ที่สอง (SPO, SCO, KPO และ KCO) เนื่องจากน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีทั้งของแข็งขนาดใหญ่และของแข็งขนาดเล็กรวมกัน โดยมีทั้งของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำ ซึ่งของแข็งขนาดใหญ่จะอุดตันที่ช่องว่างรูพรุนตัวกลางและทำหน้าที่เสมือนตัวกรองในระบบ ดังนั้นของแข็งขนาดใหญ่จึงทำหน้าที่ดักของแข็งขนาดเล็กไว้ภายในระบบ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเซตที่ปลูกพืช (เซต SP และ เซต KP) และเซตที่ไม่ปลูกพืช (เซต SC และ เซต KC) ของแต่ละชุดการทดลอง พบว่าอัตราสะสมของแข็งละลายน้ำใกล้เคียงกัน เนื่องจากของแข็งละลายน้ำเป็นของแข็งที่มีขนาดเล็ก น้อยกว่า 1.2 ไมโครเมตร (กระดาษกรอง GF/C glass microfibre filters ยี่ห้อ whatman ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร Cat No. 1822-047) หากตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีช่องว่างรูพรุนขนาดใหญ่กว่าของแข็งละลายน้ำจะสามารถลอดผ่านช่องว่างรูพรุนตัวกลาง และลอดผ่านการกรองของระบบรากพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ ดังนั้น เซตที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืชจึงมีอัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.21 อัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.22 อัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2



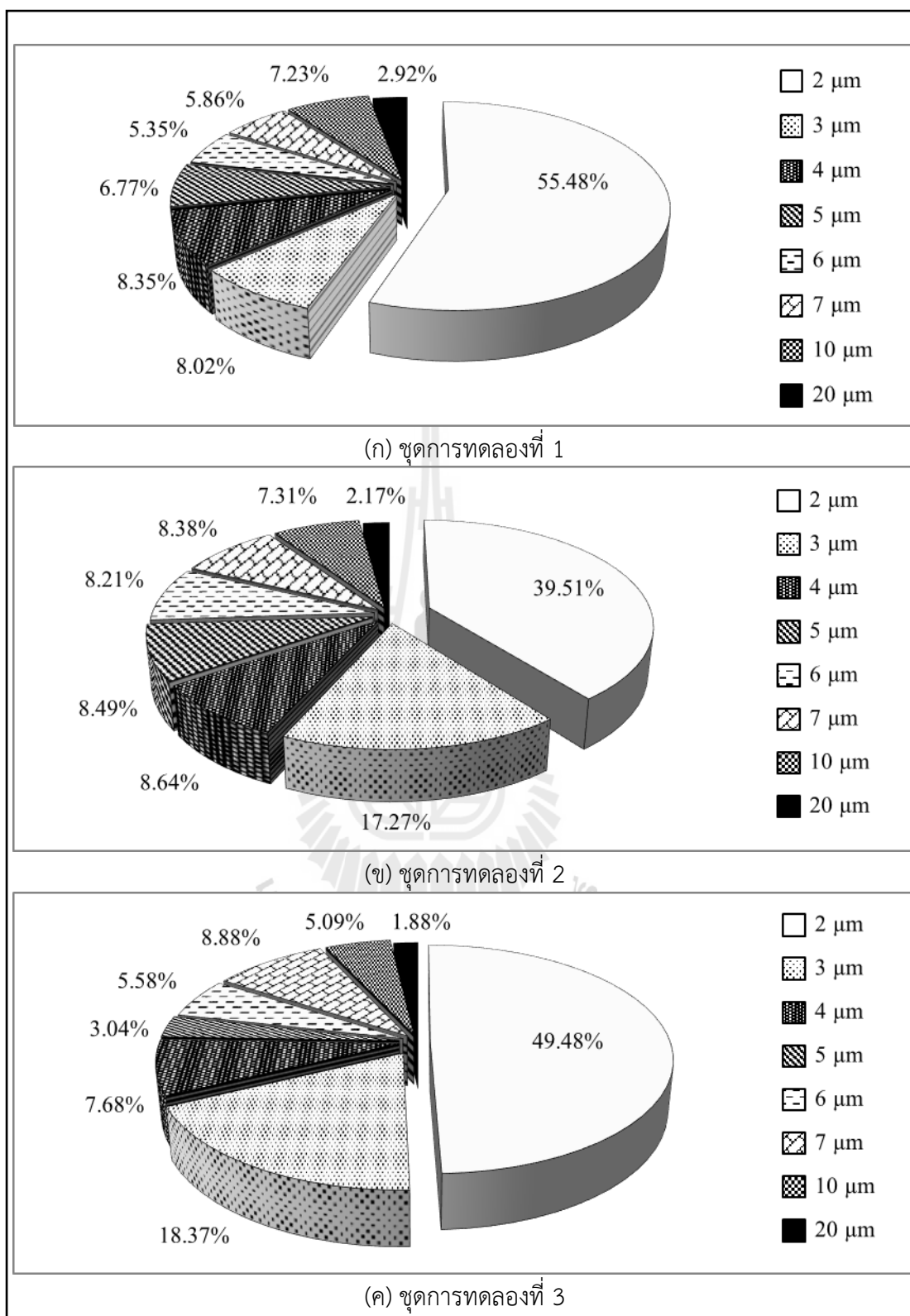
รูปที่ 4.23 อัตราการสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3

4.7.3.4 การสะสมอนุภาคภายในระบบของตัวกลางหินดินดานกับ

ตัวกลางกรวดผสมทราย

จากผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 พบว่าน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่เข้าระบบส่วนใหญ่มีอนุภาคขนาด 2 ไมโครเมตร ร้อยละ 24.39 - 63.30, 26.34 - 51.53 และ 46.67 - 52.08 ตามลำดับ ส่วนอนุภาคขนาด 3, 4, 5, 6, 7 และ 10 ไมโครเมตร มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) - (ค) และมีสัดส่วนอนุภาคขนาด 20 ไมโครเมตร น้อยที่สุด ร้อยละ 2.50 - 3.62, 2.06 - 2.41 และ 1.73 - 2.03 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.25 - 4.27 จะเห็นได้ว่าน้ำทิ้งที่เข้าระบบส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 2 ไมโครเมตร จัดเป็นอนุภาคที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ สอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ พบว่าค่าของแข็งที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งละลายน้ำร้อยละ 75 ของค่าของแข็งทั้งหมด เนื่องมาจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สีย้อมเอโซ ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ เมื่อพิจารณาน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง พบว่าน้ำออกของทุกชุดการทดลองมีอนุภาคขนาด 2 ไมโครเมตร มากที่สุด ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแวนนอน กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะเกิดในระยะ 2 เมตรแรก (Kadlec and Wallace, 2009) และในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแวนดิง กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะเกิดในระยะ 20 เซนติเมตร จากผิวหน้าของชั้นตัวกลาง (Hua et al., 2010) การสะสมอนุภาคภายในระบบจะมีผลทำให้อนุภาคเหล่านี้ไปอุดช่องว่างรูพรุนของตัวกลางที่ใช้ในระบบทำให้เกิดการอุดตัน ส่วนอนุภาคขนาดเล็ก 1 - 2 ไมโครเมตร จะถูกกำจัดได้ยาก เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กสามารถลอดผ่านช่องว่างของตัวกลางได้ แต่อนุภาคเหล่านี้จะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ทำให้อนุภาคมีความสามารถในการยึดติดและเรียงตัวซ้อนกัน การรวมตัวกันของอนุภาคเหล่านี้ เป็นการเพิ่มโอกาสในการสกัดกั้นอนุภาคอื่น ๆ ไม่ให้ผ่านชั้นตัวกลางมากขึ้น (Hubbe et al., 2009) เกิดการสะสมของอนุภาคในระบบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ระบบเกิดการอุดตันมากยิ่งขึ้น

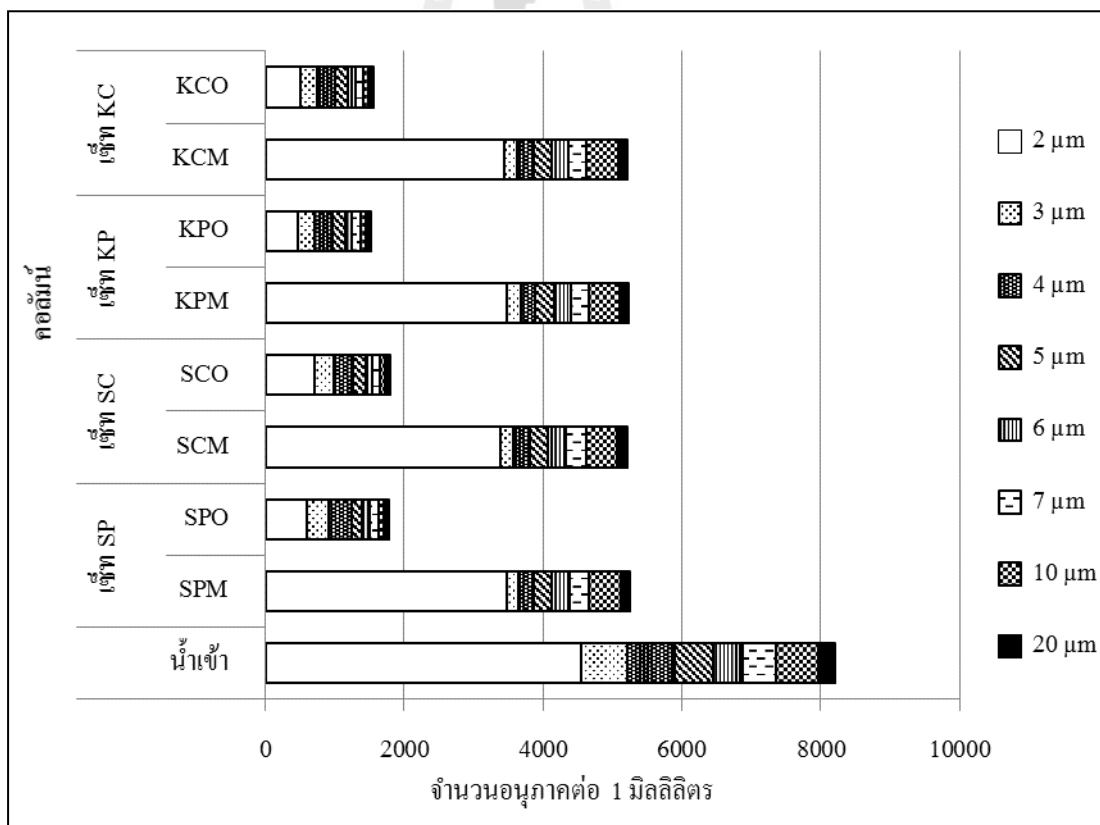
เมื่อพิจารณาอนุภาคสะสมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าคอลัมน์แรก (SPM, SCM, KPM และ KCM) ของทุกชุดการทดลองมีอนุภาคสะสมมากกว่าคอลัมน์สอง



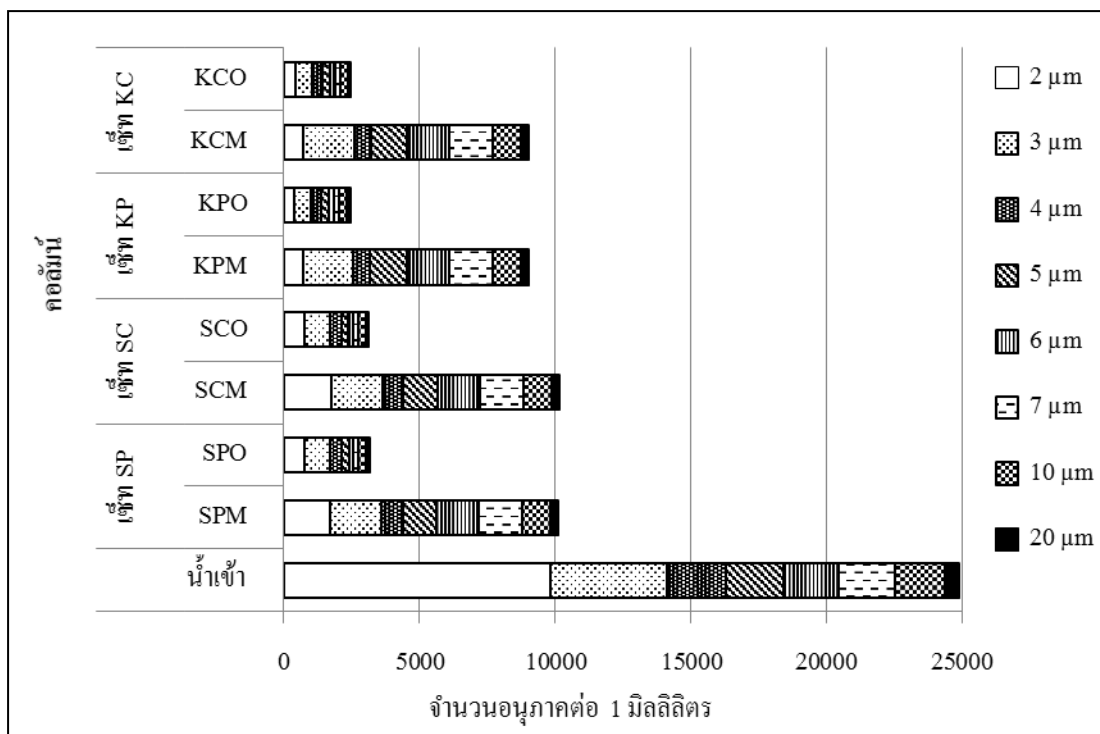
รูปที่ 4.24 สัดส่วนอนุภาคในน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส ก่อนเข้าระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ตารางที่ 4.18 สัดส่วนอนุภาคในน้ำเข้าของแต่ละชุดการทดลอง

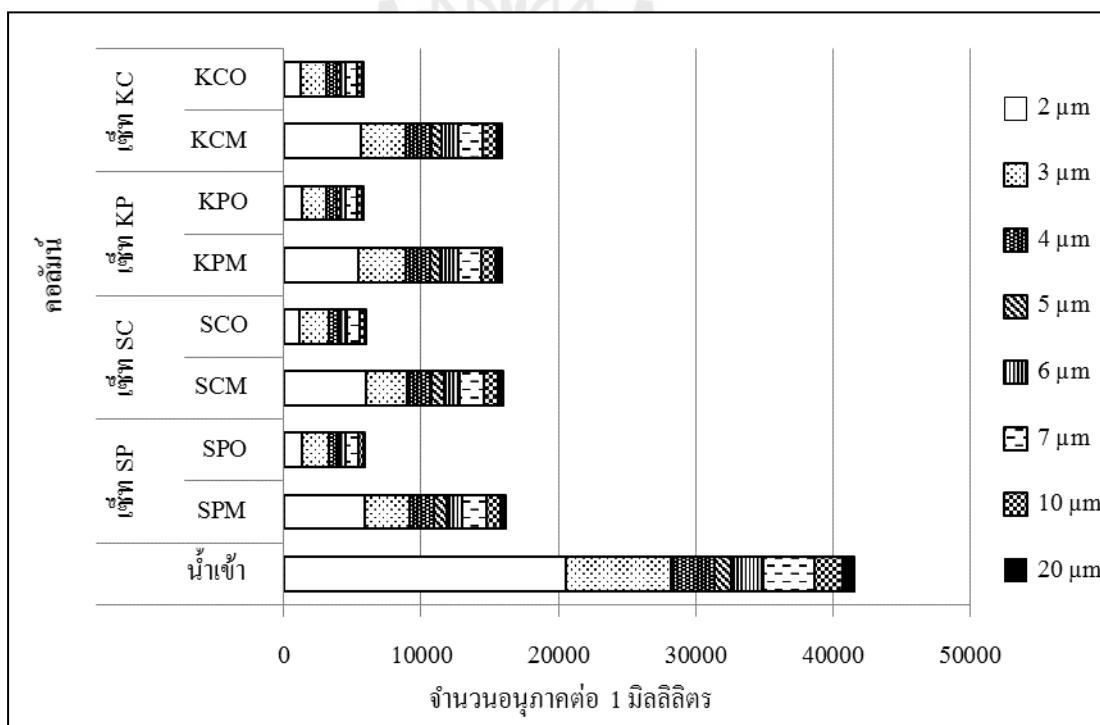
ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	สัดส่วนอนุภาคของน้ำเข้าคิดเป็นร้อยละ (Min - Max)		
	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
2	24.39 - 63.30	26.34 - 51.53	46.67 - 52.08
3	5.92 - 15.60	6.73 - 28.81	15.59 - 20.97
4	5.67 - 12.31	2.74 - 14.27	6.00 - 9.50
5	3.51 - 21.71	5.96 - 10.49	1.78 - 4.12
6	2.22 - 19.41	4.47 - 9.65	3.61 - 7.24
7	3.26 - 12.85	5.86 - 11.62	7.12 - 10.62
10	6.20 - 13.03	5.73 - 8.39	4.57 - 5.59
20	2.50 - 3.62	2.06 - 2.41	1.73 - 2.03



รูปที่ 4.25 อนุภาคที่สะสมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1

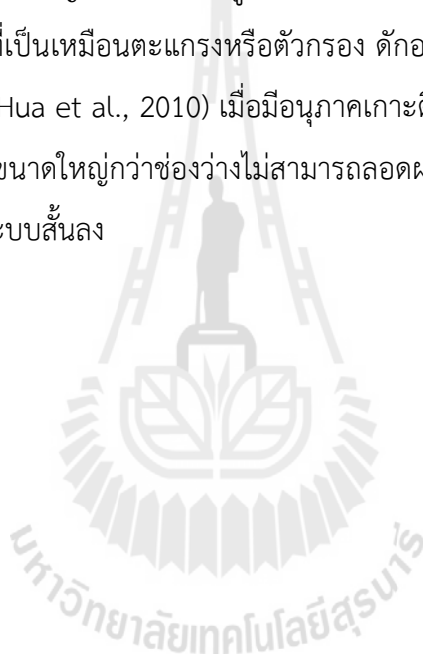


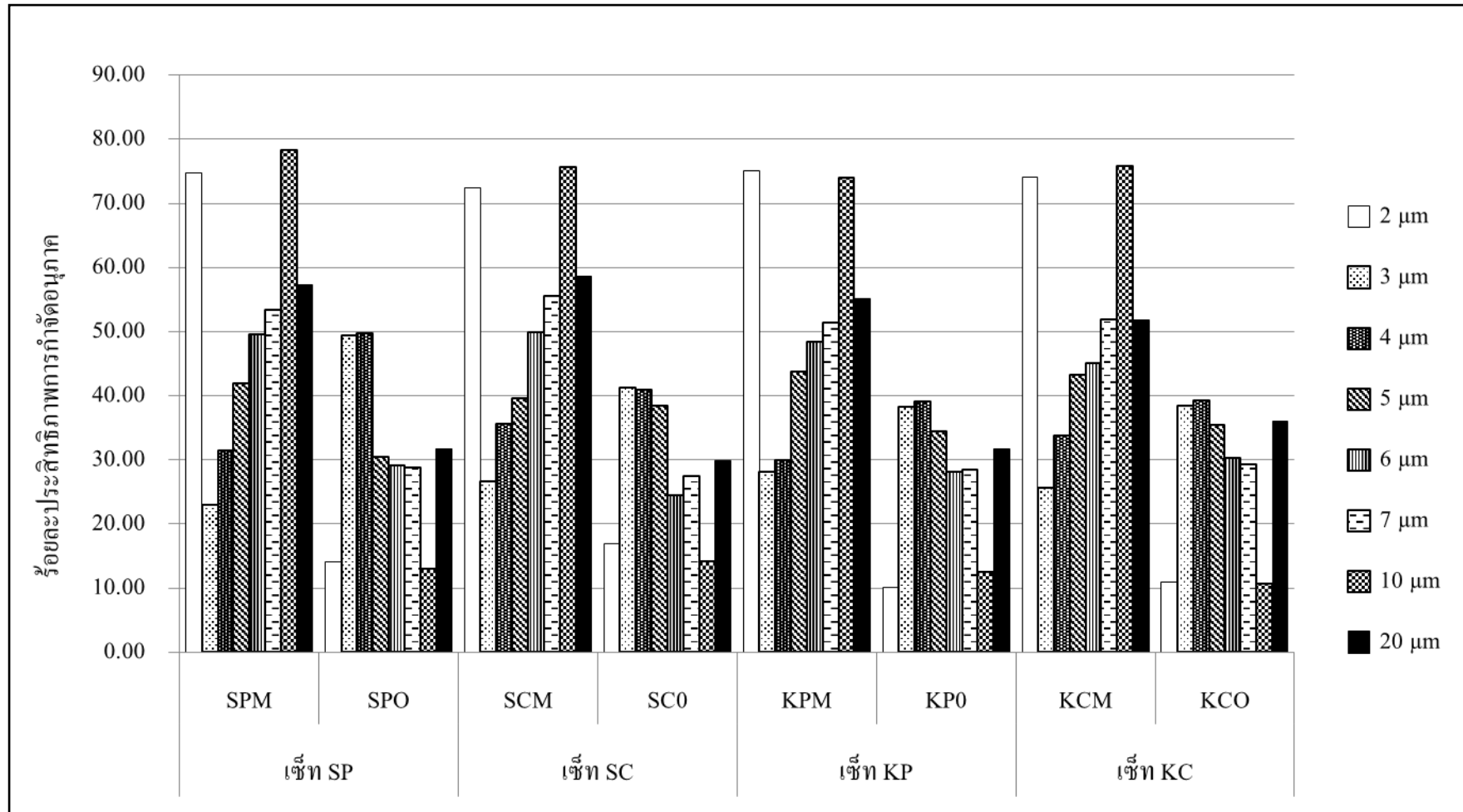
รูปที่ 4.26 อนุภาคที่สะสมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2



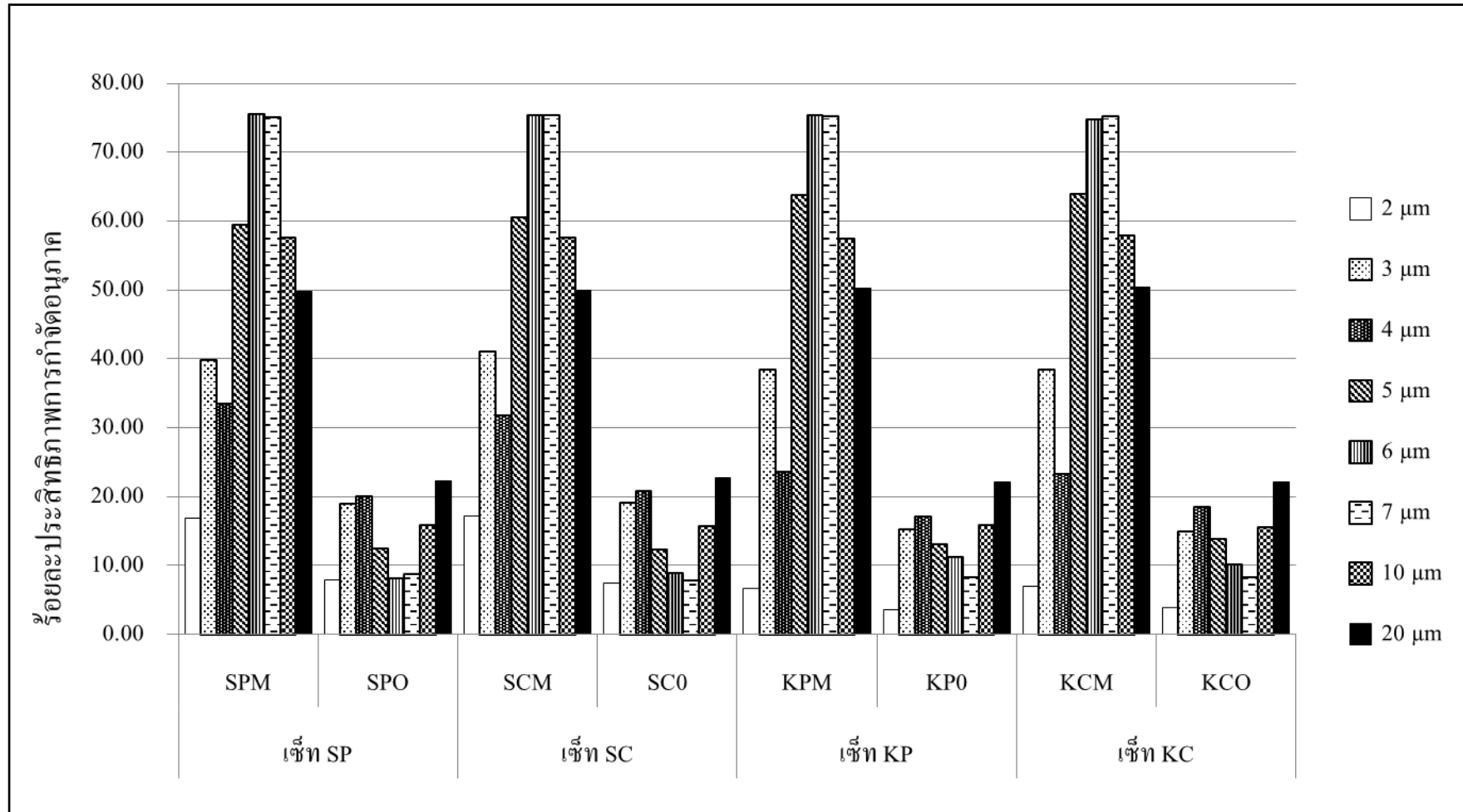
รูปที่ 4.27 อนุภาคภายในที่สะสมภายในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3

(SPO, SCO, KPO และ KCO) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 – 4.27 โดยอนุภาคขนาดใหญ่ (5 – 20 ไมโครเมตร) จะถูกกำจัดในคอลัมน์แรกมากกว่าร้อยละ 40 ของปริมาณอนุภาคทั้งหมดแต่ละชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.28 – 4.30 ด้วยกลไกการกรองของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำดิษฐ์ ส่วนอนุภาคขนาดเล็ก (2 – 4 ไมโครเมตร) จะลอดผ่านช่องว่างรูพรุนตัวกลางไปยังคอลัมน์ที่สอง จะเห็นได้ว่าการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กจะอยู่ที่คอลัมน์สองมากกว่าคอลัมน์แรก ดังนั้น การเพิ่มอัตราการระบรทุกสารเข้าสู่ระบบส่งผลต่อการกำจัดอนุภาคในน้ำเสีย ดังจะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่ 1 (รูปที่ 4.24) มีอนุภาคสะสมในระบบน้อยกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (รูปที่ 4.25 และ 4.26) เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบจะติดที่ผิวหน้าและช่องว่างรูพรุนของตัวกลาง อนุภาคเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นเหมือนตะแกรงหรือตัวกรอง ด้กอนุภาคขนาดต่าง ๆ ตามลำดับ ตามชั้นความลึกของตัวกลาง (Hua et al., 2010) เมื่อมีอนุภาคเกาะติดกันมากขึ้นทำให้ลดช่องว่างรูพรุนตัวกลาง ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างไม่สามารถลอดผ่านได้ ส่งผลให้ระบบเกิดการอุดตัน และทำให้อายุการใช้งานระบบสั้นลง

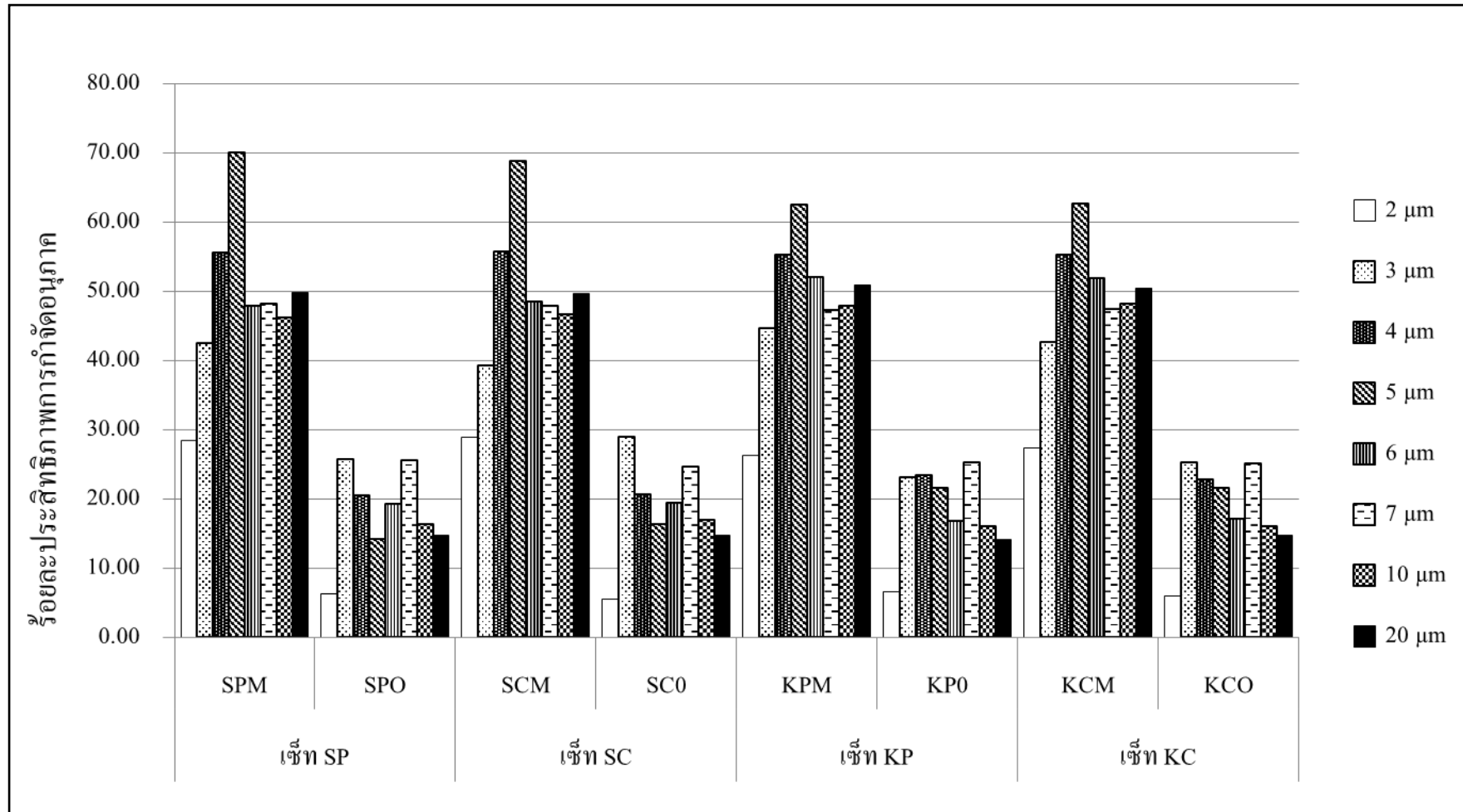




รูปที่ 4.28 ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค ชุดการทดลองที่ 1



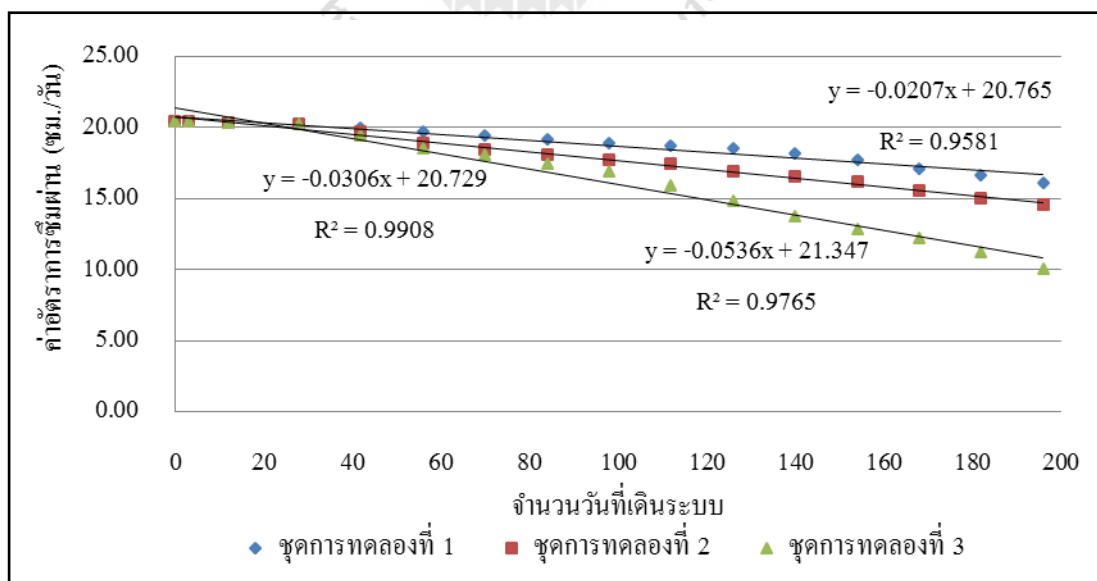
รูปที่ 4.29 ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค ชุดการทดลองที่ 2



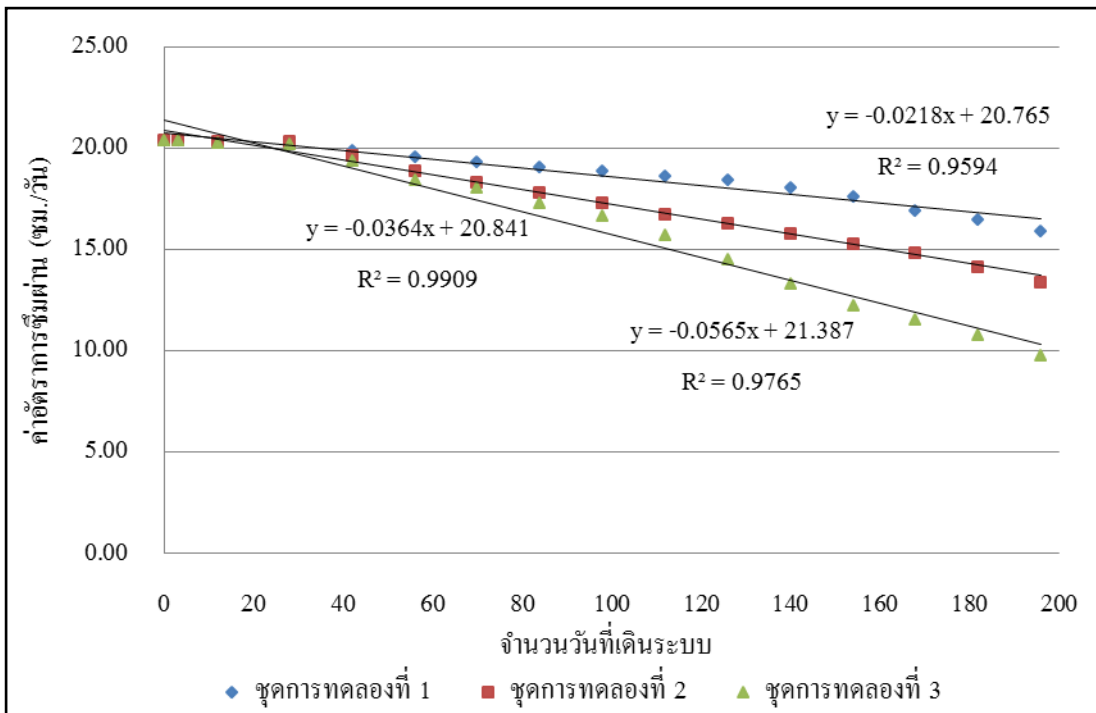
รูปที่ 4.30 ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค ชุดการทดลองที่ 3

4.7.4 การคาดการณ์อายุการใช้งานระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

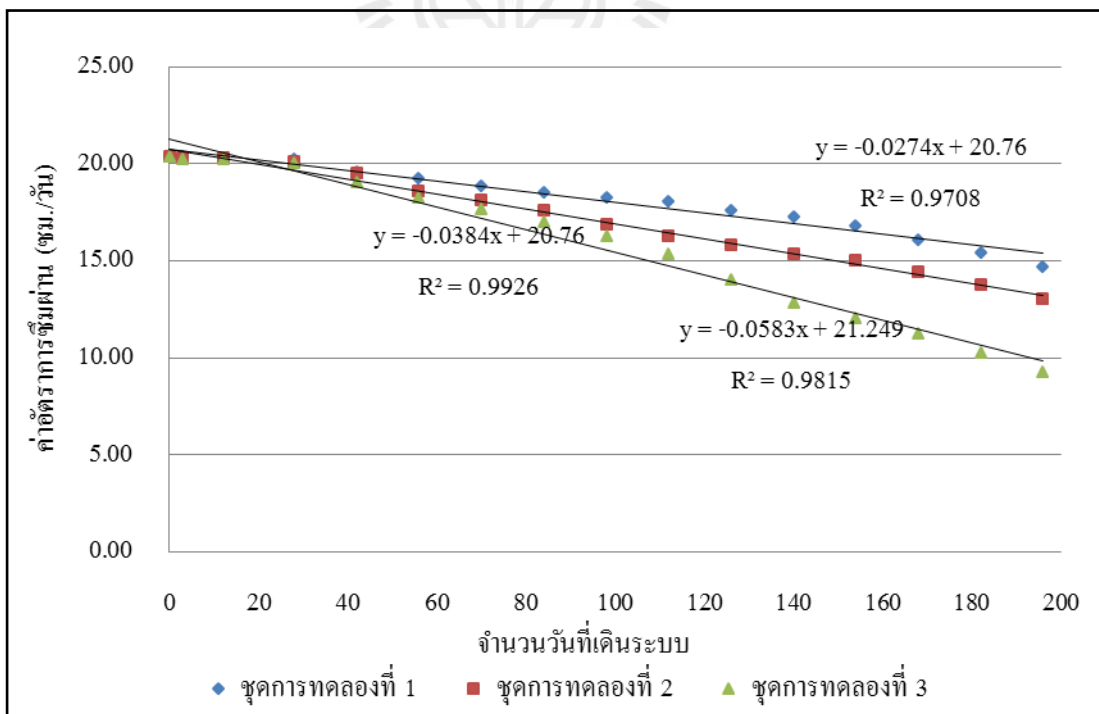
จากผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่านของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.31 – 4.34 ได้สมการเส้นตรง $y = ax + b$ โดยให้แกน y เป็นค่าอัตราการซึมผ่าน แกน x เป็นระยะเวลาที่เดินระบบ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราการซึมผ่านมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้น (ค่าเริ่มต้นเท่ากับ 20.41 เซนติเมตรต่อวัน) เท่ากับ 10.21 เซนติเมตรต่อวัน และพิจารณาร่วมกับผลของประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ สีย้อม ของแข็งทั้งหมดและของแข็งแขวนลอยของทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่าเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราการซึมผ่านลดลงครึ่งหนึ่งในชุดการทดลองที่ 1 น้ำที่ผ่านจากระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้งจะยังคงมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 และมีค่าความเข้มข้นน้ำที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานอุตสาหกรรม แล้วจึงนำมาคาดการณ์อายุการใช้งานระบบของเข้ท SP, เข้ท SC, เข้ท KP และเข้ท KC ได้เท่ากับ 510, 484, 385 และ 370 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าเข้ทตัวกลางหินดินดาน (เข้ท SP และเข้ท SC) มีการคาดการณ์อายุการใช้งานระบบนานกว่าเข้ทตัวกลางกรวดผสมทราย (เข้ท KP และเข้ท KC) ทั้ง 3 ชุดการทดลอง เมื่อนำอายุคาดการณ์การใช้งานระบบของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 เปรียบเทียบกันระหว่างเข้ทที่ปลูกพืชเหมือนกัน เข้ท SP กับเข้ท KP พบว่าเข้ทตัวกลางหินดินดาน เข้ท SP มีอายุคาดการณ์การใช้งานระบบนานกว่าเข้ทตัวกลางกรวดผสมทราย เข้ท KP เท่ากับ 1.34, 1.23 และ 1.09 เท่า ตามลำดับ เปรียบเทียบระหว่างเข้ทตัวกลางที่ไม่มีพืช เข้ท SC กับเข้ท KC พบว่า เข้ทตัวกลางหินดินดาน เข้ท SC มีอายุคาดการณ์



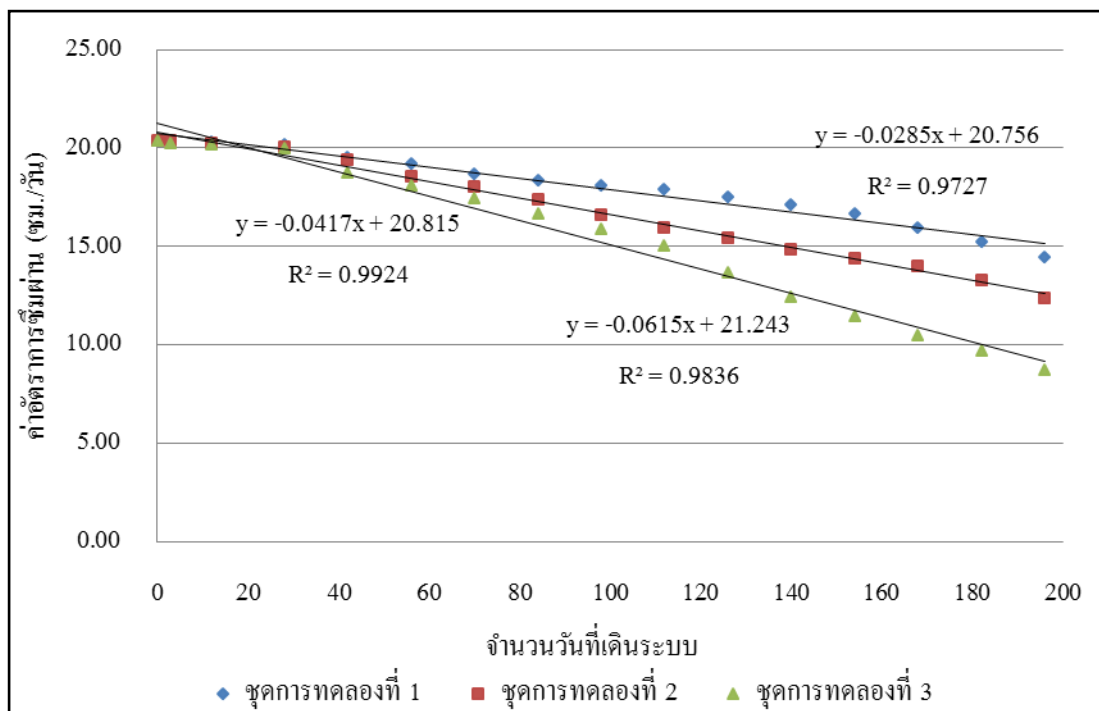
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เข้ท SP



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เซ็ต SC



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เซ็ต KP



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับระยะเวลา เซ็ต KC

ตารางที่ 4.19 สรุปผลการคาดการณ์อายุระบบ

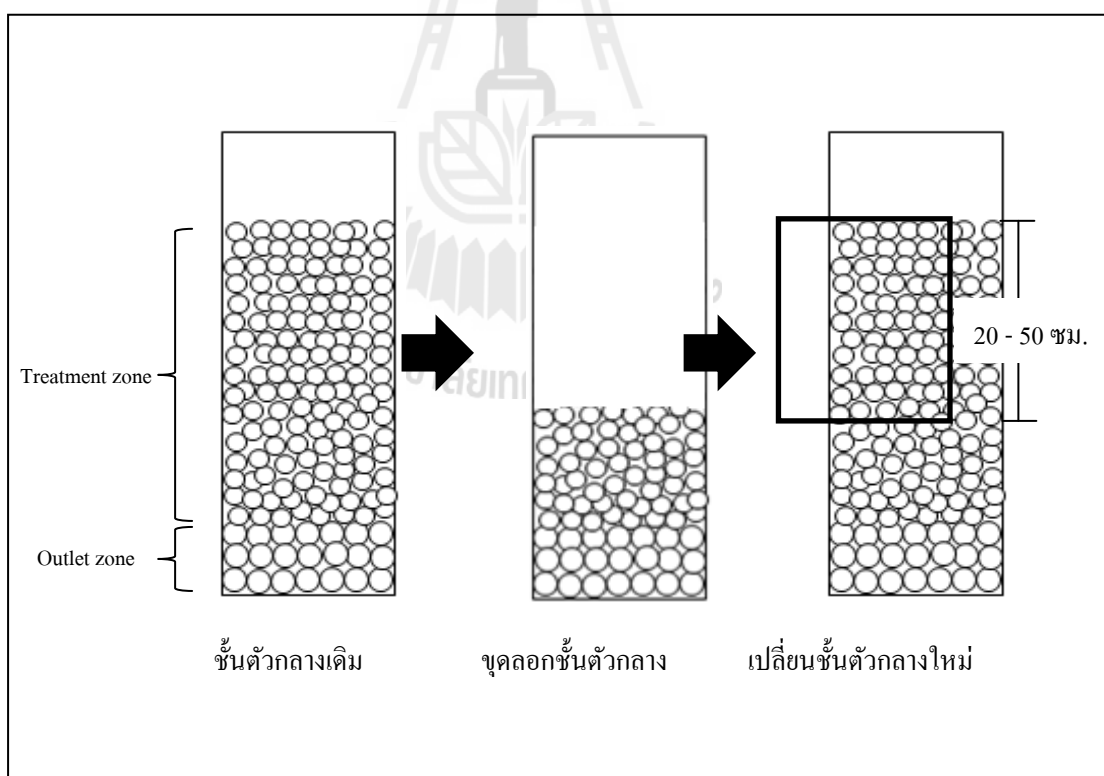
ชุดการทดลอง	เซ็ต	R^2	สมการเส้นตรง	คาดการณ์อายุระบบ (วัน)
ชุดการทดลองที่ 1	SP	0.9581	$y = -0.0207x + 20.765$	510
	SC	0.9594	$y = -0.0218x + 20.765$	484
	KP	0.9708	$y = -0.0274x + 20.760$	385
	KC	0.9727	$y = -0.0285x + 20.756$	370
ชุดการทดลองที่ 2	SP	0.9908	$y = -0.0306x + 20.729$	344
	SC	0.9909	$y = -0.0364x + 20.841$	292
	KP	0.9926	$y = -0.0384x + 20.760$	275
	KC	0.9924	$y = -0.0417x + 20.815$	254
ชุดการทดลองที่ 3	SP	0.9765	$y = -0.0536x + 21.347$	208
	SC	0.9765	$y = -0.0565x + 21.387$	198
	KP	0.9815	$y = -0.0583x + 21.249$	189
	KC	0.9836	$y = -0.0615x + 21.243$	179

การใช้งานระบบนานกว่าเซตตัวกลางกรวดผสมทราย เซต KC เท่ากับ 1.31, 1.15 และ 1.11 เท่า ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเซตตัวกลางหินดินดานทั้งที่มีพีชและไม่มีพีช (เซต SP และ เซต SC) คาดการณ์อายุการใช้งานในระบบได้นานกว่าเซตตัวกลางกรวดผสมทราย เนื่องมาจากลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางหินดินดานมีค่าความพรุนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย ทำให้การไหลของน้ำดีกว่าและเกิดการอุดตันช่องว่างรูพรุนของตัวกลางได้ช้ากว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเซตที่ปลูกพีชและไม่ปลูกพีช พบว่าเซตที่ปลูกต้นอ้อ (เซต SP และ เซต KP) คาดการณ์อายุการใช้งานได้นานกว่าเซตที่ไม่ปลูกต้นอ้อ (เซต SC และ เซต KC) และเมื่อเปรียบเทียบการคาดการณ์อายุการใช้งานระบบของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ระหว่างเซต SP กับเซต SC พบว่าเซตตัวกลางหินดินดานที่ปลูกพีช เซต SP มีอายุคาดการณ์การใช้งานระบบได้นานกว่าเซตตัวกลางหินดินดานที่ไม่ปลูกพีช เซต SC เท่ากับ 1.05, 1.17 และ 1.05 เท่า ตามลำดับ และเปรียบเทียบระหว่างเซต KP กับเซต KC พบว่าเซตตัวกลางกรวดผสมทรายที่ปลูกพีช เซต KP มีอายุคาดการณ์การใช้งานระบบนานกว่าเซตตัวกลางกรวดผสมทรายที่ไม่ปลูกพีช เซต KC เท่ากับ 1.04, 1.08 และ 1.06 เท่า ตามลำดับ เนื่องมาจากพีชที่ปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีระบบรากเจริญเติบโตไปตามชั้นของตัวกลาง ต้นอ้อมีการหยั่งรากในชั้นตัวกลางโดยเฉลี่ย 60 เซนติเมตร (U.S. EPA, 1993) จากการสังเกตของ Fisher (1990) พบว่าการแผ่ขยายรากของพีชในระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง ในการทดลองที่ประเทศออสเตรเลีย นั้น รากพีชจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของระบบ (Kickuth and Könemann, 1988) เป็นการทำลายเสถียรภาพของตัวกลาง เนื่องจากตัวกลางจะมีการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่าพีชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ช่วยทำให้เกิดการไหลของน้ำในระบบได้ดีขึ้น ส่งผลทำให้ระบบมีช่องว่างเพิ่มมากขึ้น เป็นการลดการ อุดตันที่จะเกิดขึ้นในระบบ (Brix, 1997)

4.8 การนำข้อมูลไปใช้งาน

จากผลของการศึกษาวิจัยพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลางในระบบ สามารถบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 430.95 - 470.13 กิโลกรัม ซีไอดี/เฮกแตร์.วัน และความเข้มข้นสีย้อม 133.57 - 152.62 Pt-Co ดังนั้นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งสามารถนำมาใช้เป็นระบบบำบัดน้ำทิ้งขั้นที่สามต่อจากระบบบำบัดแบบเอเอส เพื่อให้ค่าน้ำทิ้งผ่านมาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ส่วนข้อมูลผลการศึกษารอดต้นและการคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางหินดินดานสามารถใช้เป็นตัวกลางในระบบได้นานถึง 510 วัน โดยจะมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70 ซึ่งยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตามกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ดังนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้อายุการใช้งานระบบโดยคิดที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 พบว่า อายุคาดการณ์การใช้งานระบบเท่ากับ 660 วัน ค่าอัตราการซึมผ่านเท่ากับ 7.10 วัน จากผลการศึกษารูปแบบการอุดตันพบว่าของแข็งและอนุภาคในน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรม

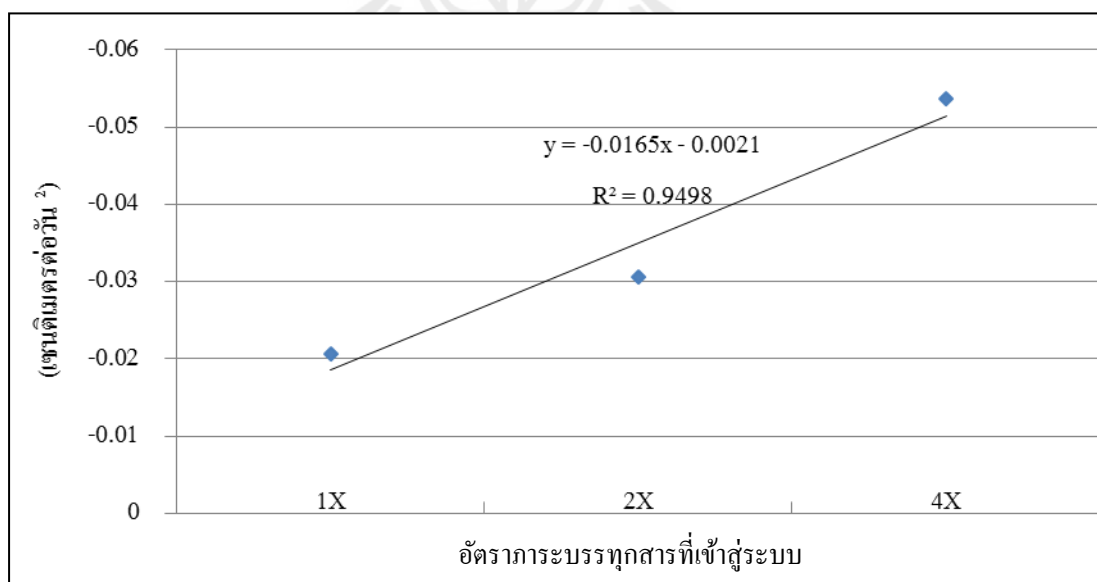
พอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสมีการสะสมในคอลัมน์แรกมากกว่าคอลัมน์ที่สอง โดยอนุภาคขนาดใหญ่ (5 – 20 ไมโครเมตร) จะถูกกำจัดในคอลัมน์แรกกว่าร้อยละ 40 ของอนุภาคทั้งหมดที่เข้าระบบ ด้วยกลไกการกรอง การดูดติดและการตกตะกอนภายในตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ส่วนอนุภาคขนาดเล็ก (2 – 4 ไมโครเมตร) จะสามารถลอดผ่านช่องว่างรูพรุนตัวกลางไปยังคอลัมน์ที่สอง กระบวนการกำจัดสำหรับอนุภาคขนาดเล็กส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่คอลัมน์ที่สอง ดังนั้นหลังจากเดินระบบได้ 660 วันเพื่อให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสให้ได้ค่าตามมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด ควรทำการเปลี่ยนชั้นผิวหน้าตัวกลางที่ระดับความลึกอย่างน้อย 20 – 50 เซนติเมตร (Hua et al., 2010) ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และจัดทำแผนดำเนินการเปลี่ยนชั้นผิวหน้าตัวกลางก่อนครบระยะเวลาหมดสภาพของตัวกลางเพื่อลดระดับความลึกในการเปลี่ยนของชั้นผิวหน้าตัวกลางในครั้งต่อไป จากผลการศึกษาการคาดการณ์อายุการใช้งานระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นำข้อมูลค่าความชื้นที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการซึมผ่านกับจำนวนวันที่เดินระบบ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นและอัตราการระบรทุกสารที่เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนชั้นตัวกลางเมื่อครบระยะเวลาดำเนินการ

ดังแสดงในรูปที่ 4.36 กำหนดให้ชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับความเข้มข้นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส, 2 เท่าของความเข้มข้นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมพอกย้อม

ที่ผ่านจากระบบเอเอส และ 4 เท่าของความเข้มข้นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส ตามลำดับ โดยมีสัญลักษณ์แทนด้วย 1X, 2X และ 4X ตามลำดับ เพื่อใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินตัวกลางแนวตั้งเพื่อบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส แต่ทั้งนี้การนำข้อมูลผลการศึกษาคาดการณ์อายุการใช้งานตัวกลางในระบบและข้อมูลค่าอัตราการซึมผ่านที่ได้ไปใช้งานยังคงมีข้อจำกัดคือ สามารถใช้กับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินแนวตั้งเพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอสโดยใช้หินดานเป็นตัวกลางในระบบ ซึ่งพิจารณารูปแบบการอุดตันจากค่าอัตราการซึมผ่าน การสะสมของแข็งและขนาดอนุภาคที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันทางด้านกายภาพ แต่การศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้ลงรายละเอียดปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการอุดตัน ได้แก่ 1) การอุดตันจากจุลินทรีย์ เนื่องจากเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลานาน จุลินทรีย์จะมีจำนวนมากขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมและมีชั้นความหนาเพิ่มมากขึ้น 2) ผลจากพืชในระบบ เนื่องจากพืชมีการเจริญเติบโตของระบบรากและเหง้าของพืชซึ่งส่งผลต่อการอุดตันของระบบ และ 3) ผลจากปฏิกิริยาเคมี เช่น การดูดซับทางกายภาพ-เคมีของตัวกลางที่ใช้ในระบบ ซึ่งจะมีผลต่อการอุดตันที่เกิดขึ้นทำให้อายุการใช้งานระบบสั้นลง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาในส่วนของอัตราการเกิดและชั้นความหนาของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ การเจริญเติบโตและผลของรากพืชและลักษณะของการดูดซับของตัวกลางทางด้านกายภาพ-เคมีที่มีผลต่อการอุดตันของระบบเพิ่มเติม



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับอัตราภาระบรทุกสารที่เข้าสู่ระบบ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการอุดตันของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางแนวตั้งที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและตัวกลางกรวดผสมทราย เพื่อการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมพอกย้อมที่ผ่านจากระบบเอเอส เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคาดการณ์อายุการใช้งานของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ สรุปผลการศึกษาวิจัยมีดังนี้

5.1 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

5.1.1 ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีสูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทรายทั้ง 3 ชุดการทดลอง และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลุกต้นอ้อ (เชืท SP) ของชุดการทดลองที่ 1 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 430.95 – 470.13 กิโลกรัมซีไอดี/เฮกแตร์.วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดีสูงกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของตัวกลางหินดินดานสูงกว่าตัวกลางกรวดผสมทรายทั้ง 3 ชุดการทดลอง และเชืทตัวกลางหินดินดานที่ปลุกต้นอ้อ (เชืท SP) ของชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นสีย้อมเท่ากับ 133.57 – 152.62 Pt-Co มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5.1.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำของเชืท SP ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลุกต้นอ้อของชุดการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเชืท SP ของชุดการทดลองที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5.2 การอุดตันของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

5.2.1 ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางดินดานมีค่าอัตราการซึมผ่านลดลงน้อยกว่าชุดที่ใช้ตัวกลางกรวดผสมทราย และระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการปลุกต้นอ้อมีค่าอัตราการซึมผ่านลดลงน้อยกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการปลุกต้นอ้อของทุกชุดการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นตัวกลางหินดินดานจึงมีแนวโน้มอายุการใช้งานได้นานกว่าตัวกลางกรวดผสมทราย

5.2.2 ค่าอัตราการซึมผ่านของระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ตัวกลางหินดินดานและปลุกต้นอ้อ (เซ็ท SP) ของชุดการทดลองที่ 1 มีการลดลงของค่าอัตราการซึมผ่านน้อยกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงให้เห็นว่าตัวกลางหินดินดานในระบบ เซ็ท SP ชุดการทดลองที่ 1 มีแนวโน้มในการใช้งานได้นานกว่าชุดการทดลองที่ 2 และ 3

5.2.3 อัตราการสะสมของแข็งและการสะสมอนุภาคเกิดขึ้นที่คอลัมน์แรก (SPM, SCM, KPM และ KCM) สูงกว่าคอลัมน์ที่สอง (SPO, SCO, KPO และ KCO) ของทุกชุดการทดลอง โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (5 – 20 ไมโครเมตร) จะถูกกำจัดในคอลัมน์แรกกว่าร้อยละ 40 ของอนุภาคทั้งหมดที่เข้าระบบ ด้วยกลไกการกรอง การดูดติดและการตกตะกอนภายในตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ส่วนอนุภาคขนาดเล็ก (2 – 4 ไมโครเมตร) จะสามารถลอดผ่านช่องว่างรูพรุนตัวกลางไปยังคอลัมน์ที่สอง ดังนั้น กระบวนการกำจัดสำหรับอนุภาคขนาดเล็กส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่คอลัมน์ที่สอง

5.2.4 ผลการศึกษา กลไกการดูดซับของตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จะเกิดการดูดซับของที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนด้านบน (Top Soil) ของตัวกลาง ต่อมาการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามลำดับความลึกของตัวกลาง

5.3 คาดการณ์อายุการใช้งานระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

จากค่าอัตราการซึมผ่านและประสิทธิภาพการบำบัดนำมาคาดการณ์อายุการใช้งานตัวกลางในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เซ็ทตัวกลางหินดินดานมีการคาดการณ์อายุการใช้งานในระบบมีอายุนานกว่าเซ็ทตัวกลางกรวดผสมทราย และเซ็ทตัวกลางที่ปลุกต้นอ้อมีการคาดการณ์อายุการใช้งานในระบบมีอายุนานกว่าเซ็ทตัวกลางที่ไม่ปลุกต้นอ้อ โดยที่อัตราการระบรทุกสารเข้าสู่ระบบต่ำจะมีอายุการใช้งานระบบนานกว่าที่อัตราการระบรทุกสารสูง เห็นได้จากเซ็ทตัวกลางหินดินดานที่ปลุกต้นอ้อ (เซ็ท SP) ของชุดการทดลองที่ 1 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 430.95 – 470.13 กิโลกรัมซีไอดี/เฮกแตร์.วัน มีการคาดการณ์อายุการใช้งานระบบนานที่สุด 510 วัน ขณะที่เซ็ทตัวกลางกรวดผสมทรายของชุดการทดลองที่ 3 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 1,606.27 – 1,691.16 กิโลกรัมซีไอดี/เฮกแตร์.วัน มีอายุคาดการณ์การใช้งานระบบเพียง 179 วัน จะเห็นได้ว่าตัวกลางหินดินดานของชุดการทดลองที่ 1 มีการคาดการณ์อายุการใช้งานระบบได้นานกว่าตัวกลางกรวดผสมทรายของชุดการทดลองที่ 3 ถึง 2.85 เท่า

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางแนวตั้งที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีการไหลแบบอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลกและมีความดันในระบบต่ำเนื่องจากเป็นระบบเปิด จึงส่งผลให้ไม่สามารถวัดความดันชลศาสตร์ได้ ดังนั้นจึงได้กำหนดให้ค่าความดันชลศาสตร์เท่ากับความหนาขึ้นตัวกลาง

5.4.2 จากผลการศึกษานำข้อมูลไปใช้งานในการดูแลรักษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยเมื่อใช้งานระบบไประยะหนึ่งประมาณ 1.5 - 2 ปี ควรมีการขุดลอกผิวหน้าตัวกลางลึกประมาณ 20 - 50 เซนติเมตร หรือเปลี่ยนตัวกลาง เพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด



รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2546). **เทคนิคการบำบัดน้ำเสียบางวิธี การนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์ และการทดสอบพิษวิทยาสำหรับน้ำทิ้ง**. เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2555). ส่วนน้ำเสียอุตสาหกรรม สำนักจัดการคุณภาพน้ำ [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.tei.or.th/songkhulake/index.html>
- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). **หินแร่ คุณสมบัติ การจำแนก และวัฏจักร**. ธรณีวิทยาวิศวกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.sdhabhon.com/Engineering%20Geology.html>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2542). **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม**. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.
- เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกูล. (2541). **การควบคุมคุณภาพงานเตรียมสิ่งทอเพื่อการย้อม พิมพ์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)**.
- ชัยยุทธ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม. (2543). **เคมีประยุกต์**. สำนักพิมพ์ ว.เพ็ชรสกุล, กรุงเทพฯ.
- ชนิตา เสมรัตน์. (2543). **ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธารณี วัฒนเดชาชาญ และ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์. (2545). **การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประนัตดา เจริญราช กิตติ เอกอำพน และสุธา ภูสิทธิ์ศักดิ์. (2549). **การบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมไหมโดยใช้บึงประดิษฐ์**. วารสารวิจัย มข. 6(2): 68-78.
- ปฎิเวธ ชินเชษฐ. (2543). **การบำบัดน้ำเสียสีดีสเพอร์สโดยกระบวนการยูเอเอสบี**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปิติพร มโนคุ่น. (2554). **สมดูลมวลเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปัทมา วิทยาการ. (2533). **ดิน:แหล่งอาหารของพืช**. พิมพ์ครั้งที่1. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น

- พัฒน์ จันทร์โรทัย. (2536). **ข้อพิจารณาในการใช้พีชน้ำปรับปรุงคุณภาพน้ำ**. วารสารวิทยาศาสตร์. 11(3): 154-157.
- มยุรี ปาลวงศ์. (2547). **หินดินดาน**. กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาธุรกิจ สอพ. กพร. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.dpim.go.th/dt/pper/000001099463794.pdf>
- มันสิน ตัญกุลเวศม์. (2526). **วิศวกรรมประปาเล่ม 1**. พิมพ์ลักษณ์, กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลักษณะ คณานิธินันท์. (2539). **ประสิทธิภาพของกกกลม รูปทรงแอ้อ และแห้วทรงกระเทียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซูปโลหะ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.
- วิวัฒน์ ไตรธิกุล. (2548). **หินน้ำมัน (Oil Shale)**. กลุ่มส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่เขต 3 กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.dpim.go.th/dt/pper/000001107333994.pdf>
- วิไลศรี ศรีทองพนาบุลย์ (2555). **การจัดการน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุมชนการทำผลิตภัณฑ์กระจุต**. สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.
- วีรานุช หลาง, ธนสิริ มีชัย และ วิชชุพร จันทร์ศรี (2008). **ความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้าประเภทรีแอคทีฟของ BURKHOLDERIA GLUMAE**. *Environment and Natural Resource Journal*. 6 (1) : 67-81.
- วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์. (2546). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยการใช้อุณหภูมิและการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศศิวิมล สุดแสน (2554). **การเปรียบเทียบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านผิวและแบบไหลใต้ผิวดำรงในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมภายใต้สภาวะอัตราการรับน้ำทางชลศาสตร์สูง**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศิริพรรณ คำแน่น (2555). **การใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดสีย้อมเอโซจากน้ำเสียฟอกย้อม**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศุควา กานตวนิชกูร. (2544). **รายงานการวิจัยเรื่อง การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ Constructed Wetland ในอากาศเขตร้อน**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2540). **คำกำหนดการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย**. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2544). **คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม**. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

- สายรุ้ง นพขุนทด (2554). การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุกานดา กาสังข์ (2548). การพัฒนาและปรับปรุงวัสดุดูดซับราคาถูกเพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟและสีย้อมเบสิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์. (2548). การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เสรีวัฒน์ สมันตร์ปัญญา. (2538). โลกและหิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.
- อังคณา อมรศรี. (2544). สีย้อม. วารสารคัลเลอร์เวย์. ปีที่ 6. ฉบับที่ 35. หน้า 16.
- อภิชาติ สนธิสมบัติ. (2540). การปรับปรุงและเพิ่มผลผลิตในโรงย้อม. วารสารคัลเลอร์เวย์. ปีที่ 2. ฉบับที่ 11. หน้า 42-46.
- อมรา ดาวไธสง. (2550). การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อริศรา พุ่มคชา. (2539). การศึกษาสารดูดซับร่วมกับสารส้มในการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Abu-El-Sha'r, W.Y., Gharaibeh, S.H., and Mahmoud, S. (1999). Removal of dyes from aqueous solutions using low-cost sorbents made of solid residues from olive-mill wastes (JEFT) and soil residues from refined Jordanian oil shale. *Environmental Geology*. 39 (10) : 1090-1094.
- 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.
- APHA, AWWA, and WEF. (2005). **Standard methods 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**. 04.08-04.09. USA : Baltimore.
- 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.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B.L., DeLeo, P.C., de Lozada, D.S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Crit. Rev. Environment Science and Technology*. 28 (2), 123–191.
- Bavor, H.J., Schulz, T.J., (1993). Sustainable suspended solids and nutrient removal in large-scale, solid-matrix, constructed wetland systems. In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 646–656.
- Bes-Pia, A., Iborra-Clar, A., Garcia-Figueruelo, C., Barredo-Damas, S., Alcaina-Miranda, M.I., Memdoza-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.
- 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. (1993). Wastewater treatment in constructed wetlands. System design, removal processes, and treatment performance. In: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis, Boca Raton.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science and Technology**. 35 (5) : 11–17.
- Buckly, C.A. (1992). Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents. **Water Science and Technology**. 25: 203-209.
- Bulc, T.G., and Ojstrsek, A. (2008). The use of constructed wetland for dry-rich textile wastewater treatment. **Hazardous Materials**. 155 : 76-82.

- 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.
- Bowmer, K.H. (1987). Herbicides in surface water. In: Herbicides, D.H. Hut-son and T.R. Roberts, eds., John Wiley & Sons Ltd, Chichester,
- 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.
- Caselles-Osorio, A., García, J. (2006). Performance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organicmatter. **Water Research**. 40 (19), 3603–3611.
- Chen, Z.M., Chen, B., Zhou, J.B., Li, Z. and Zhou, Y. (2008). A vertical subsurface flow constructed wetland in Beijing. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**. 13 : 1986-1996.
- Chris C Tanner, James P.S Sukias and Martin P Upsdell. (1998). Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. **Water Research**. 32 (10) : 3046-3054.
- Conley, L.M., Dick, R.I., Lion, L.W., (1991). An assessment of the root zone method of wastewater treatment. **J. Water Pollution Control Federation**. 63 (3): 239–247.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B., and Shutes, R.B. (1996). **Reed beds and Constructed Wetlands For Wastewater Treatment**. WRc Swidon. UK.
- 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 constructed wetland: From pilot to molecular scale. **Ecological Engineering**. 35: 961-970.
- 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.

- 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.
- Dos Santos, A. B., F. J. Cervantes, and J. B. van Lier. (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., F. J. Cervantes, and J. B. van Lier. (2007). Review Paper on Current Technologies for Decolourisation of Textile Wastewaters: Perspectives for Anaerobic Biotechnology. **Bioresource Technology**. 98 (12) : 2369-2385.
- Drizo, A., Frost, C.A., Grace, J., and Smith, K.A. (1997). Phosphate and ammonium removal by constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Science and Technology**. 35 (5) : 95-102.
- 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.
- Fisher, P.J., (1990). Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond, New South Wales, Australia. In: Cooper, P.F., Findlater, B.C. (Eds.), *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, pp. 21–32.
- García, J., Caselles-Osorio, A., Story, A., DePauw, N., Vanrolleghem, P.A. (2007). Impact of prior physico-chemical treatment on the clogging process of subsurface flow constructed wetlands: model-based evaluation. **Water Air Soil Pollut.** 185, 101–109.
- Gingell, R., and Walker, R. (1971). Mechanism of azo reduction by *Streptococcus faecalis* // The role of soluble flavins. **Xenobiotica**. 1: 231-239.
- Gozálvez-Zafrilla, J.M., Sanz-Escribano, D., Lora-García, J., and Leon Hidalgo, M.C. (2008). Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry. **Desalination**. 222: 272-279.

- Griffin, P., Wilson, L., Cooper, D., (2008). Changes in the use, operation and design of sub-surface flow constructed wetlands in a major UK water utility. In: Billore, S.K., Dass, P., Vymazal, J. (Eds.), Proceedings of the 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 1–7 November 2008. Vikram University and IWA, Indore, India, pp. 419–426.
- Hua, G., Zhu, W., Zhao, L., Zhang, Y. (2010). Applying solubilization treatment to reverse clogging in laboratoryscale vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**. 61 (6) : 1479-1487.
- Hubbe, M.A., Chen, H., Heitmann, J.A., (2009). Permeability reduction phenomena in packed beds, fiber mats, and wet webs of paper exposed to flow of liquids and suspensions: a review. **Bioresources Technology**. 4 (1): 405–451.
- 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.
- Kadlec, R.H., and Knight, R.L. (2006). Treatment Wetlands. Boca Raton, FL: CRC Press LLC.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D. (2009). Treatment Wetlands, second ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kickuth, R.W., Könemann, N., 1988. Patent: Method for the purification of sewage waters. United States: US 4,793,929.
- Langergraber, G. (2003). Simulation of subsurface flow constructed wetlands-results and further research needs. **Water Science and Technology**. 48 (5) : 157–166.
- 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.
- 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.
- Martin Marietta Material. (2004). **Material Safety Data Sheet of Shale Rock** [on-line]. 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.
- Mays, D.C., Hunt, R.J. (2005). Hydrodynamic aspects of particle clogging in porous media. **Environment Science and Technology**. 39 (2), 577–584.
- Mbuligwe, S.E. (2005). Comparative treatment of dye-rich wastewater in engineered wetland systems (EWSs) vegetated with different plant. **Water Research**. 39: 271-280.
- MOREL, A.; DIENER, S. (2006). Greywater Management in Low and Middle-Income Countries, Review of different treatment systems for households or neighbourhoods. Duebendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science (EAWAG), Department of Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC).
- Myslak, Z. W. and H. M. Bolt. (1998). Occupational Exposure to Azo Dyes and Risk of Bladder Cancer. *Zbl. Arbeitsmed.* 38 : 310.
- Nasiman, S. (1996). Treatment and reuse of textile wastewater by overland flow. **Desalination**. 106: 179-182.
- Ojstrsek, A., Fakin, D., and Vrhovsek, D. (2007). Residual dyebath purification using a system of constructed wetland. **Dyes and Pigments**. 74: 503-507.
- Ollgaard, H., Frost, L., Galster, J., and Hensen, O.C. (1999). **Survey of Azo-colorants on Denmark: Milgoproject 590**. Danish Environmental Protection Agency.
- 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.
- 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.
- Pedescoll, A., Corzo, A., lvarez, E.A., Garcí'a, J., and Puigagut, J. (2011). The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. **Water research**. 45: 3597-3589.

- Pimpan, P., and Jindal, R. (2009). Mathematical modeling of cadmium removal in free water surface constructed wetlands. **Journal of Hazardous Materials**. 163: 1322-1331.
- 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.
- Ragusa, S.R., McNevin, D., Qasem, S., Mitchell, C. (2004). Indicators of biofilm development and activity in constructed wetlands microcosms. **Water research**. 38, 2865–2873.
- Ranieri, Ezio. and Thomas, M. Young. (2012). Clogging influence on metals migration and remove in sub-surface flow constructed wetlands. **Journal of Contaminant Hydrology**. pp 38-45.
- Reed, R.C., Middlebrooks, E.J., and Crites, R.W. (1988). **Natural Systems for Waste Management and Treatment**. McGraw-Hill, New York.
- Robinson, T., G. McMullan, R. Marchant, and P. Nigam. (2001). Remediation of Dyes in Textile Effluent: A Critical Review on Current Treatment Technologies with a Proposed Alternative. **Bioresources Technology**. 77 (3) : 247-255.
- Ryan E. Rapp. (2012). Integrated management of common reed along the platte river in Nebraska: control, timing, water use, and economic analysis. Thesis, *Dissertations and Student Research in Agronomy and Horticulture*, University of Nebraska – Lincoln.
- Saratale, R. G., G. D. Saratale, D. C. Kalyani, J. S. Chang, and S. P. Govindwar. (2009). Enhanced Decolorization and Biodegradation of Textile Azo Dye Scarlet R by Using Developed Microbial Consortium-GR. **Bioresources Technology**. 100 (9) : 2493-2500.
- 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.
- Sun, D., Zhang, X., Wu, Y., and Liu, X. (2010). Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. **Hazardous Materials.** 181 : 335-342.
- Suthersan, S.S. (2002). Natural and Raton, FL, pp. 419. The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China, **Standard for Soil Test Method (GB/T50123-1999)**, China Planning Press, Beijing, 1999, pp.68-74.
- Tietz, A., Kirschner, A., Langergraber, G., Sleytr, K., Haberl, R. (2007). Characterisation of microbial biocenosis in vertical subsurface flow constructed wetlands. **Science of the Total Environment.** 380, 163-172.
- Turon, C., Comasa J., and Pocha, M. (2009). Constructed wetland clogging: A proposal for the integration and reuse of existing knowledge. **Ecological Engineering.** 35: 1710-1718.
- U.S. EPA. (1993). **Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment.** United States Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2000). **Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment.** Ohio : United States Environmental Protection Agency.
- Vandevivere, P. C., R. Bianchi, and W. Verstraete. (1998). Treatment and Reuse of Wastewater from the Textile Wet-processing Industry: Review of Emerging Technologies. **Chemical Technology and Biotechnology.** 72 (4) : 289-302.
- Veitch, N. (2004). **Horseradish peroxidase: a modern view of classic enzyme.** Phytochemistry. 65: 249-259.
- Wallace, S.D., Knight, R.L., (2006) Small-scale constructed wetland treatment systems: feasibility, design criteria, and O&M requirements. Water Environment Research Foundation (WERF), Alexandria, Virginia.
- Winter, K.-J. and Goetz, D. (2003). The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology.** 48(5): 9-14.
- Yao, K.-M., Habibian, M.T., O'Melia, C.R., 1971. Water and waste water filtration: concepts and applications. Environ. Sci. Technol. 5 (11), 1105-1112.

- 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

การคำนวณค่าอัตราการไหลและระยะเวลาเก็บกัก



ก.1 การคำนวณค่าอัตราการไหล

$$Q = \frac{LW[n d_w]}{t}$$

$$Q_{\text{ระบบ}} = \frac{\pi(0.1)^2 (0.35 \times 0.70) + \pi(0.1)^2 (0.35 \times 0.70)}{2.4}$$

$$= 0.00641 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน} = 6.41 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

ก.2 การคำนวณระยะเวลาเก็บกัก

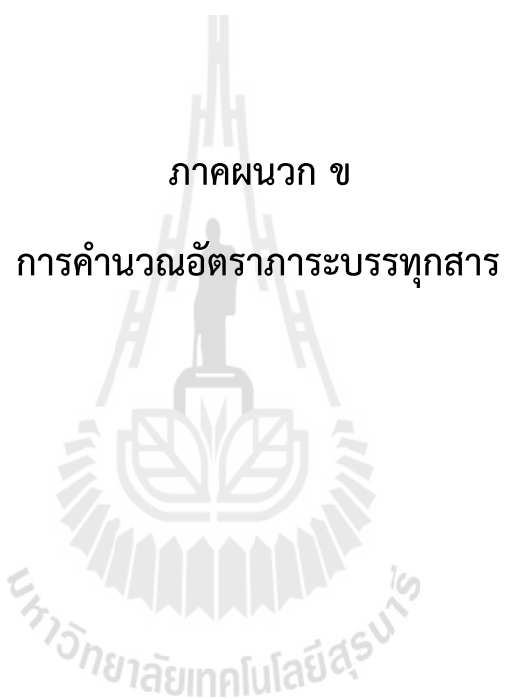
$$t_1 = \frac{V}{Q}$$

$$t_1 = \frac{\pi(0.1)^2 (0.35 \times 0.70)}{0.00641}$$

$$t_1 = 1.20 \text{ วัน} = t_2$$

$$\begin{aligned} T_{\text{รวม}} &= t_1 + t_2 \\ &= 1.20 + 1.20 \\ &= 2.40 \text{ วัน} = 57.60 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ข

การคำนวณอัตราภาระบรรทุกสาร

ข.1 การคำนวณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี

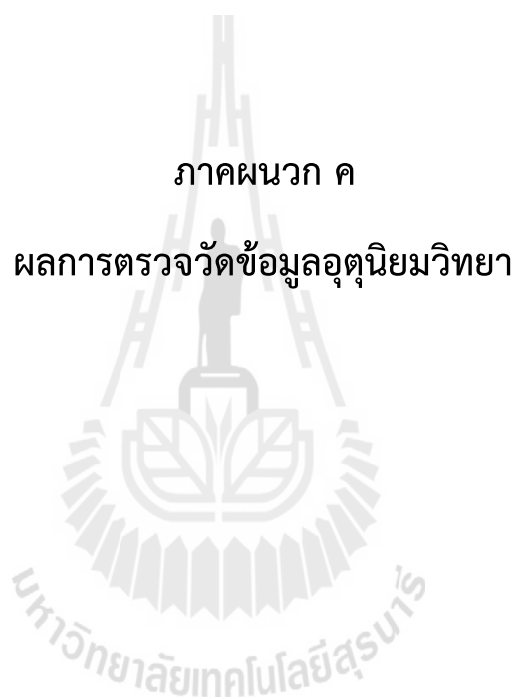
- ชุดการทดลองที่ 1 ความเข้มข้นบีโอดีอยู่ในช่วง 32.40 – 44.20 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{\text{BOD} \times Q}{A} \\ &= \frac{32.40 \times 0.00641 \times 10000}{\pi(0.1)^2 \times 1000} \\ &= 66.11 \text{ กิโลกรัมซีโอดี/เฮกแตร์.วัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OLR} &= \frac{\text{BOD} \times Q}{A} \\ &= \frac{44.20 \times 0.00641 \times 10000}{\pi(0.1)^2 \times 1000} \\ &= 90.19 \text{ กิโลกรัมบีโอดี/เฮกแตร์.วัน} \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.1 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Min - Max)

ลักษณะสมบัติ	อัตราภาระบรรทุกสาร (กิโลกรัม/เฮกแตร์.วัน)		
	ชุดการทดลอง 1	ชุดการทดลอง 2	ชุดการทดลอง 3
อัตราภาระบรรทุกบีโอดี	66.11 – 90.19	144.26 – 165.18	277.61 – 307.30
อัตราภาระบรรทุกซีโอดี	430.95 – 470.13	835.79 – 933.73	1,606.27 – 1,691.16
อัตราภาระบรรทุกของแข็งทั้งหมด	892.72 – 1,045.75	1,652.80 – 1,851.75	2,528.18 – 2,550.61
อัตราภาระบรรทุกของแข็งแขวนลอย	183.64 – 275.47	357.09 – 448.91	627.45 – 688.67
อัตราภาระบรรทุกของแข็งละลายน้ำ	698.87 – 836.60	1,270.21 – 1,458.55	1,759.92 – 1,892.56



ภาคผนวก ค

ผลการตรวจวัดข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ตารางที่ ค.1 ผลการตรวจวัดข้อมูลอุตุณิยมหาวิทยาลัยบริเวณระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

วันที่	ปริมาณฝน (มม.)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	อุณหภูมิ (°C)
0	-	82	29.5
3	12.0	81	29.7
8	11.0	82	28.9
12	-	69	30.2
15	-	70	30
21	-	74	29.5
28	50.0	78	32.1
35	-	75	31.3
42	-	70	30.7
49	10.1	70	31.6
56	20.6	76	31.3
63	-	72	29.1
70	60.1	82	28.8
77	-	78	29.5
84	-	74	26.4
91	-	70	30.3
98	-	75	30.8
105	-	72	27.5
112	-	81	27.5
119	-	69	22.1
126	-	74	23.5
133	-	77	20.8
140	-	69	19.5
154	-	71	20.8
161	-	75	16.8
168	-	76	17
175	-	78	17.6
182	-	74	23.1
189	-	73	25.5
196	-	77	27.4



ภาคผนวก ง

ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตของพืช

ตารางที่ ง.1 ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตของต้นอ้อในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	เส้นรอบวงเฉลี่ย (เซนติเมตรต่อต้น)				ความสูงเฉลี่ย (เซนติเมตรต่อต้น)				จำนวนต้น (ต้นต่อคอลัมน์)			
	SPM	SPO	KPM	KPO	SPM	SPO	KPM	KPO	SPM	SPO	KPM	KPO
0	2.30	2.40	2.30	2.40	60.00	60.00	61.00	60.00	2	3	2	2
3	2.20	2.50	2.35	2.10	62.00	61.00	63.00	60.50	3	3	2	3
12	2.30	2.63	2.33	2.20	60.00	63.00	64.00	62.00	4	3	3	3
28	2.10	2.40	2.20	2.20	64.00	64.00	64.00	65.00	5	4	4	4
42	2.15	2.35	2.23	2.30	68.00	69.00	65.50	68.50	6	5	5	5
56	2.23	2.14	2.20	2.35	67.50	71.00	69.00	65.00	6	6	6	5
70	2.25	2.10	2.10	2.24	70.20	75.00	64.30	69.30	7	7	7	6
84	2.35	2.18	2.05	2.20	74.00	70.00	69.00	75.40	8	8	8	8
98	2.27	2.25	2.12	2.12	70.00	75.00	73.40	76.00	9	8	8	9
112	2.16	2.30	2.10	2.18	84.00	79.70	72.20	75.00	10	9	9	9
126	2.20	2.37	2.12	2.20	81.50	83.00	77.50	73.50	10	9	10	10
140	2.05	2.30	2.17	2.18	87.00	85.50	80.10	77.00	12	11	12	11
154	2.16	2.27	2.20	2.20	95.00	90.10	72.5	80.50	13	13	12	12
168	2.20	2.18	2.15	2.15	109.40	87.50	83.20	82.30	13	15	13	13
182	2.14	2.10	2.07	2.15	118.50	94.20	79.40	84.50	14	15	14	14
196	2.05	2.02	2.15	2.08	135.00	96.70	75.00	86.70	15	17	14	15

ตารางที่ ง.2 ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตของต้นอ้อในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 2

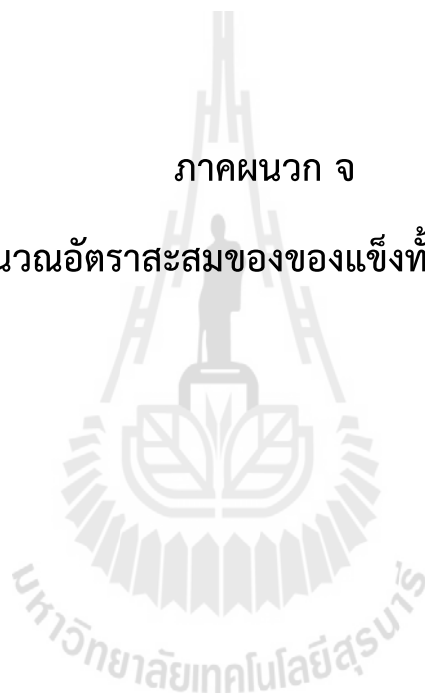
วันที่	เส้นรอบวงเฉลี่ย (เซนติเมตรต่อต้น)				ความสูงเฉลี่ย (เซนติเมตรต่อต้น)				จำนวนต้น (ต้นต่อคอลัมน์)			
	SPM	SPO	KPM	KPO	SPM	SPO	KPM	KPO	SPM	SPO	KPM	KPO
0	2.30	2.40	2.40	2.40	60.50	61.00	60.00	61.00	2	2	2	2
3	2.20	2.25	2.35	2.20	61.00	61.50	62.00	62.00	3	3	3	3
12	2.33	2.30	2.30	2.20	62.00	60.00	63.00	64.00	3	4	3	4
28	2.23	2.22	2.40	2.30	62.00	63.00	61.00	67.00	4	4	4	4
42	2.35	2.40	2.30	2.35	69.00	65.00	64.00	63.50	5	5	5	6
56	2.28	2.33	2.42	2.42	68.00	70.00	63.00	65.50	6	6	5	6
70	2.13	2.25	2.22	2.35	65.30	69.00	66.60	70.30	7	7	7	7
84	2.21	2.21	2.18	2.28	70.20	71.50	61.50	72.00	7	8	8	8
98	2.18	2.14	2.25	2.22	73.00	74.00	67.50	70.50	8	9	8	9
112	2.15	2.05	2.17	2.23	77.60	78.00	71.10	74.50	9	10	9	10
126	2.07	2.10	2.28	2.18	70.00	75.30	72.30	77.00	10	11	9	12
140	2.19	2.18	2.15	2.24	80.50	82.50	79.50	80.00	11	12	10	12
154	2.15	2.07	2.07	2.15	82.00	79.30	75.50	100.50	12	12	12	13
168	2.20	2.10	2.18	2.18	79.50	85.00	79.30	118.50	12	13	12	13
182	2.14	2.07	2.15	2.22	77.50	89.30	85.50	102.30	13	14	13	14
196	2.20	2.16	2.20	2.25	81.00	95.50	89.00	151.50	13	14	13	14

ตารางที่ ง.3 ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตของต้นอ้อในระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	เส้นรอบวงเฉลี่ย (เซนติเมตรต่อต้น)				ความสูงเฉลี่ย (เซนติเมตรต่อต้น)				จำนวนต้น (ต้นต่อคอลัมน์)			
	SPM	SPO	KPM	KPO	SPM	SPO	KPM	KPO	SPM	SPO	KPM	KPO
0	2.40	2.30	2.40	2.30	60.50	61.00	60.00	60.50	2	3	2	2
3	2.50	2.53	2.33	2.33	63.00	63.00	62.00	62.00	2	3	3	3
12	2.55	2.60	2.45	2.40	61.00	62.00	63.00	64.00	3	3	3	4
28	2.30	2.33	2.40	2.30	63.00	62.00	63.50	61.00	4	4	4	5
42	2.25	2.30	2.25	2.42	65.50	67.50	65.50	64.00	5	5	5	5
56	2.23	2.50	2.22	2.32	67.00	65.00	68.00	68.00	6	6	6	6
70	2.20	2.45	2.15	2.24	65.30	62.40	63.50	64.50	7	7	7	8
84	2.15	2.38	2.04	2.29	60.50	66.50	68.50	70.20	9	8	8	8
98	2.01	2.35	2.12	2.23	65.50	68.90	74.30	68.30	10	9	8	10
112	1.95	2.38	2.08	2.15	69.40	73.20	71.20	75.20	11	9	9	11
126	2.08	2.27	2.17	2.16	75.50	75.20	81.50	85.50	11	11	9	12
140	2.00	2.25	2.05	2.20	73.20	73.60	79.20	120.50	12	12	11	12
154	1.97	2.17	2.00	2.08	75.50	79.30	87.40	115.30	13	14	12	14
168	2.10	2.03	2.12	2.02	82.20	84.10	98.40	108.20	13	15	12	15
182	2.08	2.14	2.11	1.97	78.30	87.40	109.30	142.30	14	15	13	16
196	2.15	2.03	2.15	2.00	82.50	91.50	130.00	189.50	14	16	13	18

ภาคผนวก จ

การคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในระบบ



ตารางที่ จ.1 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำเข้า - น้ำออก ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KP0 (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	437.50								
3	442.50	350.00	240.00	372.50	290.00	377.50	297.50	367.50	300.00
12	512.50	285.00	184.00	367.50	225.00	377.50	262.50	380.00	265.00
28	505.00	235.00	97.50	287.50	137.50	312.50	220.00	325.00	230.00
42	485.00	210.00	90.00	255.00	127.50	282.50	212.50	300.00	215.00
56	502.50	200.00	80.00	235.00	110.00	255.00	175.00	280.00	185.00
70	505.00	195.00	85.00	225.00	105.00	250.00	162.50	270.00	192.50
84	507.50	182.50	77.50	217.50	92.50	240.00	157.50	265.00	177.50
98	507.50	180.00	95.00	220.00	87.50	242.50	152.50	252.50	182.50
112	502.50	185.00	80.00	205.00	87.50	232.50	158.75	250.00	180.00
126	500.00	190.00	75.00	192.50	82.50	235.00	145.00	262.50	182.50
140	507.50	185.00	87.50	207.50	90.00	237.50	147.50	265.00	185.00
154	502.50	192.50	85.00	192.50	85.00	227.50	142.50	247.50	182.50
168	497.50	220.00	87.50	210.00	92.50	230.00	147.50	247.50	187.50
182	497.50	205.00	80.00	197.50	90.00	232.50	135.00	260.00	187.50
196	505.00	185.00	77.50	210.00	82.50	232.50	142.50	250.00	185.00

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งทั้งหมดในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) - (9) คือของแข็งทั้งหมดที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ จ.2 ค่าของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	92.50	110.00	70.00	82.50	65.00	80.00	75.00	67.50
12	227.50	101.00	145.00	142.50	135.00	115.00	132.50	115.00
28	270.00	137.50	217.50	150.00	192.50	92.50	180.00	95.00
42	275.00	120.00	230.00	127.50	202.50	70.00	185.00	85.00
56	302.50	120.00	267.50	125.00	247.50	80.00	222.50	95.00
70	310.00	110.00	280.00	120.00	255.00	87.50	235.00	77.50
84	325.00	105.00	290.00	125.00	267.50	82.50	242.50	87.50
98	327.50	85.00	287.50	132.50	265.00	90.00	255.00	70.00
112	317.50	105.00	297.50	117.50	270.00	73.75	252.50	70.00
126	310.00	115.00	307.50	110.00	265.00	90.00	237.50	80.00
140	322.50	97.50	300.00	117.50	270.00	90.00	242.50	80.00
154	310.00	107.50	310.00	107.50	275.00	85.00	255.00	65.00
168	277.50	132.50	287.50	117.50	267.50	82.50	250.00	60.00
182	292.50	125.00	300.00	107.50	265.00	97.50	237.50	72.50
196	320.00	107.50	295.00	127.50	272.50	90.00	255.00	65.00

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งทั้งหมดที่สะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ จ.3 ค่าของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ระยะห่างวันที่ เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
3	1	1.78	2.12	1.35	1.59	1.25	1.54	1.44	1.30
12	4	5.83	2.59	3.72	3.65	3.46	2.95	3.40	2.95
28	7	12.11	6.17	9.76	6.73	8.64	4.15	8.08	4.26
42	7	12.34	5.38	10.32	5.72	9.09	3.14	8.30	3.81
56	7	13.57	5.38	12.00	5.61	11.11	3.59	9.98	4.26
70	7	13.91	4.94	12.56	5.38	11.44	3.93	10.54	3.48
84	7	14.58	4.71	13.01	5.61	12.00	3.70	10.88	3.93
98	7	14.69	3.81	12.90	5.95	11.89	4.04	11.44	3.14
112	7	14.25	4.71	13.35	5.27	12.11	3.31	11.33	3.14
126	7	13.91	5.16	13.80	4.94	11.89	4.04	10.66	3.59
140	7	14.47	4.37	13.46	5.27	12.11	4.04	10.88	3.59
154	14	27.82	9.65	27.82	9.65	24.68	7.63	22.88	5.83
168	7	12.45	5.95	12.90	5.27	12.00	3.70	11.22	2.69
182	7	13.12	5.61	13.46	4.82	11.89	4.37	10.66	3.25
196	7	14.36	4.82	13.24	5.72	12.23	4.04	11.44	2.92

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ จ.4 อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SC0	KPM	KP0	KCM	KCO
0								
3	0.006	0.007	0.004	0.005	0.004	0.005	0.005	0.004
12	0.035	0.027	0.022	0.028	0.023	0.022	0.022	0.022
28	0.118	0.075	0.085	0.079	0.079	0.053	0.074	0.054
42	0.188	0.111	0.144	0.116	0.130	0.075	0.120	0.078
56	0.273	0.145	0.219	0.151	0.200	0.097	0.182	0.105
70	0.361	0.177	0.298	0.184	0.273	0.121	0.248	0.129
84	0.452	0.207	0.381	0.219	0.348	0.144	0.317	0.154
98	0.544	0.232	0.463	0.255	0.423	0.170	0.387	0.175
112	0.634	0.263	0.546	0.290	0.499	0.193	0.458	0.196
126	0.724	0.293	0.631	0.324	0.575	0.218	0.528	0.216
140	0.815	0.322	0.717	0.357	0.651	0.244	0.599	0.237
154	0.903	0.353	0.805	0.388	0.729	0.268	0.672	0.256
168	0.985	0.390	0.889	0.420	0.806	0.293	0.743	0.275
182	1.067	0.427	0.973	0.453	0.881	0.319	0.812	0.295
196	1.158	0.457	1.057	0.489	0.960	0.344	0.886	0.313

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์

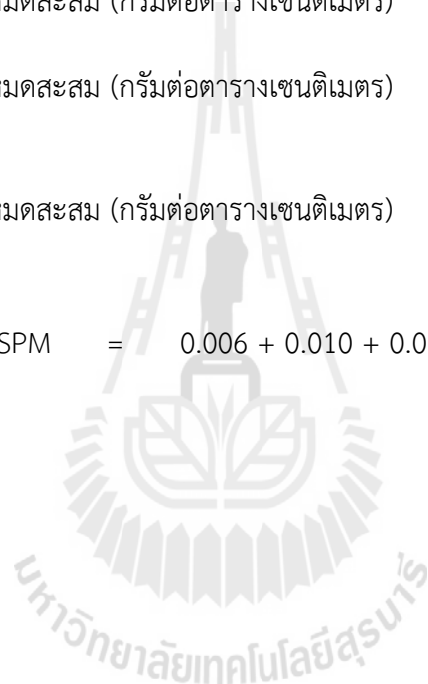
นำค่าที่ได้จากตารางที่ จ.3 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{1.78 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.006$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{3.29 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.010$

คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{5.83 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.019$

อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในคอลัมน์ SPM = $0.006 + 0.010 + 0.019 = 0.035$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ตารางที่ จ.5 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำเข้า - น้ำออก ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KPO (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	810.00								
3	820.00	587.50	487.50	620.00	500.00	627.50	517.50	632.50	525.00
12	832.50	560.00	407.50	587.50	457.50	585.00	497.50	607.50	519.00
28	830.00	517.50	362.50	557.50	395.00	567.50	425.00	587.50	445.00
42	897.50	487.50	350.00	527.50	377.50	542.50	372.50	552.50	407.50
56	832.50	470.00	347.50	482.50	360.00	510.00	372.50	502.50	395.00
70	857.50	475.00	327.50	470.00	349.50	485.00	385.00	487.50	387.50
84	877.50	457.50	307.50	452.50	342.50	485.00	347.50	480.00	365.00
98	867.50	442.50	332.50	442.50	340.00	485.00	337.50	502.50	362.50
112	875.00	462.50	310.00	457.50	335.00	497.50	345.00	502.50	395.00
126	875.00	465.00	320.00	462.50	337.50	497.50	325.00	500.00	377.50
140	837.50	447.50	307.50	447.50	335.00	490.00	337.50	497.50	375.00
154	830.00	485.00	320.00	465.00	322.50	487.50	335.00	492.50	380.00
168	875.00	477.50	315.00	442.50	327.50	480.00	337.50	497.50	387.50
182	875.00	465.00	312.50	442.50	322.50	480.00	347.50	495.00	385.00
196	830.00	457.50	335.00	457.50	325.00	490.00	325.00	492.50	375.00

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งทั้งหมดในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) - (9) คือของแข็งทั้งหมดที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ จ.6 ค่าของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	232.50	100.00	200.00	120.00	192.50	110.00	187.50	107.50
12	272.50	152.50	245.00	130.00	247.50	87.50	225.00	88.50
28	312.50	155.00	272.50	162.50	262.50	142.50	242.50	142.50
42	410.00	137.50	370.00	150.00	355.00	170.00	345.00	145.00
56	362.50	122.50	350.00	122.50	322.50	137.50	330.00	107.50
70	382.50	147.50	387.50	120.50	372.50	100.00	370.00	100.00
84	420.00	150.00	425.00	110.00	392.50	137.50	397.50	115.00
98	425.00	110.00	425.00	102.50	382.50	147.50	365.00	140.00
112	412.50	152.50	417.50	122.50	377.50	152.50	372.50	107.50
126	410.00	145.00	412.50	125.00	377.50	172.50	375.00	122.50
140	390.00	140.00	390.00	112.50	347.50	152.50	340.00	122.50
154	345.00	165.00	365.00	142.50	342.50	152.50	337.50	112.50
168	397.50	162.50	432.50	115.00	395.00	142.50	377.50	110.00
182	410.00	152.50	432.50	120.00	395.00	132.50	380.00	110.00
196	372.50	122.50	372.50	132.50	340.00	165.00	337.50	117.50

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งทั้งหมดที่สะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ จ.7 ค่าของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ระยะห่างวันที่ เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
3	1	4.47	1.92	3.85	2.31	3.70	2.12	3.61	2.07
12	4	6.99	3.91	6.28	3.33	6.35	2.24	5.77	2.27
28	7	14.02	6.95	12.23	7.29	11.78	6.39	10.88	6.39
42	7	18.40	6.17	16.60	6.73	15.93	7.63	15.48	6.51
56	7	16.27	5.50	15.70	5.50	14.47	6.17	14.81	4.82
70	7	17.16	6.62	17.39	5.41	16.71	4.49	16.60	4.49
84	7	18.85	6.73	19.07	4.94	17.61	6.17	17.84	5.16
98	7	19.07	4.94	19.07	4.60	17.16	6.62	16.38	6.28
112	7	18.51	6.84	18.73	5.50	16.94	6.84	16.71	4.82
126	7	18.40	6.51	18.51	5.61	16.94	7.74	16.83	5.50
140	7	17.50	6.28	17.50	5.05	15.59	6.84	15.26	5.50
154	14	30.96	14.81	32.76	12.79	30.74	13.69	30.29	10.10
168	7	17.84	7.29	19.41	5.16	17.72	6.39	16.94	4.94
182	7	18.40	6.84	19.41	5.38	17.72	5.95	17.05	4.94
196	7	16.71	5.50	16.71	5.95	15.26	7.40	15.14	5.27

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ จ.8 อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.014	0.006	0.012	0.007	0.012	0.007	0.011	0.007
12	0.062	0.034	0.054	0.033	0.056	0.022	0.051	0.024
28	0.169	0.083	0.148	0.084	0.145	0.063	0.133	0.067
42	0.279	0.125	0.250	0.127	0.241	0.112	0.227	0.108
56	0.393	0.163	0.359	0.164	0.345	0.150	0.330	0.141
70	0.501	0.205	0.469	0.198	0.448	0.185	0.435	0.171
84	0.614	0.248	0.581	0.231	0.552	0.224	0.540	0.204
98	0.736	0.281	0.701	0.260	0.658	0.268	0.644	0.244
112	0.855	0.318	0.822	0.293	0.766	0.311	0.748	0.279
126	0.972	0.359	0.937	0.331	0.872	0.361	0.853	0.313
140	1.087	0.402	1.053	0.367	0.978	0.405	0.956	0.347
154	1.186	0.449	1.158	0.408	1.076	0.448	1.053	0.379
168	1.298	0.498	1.282	0.442	1.190	0.490	1.162	0.411
182	1.414	0.541	1.406	0.475	1.304	0.528	1.272	0.441
196	1.522	0.580	1.518	0.511	1.405	0.574	1.371	0.475

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์

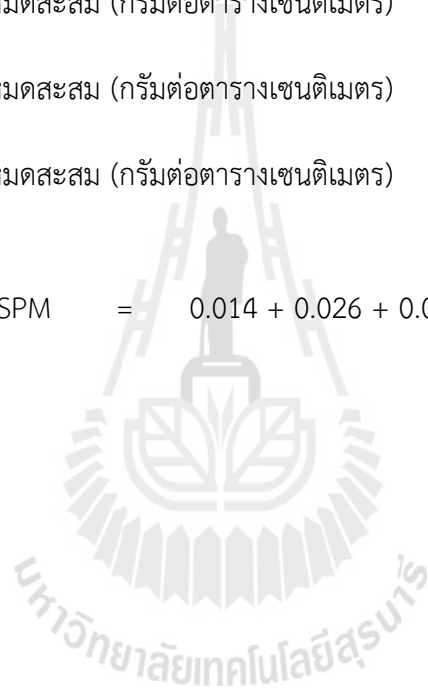
นำค่าที่ได้จากตารางที่ จ.7 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{4.47 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.014$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{8.09 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.026$

คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{6.99 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.022$

อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในคอลัมน์ SPM = $0.014 + 0.026 + 0.022 = 0.062$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ตารางที่ จ.9 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งทั้งหมดในน้ำเข้า - น้ำออก ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KPO (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	1205.00								
3	1222.50	810.00	645.00	832.50	712.50	837.50	737.50	855.00	762.50
12	1205.00	767.50	617.50	805.00	670.00	810.00	687.50	835.00	700.00
28	1232.50	750.00	552.50	772.50	592.50	780.00	632.50	795.00	672.50
42	1250.00	720.00	540.00	755.00	585.00	757.50	612.50	780.00	640.00
56	1200.00	722.50	525.00	735.00	565.00	745.00	582.50	755.00	640.00
70	1190.00	710.00	520.00	720.00	547.50	735.00	577.50	735.00	605.00
84	1232.50	702.50	502.50	710.00	527.50	710.00	565.00	715.00	580.00
98	1210.00	717.50	497.50	705.00	532.50	710.00	597.50	705.00	582.50
112	1195.00	707.50	500.00	707.50	540.00	705.00	565.00	715.00	577.50
126	1200.00	710.00	492.50	700.00	540.00	707.50	575.00	700.00	565.00
140	1200.00	705.00	497.50	705.00	535.00	700.00	575.00	700.00	587.50
154	1205.00	702.50	497.50	710.00	535.00	705.00	580.00	705.00	565.00
168	1250.00	692.50	490.00	710.00	532.50	710.00	572.50	700.00	565.00
182	1190.00	700.00	482.50	705.00	537.50	710.00	562.50	705.00	565.00
196	1195.00	697.50	477.50	707.50	520.00	705.00	567.50	695.00	565.00

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งทั้งหมดในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) - (9) คือของแข็งทั้งหมดที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ จ.10 ค่าของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	412.50	165.00	390.00	120.00	385.00	100.00	367.50	92.50
12	437.50	150.00	400.00	135.00	395.00	122.50	370.00	135.00
28	482.50	197.50	460.00	180.00	452.50	147.50	437.50	122.50
42	530.00	180.00	495.00	170.00	492.50	145.00	470.00	140.00
56	477.50	197.50	465.00	170.00	455.00	162.50	445.00	115.00
70	480.00	190.00	470.00	172.50	455.00	157.50	455.00	130.00
84	530.00	200.00	522.50	182.50	522.50	145.00	517.50	135.00
98	492.50	220.00	505.00	172.50	500.00	112.50	505.00	122.50
112	487.50	207.50	487.50	167.50	490.00	140.00	480.00	137.50
126	490.00	217.50	500.00	160.00	492.50	132.50	500.00	135.00
140	495.00	207.50	495.00	170.00	500.00	125.00	500.00	112.50
154	502.50	205.00	495.00	175.00	500.00	125.00	500.00	140.00
168	557.50	202.50	540.00	177.50	540.00	137.50	550.00	135.00
182	490.00	217.50	485.00	167.50	480.00	147.50	485.00	140.00
196	497.50	220.00	487.50	187.50	490.00	137.50	500.00	130.00

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งทั้งหมดที่สะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ จ.11 ค่าของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ระยะห่างวันที่ เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งทั้งหมดสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
3	1	7.93	3.17	7.50	2.31	7.40	1.92	7.07	1.78
12	4	11.22	3.85	10.26	3.46	10.13	3.14	9.49	3.46
28	7	21.65	8.86	20.64	8.08	20.30	6.62	19.63	5.50
42	7	23.78	8.08	22.21	7.63	22.10	6.51	21.09	6.28
56	7	21.43	8.86	20.86	7.63	20.42	7.29	19.97	5.16
70	7	21.54	8.53	21.09	7.74	20.42	7.07	20.42	5.83
84	7	23.78	8.97	23.44	8.19	23.44	6.51	23.22	6.06
98	7	22.10	9.87	22.66	7.74	22.44	5.05	22.66	5.50
112	7	21.87	9.31	21.87	7.52	21.99	6.28	21.54	6.17
126	7	21.99	9.76	22.43	7.18	22.10	5.95	22.43	6.06
140	7	22.21	9.31	22.21	7.63	22.43	5.61	22.43	5.05
154	14	45.09	18.40	44.42	15.70	44.87	11.22	44.87	12.56
168	7	25.02	9.09	24.23	7.96	24.23	6.17	24.68	6.06
182	7	21.99	9.76	21.76	7.52	21.54	6.62	21.76	6.28
196	7	22.32	9.87	21.87	8.41	21.99	6.17	22.43	5.83

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ จ .12 อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SC0	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.025	0.010	0.024	0.007	0.024	0.006	0.023	0.006
12	0.104	0.037	0.096	0.031	0.095	0.029	0.089	0.030
28	0.257	0.099	0.242	0.083	0.237	0.075	0.226	0.071
42	0.400	0.153	0.376	0.127	0.370	0.116	0.353	0.110
56	0.536	0.209	0.510	0.174	0.500	0.160	0.479	0.146
70	0.674	0.265	0.646	0.224	0.631	0.206	0.609	0.182
84	0.824	0.320	0.793	0.276	0.777	0.249	0.755	0.219
98	0.969	0.384	0.940	0.323	0.922	0.285	0.903	0.251
112	1.116	0.445	1.087	0.369	1.070	0.322	1.050	0.288
126	1.260	0.507	1.231	0.417	1.214	0.360	1.194	0.328
140	1.402	0.567	1.373	0.466	1.355	0.397	1.338	0.362
154	1.546	0.626	1.515	0.516	1.498	0.433	1.481	0.402
168	1.695	0.685	1.661	0.564	1.645	0.470	1.629	0.441
182	1.837	0.745	1.800	0.613	1.783	0.511	1.768	0.481
196	1.984	0.807	1.944	0.665	1.927	0.551	1.914	0.518

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์

นำค่าที่ได้จากตารางที่ จ.11 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง

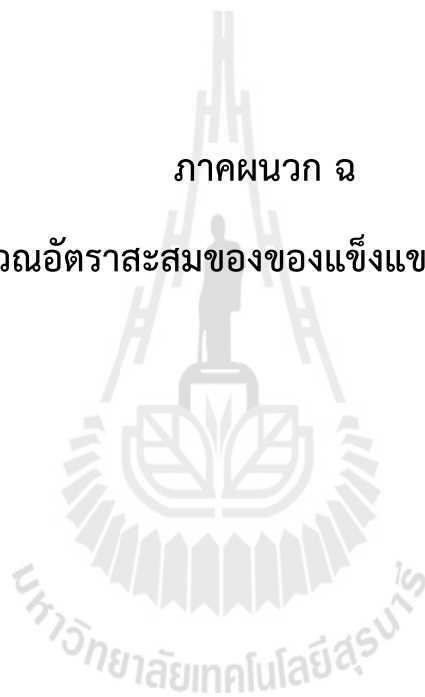
คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	=	$\frac{7.93 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$	=	0.025
คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	=	$\frac{13.38 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$	=	0.043
คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	=	$\frac{11.22 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}}$	=	0.036

อัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในคอลัมน์ SPM = $0.025 + 0.043 + 0.036 = 0.104$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาคผนวก ฉ

การคำนวณอัตราสะสมของเชิงแขวนลอยในระบบ



ตารางที่ ฉ.1 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้า – น้ำออก ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KP0 (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	90.00								
3	95.00	82.50	20.00	87.50	20.00	87.50	25.00	90.00	27.50
12	102.50	80.00	22.50	80.00	20.00	87.50	22.50	85.00	22.50
28	95.00	70.00	17.50	77.50	17.50	72.50	17.50	77.50	20.00
42	110.00	65.00	13.75	67.50	15.00	67.50	15.00	80.00	17.50
56	130.00	80.00	15.00	62.50	17.50	77.50	17.50	82.50	22.50
70	125.00	75.00	17.50	70.00	12.50	75.00	17.50	80.00	27.50
84	112.50	70.00	12.50	67.50	17.50	72.50	20.00	77.50	25.00
98	130.00	70.00	10.00	65.00	15.00	75.00	20.00	82.50	25.00
112	117.50	72.50	12.50	62.50	15.00	72.50	17.50	80.00	25.00
126	132.50	65.00	12.50	62.50	15.00	70.00	17.50	75.00	20.00
140	130.00	60.00	10.00	60.00	12.50	70.00	15.00	70.00	20.00
154	127.50	57.50	12.50	67.50	17.50	72.50	17.50	80.00	22.50
168	132.50	62.50	15.00	67.50	15.00	85.00	15.00	80.00	19.50
182	135.00	65.00	15.25	70.00	12.50	70.00	12.50	77.50	25.00
196	130.00	62.50	15.00	62.50	15.00	70.00	17.50	75.00	17.50

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) – (9) คือของแข็งแขวนลอยที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ๑.2 ค่าของของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	12.50	62.50	7.50	67.50	7.50	62.50	5.00	62.50
12	22.50	57.50	22.50	60.00	15.00	65.00	17.50	62.50
28	25.00	52.50	17.50	60.00	22.50	55.00	17.50	57.50
42	45.00	51.25	42.50	52.50	42.50	52.50	30.00	62.50
56	50.00	65.00	67.50	45.00	52.50	60.00	47.50	60.00
70	50.00	57.50	55.00	57.50	50.00	57.50	45.00	52.50
84	42.50	57.50	45.00	50.00	40.00	52.50	35.00	52.50
98	60.00	60.00	65.00	50.00	55.00	55.00	47.50	57.50
112	45.00	60.00	55.00	47.50	45.00	55.00	37.50	55.00
126	67.50	52.50	70.00	47.50	62.50	52.50	57.50	55.00
140	70.00	50.00	70.00	47.50	60.00	55.00	60.00	50.00
154	70.00	45.00	60.00	50.00	55.00	55.00	47.50	57.50
168	70.00	47.50	65.00	52.50	47.50	70.00	52.50	60.50
182	70.00	49.75	65.00	57.50	65.00	57.50	57.50	52.50
196	67.50	47.50	67.50	47.50	60.00	52.50	55.00	57.50

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งแขวนลอยที่สะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ๓.3 ค่าของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
3	1	0.24	1.20	0.14	1.30	0.14	1.20	0.10	1.20
12	4	0.58	1.47	0.58	1.54	0.38	1.67	0.45	1.60
28	7	1.12	2.36	0.79	2.69	1.01	2.47	0.79	2.58
42	7	2.02	2.30	1.91	2.36	1.91	2.36	1.35	2.80
56	7	2.24	2.92	3.03	2.02	2.36	2.69	2.13	2.69
70	7	2.24	2.58	2.47	2.58	2.24	2.58	2.02	2.36
84	7	1.91	2.58	2.02	2.24	1.79	2.36	1.57	2.36
98	7	2.69	2.69	2.92	2.24	2.47	2.47	2.13	2.58
112	7	2.02	2.69	2.47	2.13	2.02	2.47	1.68	2.47
126	7	3.03	2.36	3.14	2.13	2.80	2.36	2.58	2.47
140	7	3.14	2.24	3.14	2.13	2.69	2.47	2.69	2.24
154	14	6.28	4.04	5.38	4.49	4.94	4.94	4.26	5.16
168	7	3.14	2.13	2.92	2.36	2.13	3.14	2.36	2.71
182	7	3.14	2.23	2.92	2.58	2.92	2.58	2.58	2.36
196	7	3.03	2.13	3.03	2.13	2.69	2.36	2.47	2.58

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวินาที

ตารางที่ ๑.4 อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.001	0.004	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000	0.004
12	0.004	0.015	0.003	0.016	0.002	0.016	0.002	0.015
28	0.013	0.032	0.008	0.038	0.009	0.035	0.007	0.035
42	0.025	0.048	0.019	0.053	0.020	0.050	0.017	0.051
56	0.039	0.066	0.037	0.067	0.035	0.067	0.030	0.068
70	0.053	0.083	0.053	0.083	0.050	0.084	0.043	0.083
84	0.067	0.099	0.067	0.098	0.062	0.100	0.055	0.098
98	0.080	0.116	0.082	0.112	0.074	0.116	0.066	0.113
112	0.094	0.133	0.099	0.126	0.087	0.132	0.077	0.130
126	0.122	0.157	0.128	0.147	0.113	0.155	0.100	0.154
140	0.152	0.177	0.155	0.168	0.137	0.179	0.123	0.177
154	0.161	0.183	0.163	0.174	0.144	0.187	0.129	0.185
168	0.180	0.197	0.181	0.191	0.160	0.205	0.145	0.202
182	0.198	0.213	0.199	0.206	0.177	0.222	0.160	0.217
196	0.113	0.149	0.119	0.140	0.105	0.147	0.093	0.146

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในแต่ละคอลัมน์

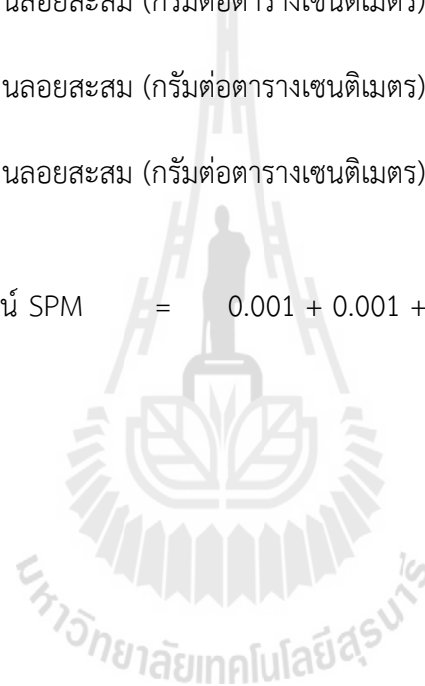
นำค่าที่ได้จากตารางที่ ๑.3 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งแขวนลอยสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{0.24 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.001$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งแขวนลอยสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{0.32 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.001$

คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งแขวนลอยสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{0.58 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.002$

อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในคอลัมน์ SPM = $0.001 + 0.001 + 0.002 = 0.004$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ตารางที่ ๕.5 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้า – น้ำออก ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KP0 (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	175.00								
3	180.00	95.00	27.50	82.50	30.00	90.00	27.50	92.50	30.00
12	180.00	87.50	25.00	87.50	25.00	87.50	22.50	92.50	27.50
28	177.50	77.50	22.50	82.50	22.50	80.00	25.00	87.50	25.00
42	185.00	75.00	17.50	82.50	27.50	85.00	25.00	82.50	22.50
56	202.50	82.50	25.00	87.50	27.50	92.50	27.50	92.50	27.50
70	192.50	87.50	22.50	82.50	29.50	85.00	27.50	87.50	30.00
84	212.50	85.00	20.00	87.50	27.50	77.50	30.00	87.50	25.00
98	217.50	87.50	22.50	80.00	27.50	82.50	25.00	82.50	25.00
112	212.50	85.00	20.00	80.00	22.50	82.50	25.00	92.50	25.00
126	207.50	80.00	20.00	77.50	17.50	80.00	20.00	85.00	22.50
140	202.50	75.00	17.50	75.00	20.00	75.00	22.50	75.00	22.50
154	205.00	80.00	20.00	77.50	20.00	82.50	20.00	72.50	20.00
168	210.00	77.50	25.00	75.00	22.50	75.00	22.50	77.50	20.00
182	197.50	82.50	20.00	72.50	22.50	77.50	25.00	75.00	25.00
196	207.50	80.00	22.50	75.00	20.00	72.50	20.00	72.50	22.50

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) – (9) คือของแข็งแขวนลอยที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ๘.6 ค่าของของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	85.00	67.50	97.50	52.50	90.00	62.50	87.50	62.50
12	92.50	62.50	92.50	62.50	92.50	65.00	87.50	65.00
28	100.00	55.00	95.00	60.00	97.50	55.00	90.00	62.50
42	110.00	57.50	102.50	55.00	100.00	60.00	102.50	60.00
56	120.00	57.50	115.00	60.00	110.00	65.00	110.00	65.00
70	105.00	65.00	110.00	53.00	107.50	57.50	105.00	57.50
84	127.50	65.00	125.00	60.00	135.00	47.50	125.00	62.50
98	130.00	65.00	137.50	52.50	135.00	57.50	135.00	57.50
112	127.50	65.00	132.50	57.50	130.00	57.50	120.00	67.50
126	127.50	60.00	130.00	60.00	127.50	60.00	122.50	62.50
140	127.50	57.50	127.50	55.00	127.50	52.50	127.50	52.50
154	125.00	60.00	127.50	57.50	122.50	62.50	132.50	52.50
168	132.50	52.50	135.00	52.50	135.00	52.50	132.50	57.50
182	115.00	62.50	125.00	50.00	120.00	52.50	122.50	50.00
196	127.50	57.50	132.50	55.00	135.00	52.50	135.00	50.00

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งแขวนลอยที่สะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ๗.7 ค่าของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
8	5	3.12	1.92	3.12	1.92	3.12	2.00	2.80	2.16
12	4	2.37	1.60	2.37	1.60	2.37	1.67	2.24	1.67
28	7	4.49	2.47	4.26	2.69	4.37	2.47	4.04	2.80
42	7	4.94	2.58	4.60	2.47	4.49	2.69	4.60	2.69
56	7	5.38	2.58	5.16	2.69	4.94	2.92	4.94	2.92
70	7	4.71	2.92	4.94	2.38	4.82	2.58	4.71	2.58
84	7	5.72	2.92	5.61	2.69	6.06	2.13	5.61	2.80
98	7	5.83	2.92	6.17	2.36	6.06	2.58	6.06	2.58
112	7	5.72	2.92	5.95	2.58	5.83	2.58	5.38	3.03
126	7	5.72	2.69	5.83	2.69	5.72	2.69	5.50	2.80
140	7	5.72	2.58	5.72	2.47	5.72	2.36	5.72	2.36
154	14	11.22	5.38	11.44	5.16	10.99	5.61	11.89	4.71
168	7	5.95	2.36	6.06	2.36	6.06	2.36	5.95	2.58
182	7	5.16	2.80	5.61	2.24	5.38	2.36	5.50	2.24
196	7	5.72	2.58	5.95	2.47	6.06	2.36	6.06	2.24

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ ๘.๘ อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.005	0.004	0.006	0.003	0.006	0.004	0.005	0.004
12	0.023	0.015	0.023	0.014	0.023	0.016	0.021	0.016
28	0.056	0.034	0.056	0.034	0.056	0.034	0.052	0.037
42	0.087	0.051	0.087	0.049	0.087	0.051	0.081	0.055
56	0.120	0.068	0.119	0.066	0.117	0.069	0.111	0.073
70	0.153	0.087	0.152	0.083	0.150	0.086	0.143	0.090
84	0.188	0.105	0.187	0.099	0.186	0.102	0.178	0.108
98	0.227	0.122	0.226	0.114	0.225	0.118	0.216	0.124
112	0.263	0.140	0.264	0.131	0.261	0.135	0.250	0.143
126	0.300	0.157	0.301	0.147	0.297	0.152	0.285	0.161
140	0.335	0.173	0.336	0.163	0.332	0.167	0.319	0.176
154	0.371	0.191	0.373	0.179	0.367	0.185	0.357	0.191
168	0.407	0.206	0.409	0.194	0.404	0.201	0.394	0.207
182	0.442	0.223	0.446	0.209	0.440	0.218	0.431	0.222
196	0.479	0.241	0.485	0.225	0.479	0.233	0.471	0.237

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์

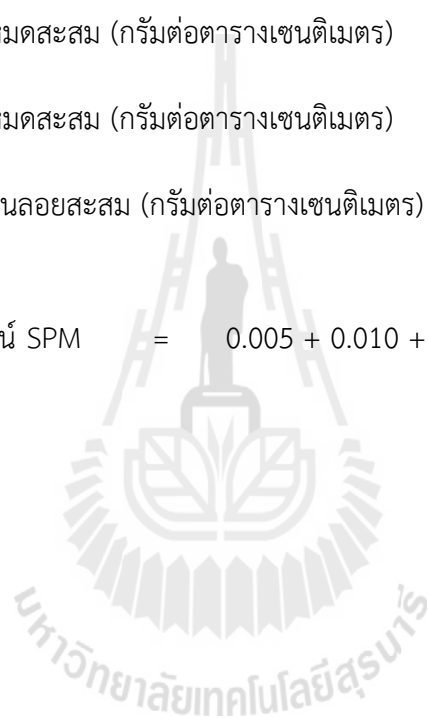
นำค่าที่ได้จากตารางที่ ๑.7 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{1.63 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.005$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{3.12 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.010$

คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งแขวนลอยสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{2.37 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.008$

อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในคอลัมน์ SPM = $0.005 + 0.010 + 0.008 = 0.023$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ตารางที่ ๘.๙ ผลการตรวจวัดค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้า - น้ำออก ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KP0 (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	315.00								
3	332.50	95.00	30.00	92.50	15.00	95.00	35.00	95.00	30.00
12	310.00	87.50	32.50	84.00	30.00	92.50	32.50	92.50	30.00
28	312.50	85.00	25.00	80.00	22.50	85.00	32.50	87.50	27.50
42	335.00	85.00	27.50	82.50	25.00	82.50	27.50	82.50	22.50
56	315.00	85.00	30.00	92.50	27.50	87.50	27.50	87.50	27.50
70	312.50	92.50	25.00	87.50	30.00	82.50	27.50	85.00	27.50
84	317.50	90.00	25.00	87.50	27.50	82.50	30.00	82.50	22.50
98	335.00	90.00	25.00	87.50	27.50	82.50	27.50	82.50	27.50
112	320.00	82.50	25.00	85.00	22.50	85.00	22.50	87.50	27.50
126	325.00	85.00	20.00	87.50	22.50	87.50	20.00	82.50	25.00
140	337.50	80.00	22.50	85.00	20.00	82.50	20.00	82.50	30.00
154	322.50	80.00	20.00	87.50	22.50	82.50	25.00	87.50	25.00
168	337.50	77.50	22.50	85.00	20.00	80.00	17.50	77.50	22.50
182	320.00	80.00	20.00	80.00	20.00	77.50	20.00	77.50	21.25
196	325.00	80.00	15.00	77.50	17.50	72.50	22.50	77.50	22.50

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) - (9) คือของแข็งแขวนลอยที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ฉ.10 ค่าของของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	237.50	65.00	240.00	77.50	237.50	60.00	237.50	65.00
12	222.50	55.00	226.00	54.00	217.50	60.00	217.50	62.50
28	227.50	60.00	232.50	57.50	227.50	52.50	225.00	60.00
42	250.00	57.50	252.50	57.50	252.50	55.00	252.50	60.00
56	230.00	55.00	222.50	65.00	227.50	60.00	227.50	60.00
70	220.00	67.50	225.00	57.50	230.00	55.00	227.50	57.50
84	227.50	65.00	230.00	60.00	235.00	52.50	235.00	60.00
98	245.00	65.00	247.50	60.00	252.50	55.00	252.50	55.00
112	237.50	57.50	235.00	62.50	235.00	62.50	232.50	60.00
126	240.00	65.00	237.50	65.00	237.50	67.50	242.50	57.50
140	257.50	57.50	252.50	65.00	255.00	62.50	255.00	52.50
154	242.50	60.00	235.00	65.00	240.00	57.50	235.00	62.50
168	260.00	55.00	252.50	65.00	257.50	62.50	260.00	55.00
182	240.00	60.00	240.00	60.00	242.50	57.50	242.50	56.25
196	245.00	65.00	247.50	60.00	252.50	50.00	247.50	55.00

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งแขวนลอยที่สะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ฉ.11 ค่าของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ระยะห่างวันที่ เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งแขวนลอยสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
3	1	4.57	1.25	4.62	1.49	4.57	1.15	4.57	1.25
12	4	5.70	1.41	5.79	1.38	5.58	1.54	5.58	1.60
28	7	10.21	2.69	10.43	2.58	10.21	2.36	10.10	2.69
42	7	11.22	2.58	11.33	2.58	11.33	2.47	11.33	2.69
56	7	10.32	2.47	9.98	2.92	10.21	2.69	10.21	2.69
70	7	9.87	3.03	10.10	2.58	10.32	2.47	10.21	2.58
84	7	10.21	2.92	10.32	2.69	10.54	2.36	10.54	2.69
98	7	10.99	2.92	11.11	2.69	11.33	2.47	11.33	2.47
112	7	10.66	2.58	10.54	2.80	10.54	2.80	10.43	2.69
126	7	10.77	2.92	10.66	2.92	10.66	3.03	10.88	2.58
140	7	11.55	2.58	11.33	2.92	11.44	2.80	11.44	2.36
154	14	21.76	5.38	21.09	5.83	21.54	5.16	21.09	5.61
168	7	11.67	2.47	11.33	2.92	11.55	2.80	11.67	2.47
182	7	10.77	2.69	10.77	2.69	10.88	2.58	10.88	2.52
196	7	10.99	2.92	11.11	2.69	11.33	2.24	11.11	2.47

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ ฉ.12 อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SC0	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.015	0.004	0.015	0.005	0.015	0.004	0.015	0.004
12	0.057	0.015	0.058	0.016	0.057	0.014	0.057	0.016
28	0.134	0.034	0.137	0.034	0.134	0.032	0.133	0.036
42	0.202	0.051	0.206	0.050	0.203	0.047	0.201	0.054
56	0.266	0.068	0.270	0.068	0.267	0.063	0.266	0.070
70	0.332	0.088	0.337	0.085	0.336	0.080	0.334	0.087
84	0.397	0.106	0.403	0.102	0.404	0.095	0.402	0.104
98	0.466	0.124	0.471	0.120	0.476	0.110	0.473	0.119
112	0.534	0.142	0.539	0.138	0.544	0.127	0.540	0.136
126	0.603	0.160	0.609	0.155	0.613	0.145	0.610	0.152
140	0.676	0.176	0.680	0.174	0.685	0.163	0.682	0.168
154	0.745	0.193	0.747	0.192	0.753	0.180	0.749	0.186
168	0.816	0.210	0.816	0.210	0.824	0.196	0.820	0.202
182	0.884	0.227	0.885	0.225	0.892	0.212	0.888	0.220
196	0.953	0.245	0.954	0.242	0.963	0.227	0.958	0.235

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์

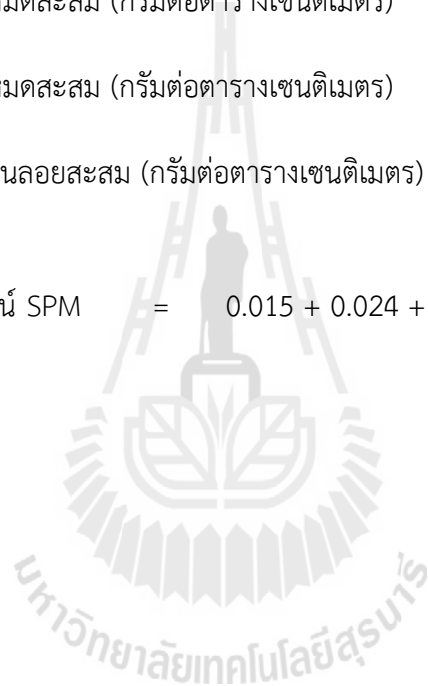
นำค่าที่ได้จากตารางที่ ฉ.11 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{4.57 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.015$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{7.77 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.024$

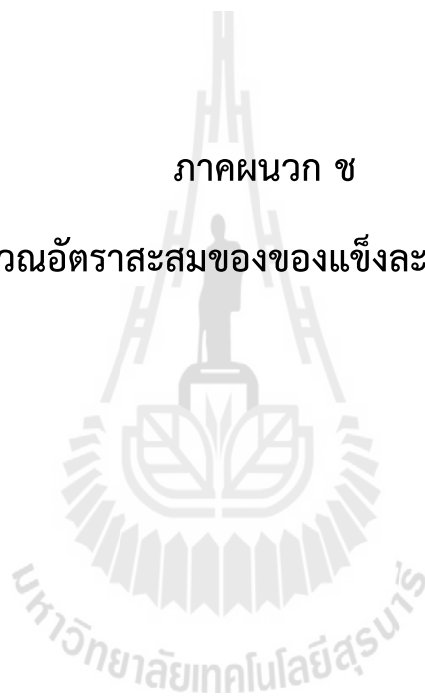
คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งแขวนลอยสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{5.70 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.018$

อัตราสะสมของแข็งแขวนลอยในคอลัมน์ SPM = $0.015 + 0.024 + 0.018 = 0.057$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาคผนวก ข

การคำนวณอัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในระบบ



ตารางที่ ข.1 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำเข้า - น้ำออก ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KP0 (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	347.50								
3	347.50	267.50	220.00	285.00	270.00	290.00	272.50	277.50	272.50
12	410.00	205.00	161.50	287.50	205.00	290.00	240.00	295.00	242.50
28	410.00	165.00	80.00	210.00	120.00	240.00	202.50	247.50	210.00
42	375.00	145.00	76.25	187.50	112.50	215.00	197.50	220.00	197.50
56	372.50	120.00	65.00	172.50	92.50	177.50	157.50	197.50	162.50
70	380.00	120.00	67.50	155.00	92.50	175.00	145.00	190.00	165.00
84	395.00	112.50	65.00	150.00	75.00	167.50	137.50	187.50	152.50
98	377.50	110.00	85.00	155.00	72.50	167.50	132.50	170.00	157.50
112	385.00	112.50	67.50	142.50	72.50	160.00	141.25	170.00	155.00
126	367.50	125.00	62.50	130.00	67.50	165.00	127.50	187.50	162.50
140	377.50	125.00	77.50	147.50	77.50	167.50	132.50	195.00	165.00
154	375.00	135.00	72.50	125.00	67.50	155.00	125.00	167.50	160.00
168	365.00	157.50	72.50	142.50	77.50	145.00	132.50	167.50	168.00
182	362.50	140.00	64.75	127.50	77.50	162.50	122.50	182.50	162.50
196	375.00	122.50	62.50	147.50	67.50	162.50	125.00	175.00	167.50

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งละลายน้ำในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) - (9) คือของแข็งละลายน้ำที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.2 ค่าของของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	80.00	47.50	62.50	15.00	57.50	17.50	70.00	5.00
12	205.00	43.50	122.50	82.50	120.00	50.00	115.00	52.50
28	245.00	85.00	200.00	90.00	170.00	37.50	162.50	37.50
42	230.00	68.75	187.50	75.00	160.00	17.50	155.00	22.50
56	252.50	55.00	200.00	80.00	195.00	20.00	175.00	35.00
70	260.00	52.50	225.00	62.50	205.00	30.00	190.00	25.00
84	282.50	47.50	245.00	75.00	227.50	30.00	207.50	35.00
98	267.50	25.00	222.50	82.50	210.00	35.00	207.50	12.50
112	272.50	45.00	242.50	70.00	225.00	18.75	215.00	15.00
126	242.50	62.50	237.50	62.50	202.50	37.50	180.00	25.00
140	252.50	47.50	230.00	70.00	210.00	35.00	182.50	30.00
154	240.00	62.50	250.00	57.50	220.00	30.00	207.50	7.50
168	207.50	85.00	222.50	65.00	220.00	12.50	197.50	0.50
182	222.50	75.25	235.00	50.00	200.00	40.00	180.00	20.00
196	252.50	60.00	227.50	80.00	212.50	37.50	200.00	7.50

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งละลายน้ำที่สะสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.3 ค่าของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	ระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-	1.54	0.91	1.20	0.29	1.11	0.34	1.35	0.10
3	1	2.96	1.92	1.76	1.36	2.40	0.40	1.84	0.72
12	4	5.26	1.12	3.14	2.12	3.08	1.28	2.95	1.35
28	7	8.41	3.37	6.62	3.25	5.27	1.01	4.60	1.57
42	7	10.77	2.58	8.97	3.03	8.53	1.01	7.63	1.57
56	7	11.33	2.13	9.53	2.80	9.09	0.79	7.96	1.79
70	7	11.78	2.24	10.54	2.80	9.53	0.67	8.64	1.46
84	7	12.68	1.57	11.22	3.14	10.54	1.46	9.42	1.23
98	7	11.55	2.13	9.98	3.25	9.53	1.46	8.97	0.79
112	7	11.50	1.79	9.59	3.59	9.03	1.35	9.03	0.00
126	7	10.88	2.80	10.66	2.80	9.09	1.68	8.08	1.12
140	7	11.33	2.13	10.32	3.14	9.42	1.57	8.19	1.35
154	14	21.54	5.61	22.44	5.16	19.74	2.69	18.62	0.67
168	7	9.31	3.81	9.98	2.92	9.87	0.56	8.84	0.00
182	7	9.98	3.38	10.54	2.24	8.97	1.79	8.08	0.90
196	7	11.33	2.69	10.21	3.59	9.53	1.68	8.97	0.34

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ ข.4 อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 1

วันที่	อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.005	0.003	0.004	0.001	0.004	0.001	0.004	0.000
12	0.031	0.013	0.019	0.012	0.021	0.006	0.020	0.007
28	0.104	0.043	0.077	0.041	0.070	0.019	0.066	0.019
42	0.164	0.063	0.125	0.063	0.110	0.024	0.103	0.027
56	0.234	0.079	0.182	0.084	0.165	0.030	0.152	0.037
70	0.307	0.094	0.245	0.102	0.223	0.037	0.205	0.046
84	0.385	0.108	0.313	0.121	0.286	0.044	0.262	0.056
98	0.464	0.116	0.381	0.143	0.350	0.053	0.322	0.062
112	0.540	0.129	0.447	0.163	0.412	0.061	0.381	0.066
126	0.611	0.144	0.512	0.184	0.470	0.070	0.436	0.070
140	0.683	0.159	0.578	0.204	0.529	0.081	0.490	0.076
154	0.751	0.177	0.650	0.220	0.592	0.090	0.549	0.078
168	0.814	0.201	0.717	0.238	0.654	0.096	0.606	0.081
182	0.876	0.222	0.782	0.254	0.712	0.106	0.659	0.086
196	0.950	0.237	0.848	0.277	0.775	0.115	0.717	0.087

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในแต่ละคอลัมน์

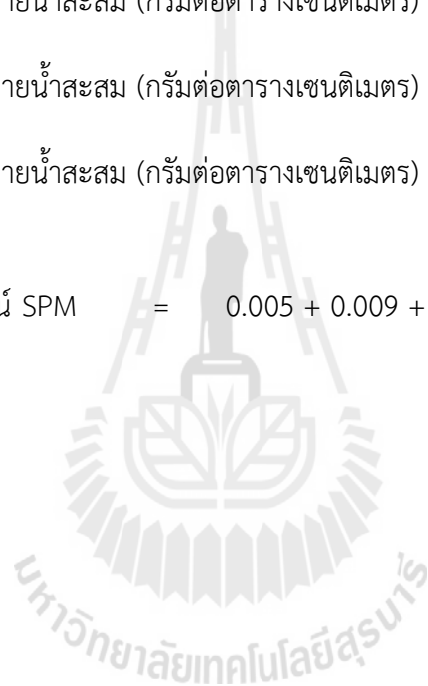
นำค่าที่ได้จากตารางที่ ข.3 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งละลายน้ำสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{1.54 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.005$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งละลายน้ำสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{2.96 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.009$

คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งละลายน้ำสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{5.26 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.017$

อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในคอลัมน์ SPM = $0.005 + 0.009 + 0.017 = 0.031$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ตารางที่ ข.5 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำเข้า - น้ำออก ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KP0 (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	635.00								
3	640.00	492.50	460.00	537.50	470.00	537.50	490.00	540.00	495.00
12	652.50	472.50	382.50	500.00	432.50	497.50	475.00	515.00	491.50
28	652.50	440.00	340.00	475.00	372.50	487.50	400.00	500.00	420.00
42	712.50	412.50	332.50	445.00	350.00	457.50	347.50	470.00	385.00
56	630.00	387.50	322.50	395.00	332.50	417.50	345.00	410.00	367.50
70	665.00	387.50	305.00	387.50	320.00	400.00	357.50	400.00	357.50
84	665.00	372.50	287.50	365.00	315.00	407.50	317.50	392.50	340.00
98	650.00	355.00	310.00	362.50	312.50	402.50	312.50	420.00	337.50
112	662.50	377.50	290.00	377.50	312.50	415.00	320.00	410.00	370.00
126	667.50	385.00	300.00	385.00	320.00	417.50	305.00	415.00	355.00
140	635.00	372.50	290.00	372.50	315.00	415.00	315.00	422.50	352.50
154	625.00	405.00	300.00	387.50	302.50	405.00	315.00	420.00	360.00
168	665.00	400.00	290.00	367.50	305.00	405.00	315.00	420.00	367.50
182	677.50	382.50	292.50	370.00	300.00	402.50	322.50	420.00	360.00
196	622.50	377.50	312.50	382.50	305.00	417.50	305.00	420.00	352.50

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งละลายน้ำในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) - (9) คือของแข็งละลายน้ำที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.6 ค่าของของแข็งละลายน้ำที่ผสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ของแข็งละลายน้ำที่ผสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SCO (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KPO (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0								
3	147.50	32.50	102.50	67.50	102.50	47.50	100.00	45.00
12	180.00	90.00	152.50	67.50	155.00	22.50	137.50	23.50
28	212.50	100.00	177.50	102.50	165.00	87.50	152.50	80.00
42	300.00	80.00	267.50	95.00	255.00	110.00	242.50	85.00
56	242.50	65.00	235.00	62.50	212.50	72.50	220.00	42.50
70	277.50	82.50	277.50	67.50	265.00	42.50	265.00	42.50
84	292.50	85.00	300.00	50.00	257.50	90.00	272.50	52.50
98	295.00	45.00	287.50	50.00	247.50	90.00	230.00	82.50
112	285.00	87.50	285.00	65.00	247.50	95.00	252.50	40.00
126	282.50	85.00	282.50	65.00	250.00	112.50	252.50	60.00
140	262.50	82.50	262.50	57.50	220.00	100.00	212.50	70.00
154	220.00	105.00	237.50	85.00	220.00	90.00	205.00	60.00
168	265.00	110.00	297.50	62.50	260.00	90.00	245.00	52.50
182	295.00	90.00	307.50	70.00	275.00	80.00	257.50	60.00
196	245.00	65.00	240.00	77.50	205.00	112.50	202.50	67.50

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งละลายน้ำที่ผสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.7 ค่าของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	ระยะห่างวันที่ เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
3	1	2.84	0.62	1.97	1.30	1.97	0.91	1.92	0.87
12	4	4.62	2.31	3.91	1.73	3.97	0.58	3.53	0.60
28	7	9.53	4.49	7.96	4.60	7.40	3.93	6.84	3.59
42	7	13.46	3.59	12.00	4.26	11.44	4.94	10.88	3.81
56	7	10.88	2.92	10.54	2.80	9.53	3.25	9.87	1.91
70	7	12.45	3.70	12.45	3.03	11.89	1.91	11.89	1.91
84	7	13.12	3.81	13.46	2.24	11.55	4.04	12.23	2.36
98	7	13.24	2.02	12.90	2.24	11.11	4.04	10.32	3.70
112	7	12.79	3.93	12.79	2.92	11.11	4.26	11.33	1.79
126	7	12.68	3.81	12.68	2.92	11.22	5.05	11.33	2.69
140	7	11.78	3.70	11.78	2.58	9.87	4.49	9.53	3.14
154	14	19.74	9.42	21.31	7.63	19.74	8.08	18.40	5.38
168	7	11.89	4.94	13.35	2.80	11.67	4.04	10.99	2.36
182	7	13.24	4.04	13.80	3.14	12.34	3.59	11.55	2.69
196	7	10.99	2.92	10.77	3.48	9.20	5.05	9.09	3.03

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ ข.8 อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 2

วันที่	อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.009	0.002	0.006	0.004	0.006	0.003	0.006	0.003
12	0.040	0.019	0.030	0.018	0.033	0.006	0.030	0.008
28	0.112	0.049	0.092	0.050	0.089	0.029	0.081	0.030
42	0.192	0.074	0.163	0.077	0.155	0.061	0.146	0.054
56	0.273	0.095	0.240	0.098	0.228	0.081	0.219	0.069
70	0.348	0.119	0.317	0.115	0.298	0.099	0.292	0.081
84	0.426	0.143	0.394	0.132	0.366	0.122	0.363	0.096
98	0.509	0.159	0.475	0.145	0.433	0.150	0.428	0.119
112	0.592	0.178	0.558	0.162	0.505	0.176	0.498	0.136
126	0.672	0.202	0.636	0.184	0.575	0.209	0.568	0.152
140	0.752	0.228	0.717	0.204	0.646	0.237	0.637	0.171
154	0.815	0.258	0.785	0.229	0.709	0.263	0.696	0.188
168	0.891	0.292	0.872	0.248	0.786	0.289	0.767	0.204
182	0.972	0.318	0.960	0.265	0.864	0.311	0.841	0.219
196	1.043	0.339	1.033	0.286	0.926	0.340	0.900	0.238

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์

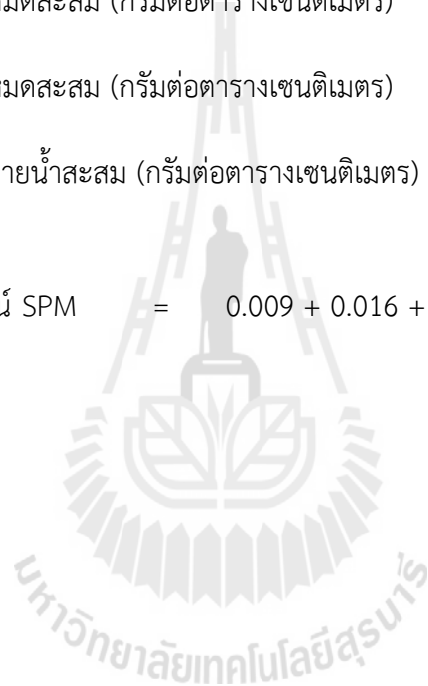
นำค่าที่ได้จากตารางที่ ข.7 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{2.84 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.009$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{4.97 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.016$

คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งละลายน้ำสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{4.62 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.015$

อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในคอลัมน์ SPM = $0.009 + 0.016 + 0.015 = 0.040$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ตารางที่ ข.9 ผลการตรวจวัดค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำเข้า - น้ำออก ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
	น้ำเข้า (1)	SPM (2)	SPO (3)	SCM (4)	SCO (5)	KPM (6)	KPO (7)	KCM (8)	KCO (9)
0	890.00								
3	890.00	715.00	615.00	740.00	697.50	742.50	702.50	760.00	732.50
12	895.00	680.00	585.00	721.00	640.00	717.50	655.00	742.50	670.00
28	920.00	665.00	527.50	692.50	570.00	695.00	600.00	707.50	645.00
42	915.00	635.00	512.50	672.50	560.00	675.00	585.00	697.50	617.50
56	885.00	637.50	495.00	642.50	537.50	657.50	555.00	667.50	612.50
70	877.50	617.50	495.00	632.50	517.50	652.50	550.00	650.00	577.50
84	915.00	612.50	477.50	622.50	500.00	627.50	535.00	632.50	557.50
98	875.00	627.50	472.50	617.50	505.00	627.50	570.00	622.50	555.00
112	875.00	625.00	475.00	622.50	517.50	620.00	542.50	627.50	550.00
126	875.00	625.00	472.50	612.50	517.50	620.00	555.00	617.50	540.00
140	862.50	625.00	475.00	620.00	515.00	617.50	555.00	617.50	557.50
154	882.50	622.50	477.50	622.50	512.50	622.50	555.00	617.50	540.00
168	912.50	615.00	467.50	625.00	512.50	630.00	555.00	622.50	542.50
182	870.00	620.00	462.50	625.00	517.50	632.50	542.50	627.50	543.75
196	870.00	617.50	462.50	630.00	502.50	632.50	545.00	617.50	542.50

หมายเหตุ : (1) คือของแข็งละลายน้ำในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

(2) - (9) คือของแข็งละลายน้ำที่ออกมาจากแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.10 ค่าของของแข็งละลายน้ำที่ผสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ของแข็งละลายน้ำที่ผสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	SPM (10) = (1)-(2)	SPO (11) = (2)-(3)	SCM (12) = (1)-(4)	SC0 (13) = (4)-(5)	KPM (14) = (1)-(6)	KP0 (15) = (6)-(7)	KCM (16) = (1)-(8)	KCO (17) = (8)-(9)
0	175.00	100.00	150.00	42.50	147.50	40.00	130.00	27.50
3	175.00	87.50	145.00	62.50	137.50	70.00	115.00	65.00
12	210.00	100.00	170.00	92.50	167.50	75.00	152.50	60.00
28	245.00	137.50	215.00	82.50	210.00	95.00	197.50	77.50
42	255.00	130.00	242.50	107.50	230.00	90.00	207.50	82.50
56	247.50	132.50	240.00	105.00	212.50	100.00	210.00	57.50
70	295.00	120.00	270.00	130.00	255.00	105.00	265.00	67.50
84	285.00	165.00	295.00	87.50	265.00	92.50	287.50	50.00
98	307.50	157.50	307.50	92.50	302.50	62.50	312.50	65.00
112	270.00	155.00	257.50	115.00	267.50	67.50	257.50	87.50
126	250.00	152.50	262.50	95.00	255.00	65.00	257.50	77.50
140	237.50	150.00	242.50	105.00	245.00	62.50	245.00	60.00
154	260.00	145.00	260.00	110.00	260.00	67.50	265.00	77.50
168	297.50	147.50	287.50	112.50	282.50	75.00	290.00	80.00
182	250.00	157.50	245.00	107.50	237.50	90.00	242.50	83.75
196	252.50	155.00	240.00	127.50	237.50	87.50	252.50	75.00

หมายเหตุ : (10) – (17) คือของแข็งละลายน้ำที่ผสมในแต่ละคอลัมน์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.11 ค่าของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	ระยะห่างวันที่ เก็บตัวอย่าง (18)	ของแข็งละลายน้ำสะสมในแต่ละคอลัมน์ (กรัม)							
		SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
		$[(10) \times Q] \times (18)$	$[(11) \times Q] \times (18)$	$[(12) \times Q] \times (18)$	$[(13) \times Q] \times (18)$	$[(14) \times Q] \times (18)$	$[(15) \times Q] \times (18)$	$[(16) \times Q] \times (18)$	$[(17) \times Q] \times (18)$
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0	-								
3	1	3.37	1.92	2.88	0.82	2.84	0.77	2.50	0.53
12	4	5.51	2.44	4.46	2.08	4.55	1.60	3.91	1.86
28	7	11.44	6.17	10.21	5.50	10.10	4.26	9.53	2.80
42	7	12.56	5.50	10.88	5.05	10.77	4.04	9.76	3.59
56	7	11.11	6.39	10.88	4.71	10.21	4.60	9.76	2.47
70	7	11.67	5.50	10.99	5.16	10.10	4.60	10.21	3.25
84	7	13.57	6.06	13.12	5.50	12.90	4.15	12.68	3.37
98	7	11.11	6.95	11.55	5.05	11.11	2.58	11.33	3.03
112	7	11.22	6.73	11.33	4.71	11.44	3.48	11.11	3.48
126	7	11.22	6.84	11.78	4.26	11.44	2.92	11.55	3.48
140	7	10.66	6.73	10.88	4.71	10.99	2.80	10.99	2.69
154	14	23.33	13.01	23.33	9.87	23.33	6.06	23.78	6.95
168	7	13.35	6.62	12.90	5.05	12.68	3.37	13.01	3.59
182	7	11.22	7.07	10.99	4.82	10.66	4.04	10.88	3.76
196	7	11.33	6.95	10.77	5.72	10.66	3.93	11.33	3.37

หมายเหตุ : (18) คือระยะห่างวันที่เก็บตัวอย่าง

Q คืออัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 6.41 ลิตรต่อวัน

ตารางที่ ข.12 อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) ชุดการทดลองที่ 3

วันที่	อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในแต่ละคอลัมน์ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)							
	SPM	SPO	SCM	SCO	KPM	KPO	KCM	KCO
0								
3	0.011	0.006	0.009	0.003	0.009	0.002	0.008	0.002
12	0.046	0.023	0.038	0.016	0.038	0.015	0.032	0.014
28	0.122	0.065	0.105	0.049	0.103	0.043	0.093	0.034
42	0.197	0.102	0.170	0.076	0.167	0.069	0.152	0.057
56	0.269	0.141	0.240	0.107	0.233	0.097	0.213	0.076
70	0.342	0.177	0.309	0.138	0.295	0.126	0.275	0.095
84	0.427	0.214	0.389	0.174	0.373	0.154	0.353	0.115
98	0.503	0.260	0.468	0.203	0.446	0.176	0.431	0.132
112	0.583	0.303	0.548	0.231	0.526	0.196	0.511	0.152
126	0.657	0.347	0.623	0.261	0.600	0.214	0.584	0.176
140	0.726	0.391	0.694	0.292	0.671	0.234	0.656	0.194
154	0.800	0.433	0.768	0.324	0.745	0.253	0.732	0.216
168	0.879	0.475	0.845	0.354	0.821	0.274	0.809	0.239
182	0.954	0.518	0.915	0.388	0.891	0.299	0.880	0.261
196	1.031	0.562	0.989	0.423	0.964	0.324	0.956	0.283

วิธีคำนวณอัตราสะสมของแข็งทั้งหมดในแต่ละคอลัมน์

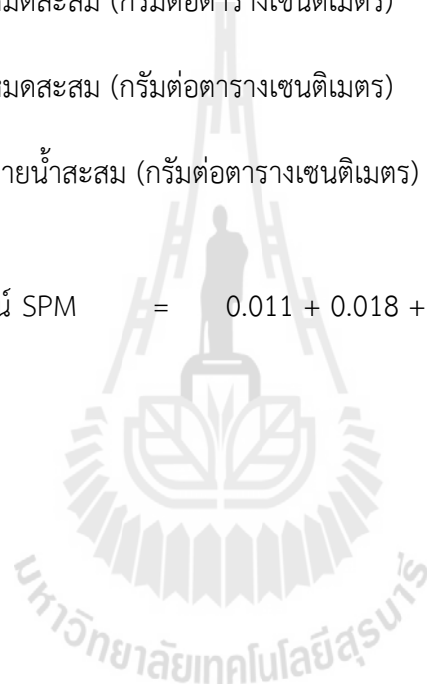
นำค่าที่ได้จากตารางที่ ข.11 มาหารด้วยพื้นที่ $A = \pi(0.1)^2 = 314$ ตารางเซนติเมตร และนำค่าที่ได้มาบวกสะสมกัน

ตัวอย่าง คอลัมน์ SPM วันที่ 3 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{3.37 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.011$

คอลัมน์ SPM วันที่ 8 ; ของแข็งทั้งหมดสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{5.61 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.018$

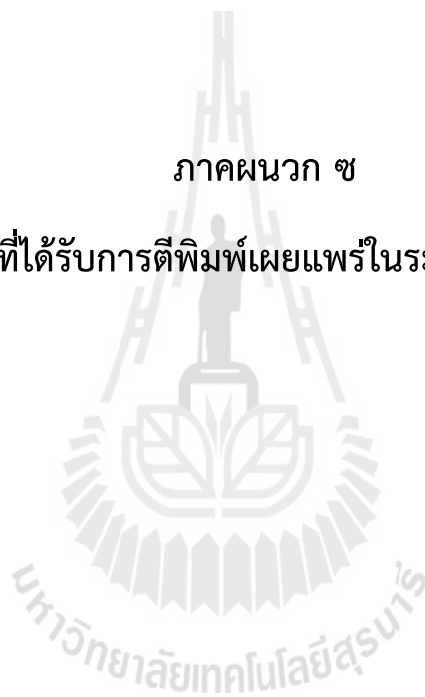
คอลัมน์ SPM วันที่ 12 ; ของแข็งละลายน้ำสะสม (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) = $\frac{5.51 \text{ กรัม}}{314 \text{ ตารางเซนติเมตร}} = 0.017$

อัตราสะสมของแข็งละลายน้ำในคอลัมน์ SPM = $0.011 + 0.018 + 0.017 = 0.046$ กรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาคผนวก ซ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

โสธิตา กิจอาสา, จริญญา ยี่มรัตน์บวร และ พรพจน์ ตันเส็ง. (2557). การอุดหนุนของตัวกลางหินดินดาน และกรวดทรายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ. ระหว่างวันที่ 26-28 มีนาคม 2557. หน้า 221-222.





27R5-04

การอุดตันของตัวกลางหินดินดานและกรวดทรายในระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

Clogging of Shale and Gravel-sand in Subsurface Flow

Constructed Wetland for the Treatment of Textile Wastewater

โสธิชา กิจอาสา^{1*} จริญญา ยิมรัตนาวร² และ พรพจน์ ดันเส็ง³Soticha Kitarsa^{1*} Chareeya Yimrattanavorn² and Pompot Tanseng³

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอมีการส่งออกมากในแต่ละปี มีการใช้น้ำและสีย้อมเป็นจำนวนมาก ทำให้มีน้ำเสียซึ่งปนเปื้อนสีย้อมในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการสังเคราะห์แสง และสร้างออกซิเจนของแพลงก์ตอนและพืชน้ำ ทำให้กระบวนการฟอกตัวเองของแหล่งน้ำธรรมชาติเสียไป เกิดความเป็นพิษและผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร [1] นอกจากนี้ สีย้อมผ้ายังมีส่วนประกอบที่เป็นพิษ บางชนิดมีโครงสร้างทางเคมีเป็นอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine) และมีองค์ประกอบเป็นสารโลหะหนัก มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ และยังเป็นสารก่อมะเร็ง [2] โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสีย โรงงานฟอกย้อมที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ระบบแอกทีฟ (Activated sludge system) แต่พบว่าน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดจากระบบแอกทีฟมีความเข้มข้นของสีย้อมและสารอินทรีย์หลงเหลืออยู่ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยใช้ตัวกลางหินดินดานเพื่อบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ผ่านระบบแอกทีฟ น้ำเข้ามีค่าซีไอดีและสีย้อมอยู่ในช่วง 190.09-234.58 mg/l และ 239.28-258.39 Pt-Co ตามลำดับ พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและสีย้อมอยู่ในช่วงร้อยละ 70-90 และ 90-98 ตามลำดับ [3] แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า

ปัญหาของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์คือ การอุดตันของตัวกลางที่ใช้ โดยปกติตัวกลางที่ใช้คือ กรวดหรือทราย ซึ่งมีอายุการใช้งานประมาณ 5 ปี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงสนใจศึกษาการอุดตันของตัวกลางหินดินดานและทำการเปรียบเทียบกับตัวกลางกรวดผสมทรายในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อม เพื่อสามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในการจัดการระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ในตัวกลางแนวตั้ง เพื่อบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์อุตสาหกรรมฟอกย้อม

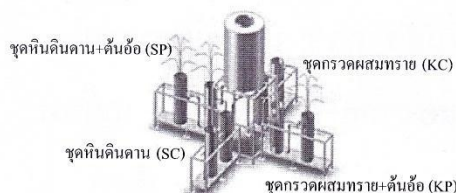
อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาวิจัยเชิงทดลองเป็นระยะเวลา 196 วัน โดยจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ในตัวกลางแนวตั้งในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยใช้ตัวกลางหินดินดานขนาด 0.25-2.00 มม. เปรียบเทียบกับตัวกลางกรวดขนาด 3.00-5.00 มม. ผสมกับทรายขนาด 0.20-1.00 มม. ปลุกดินอ้อในระบบ และมีชุดควบคุมที่ไม่ปลุกดินอ้อ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีชุดการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ในแต่ละชุดการทดลองมีความเข้มข้นค่าซีไอดี และสี ของน้ำทิ้งสังเคราะห์ 1, 2 และ 4 เท่าตามลำดับ จากอุตสาหกรรมฟอกย้อมหลังผ่านระบบแอกทีฟเข้าสู่ระบบเดินระบบด้วยอัตราการไหล 6.41 ลิตรต่อวัน มีระยะเวลาเก็บกัก 2.40 วัน เก็บน้ำเข้าและน้ำออกทุก 7 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าซีไอดี และสี และวัดค่าอัตราการไหลน้ำออกทุก 15 วัน นำไปคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่าน (Infiltration rate) จากสมการดาร์ซี (Darcy's Law) [4] นำผลการศึกษาที่ได้ไปทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 16.0

^{1*} บัณฑิตศึกษา; ² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000; ³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000;

โทรศัพท์ : 0-4422-4450, โทรสาร : 0-4422-4606,

e-mail : soticha-jom@hotmail.com



รูปที่ 1 ชุดการทดลองระบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ผลการทดลองและวิจารณ์

ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเข้าของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 อยู่ในช่วง 211.20-230.40, 409.60-457.60 และ 787.20-828.80 mg/l ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ชุด SP ของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีประสิทธิภาพเท่ากับ 89.52, 86.84 และ 82.63 ตามลำดับ และชุด KP มีค่าเท่ากับ 74.01, 76.74 และ 79.03 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ชุด SP มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูงกว่าชุด KP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีข้อม

ชุด	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (%)			ประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อม (%)		
	ชุดการทดลองที่			ชุดการทดลองที่		
	1	2	3	1	2	3
SP	89.52±4.76	86.84±3.30	82.63±3.20	90.76±4.92	89.08±5.27	85.79±7.10
SC	84.38±4.33	81.37±3.58	78.21±3.49	89.96±4.66	83.31±8.15	77.79±11.02
KP	74.01±7.92	76.74±5.90	79.03±6.20	70.34±9.15	67.28±10.16	67.76±12.71
KC	52.11±6.71	73.10±4.36	77.06±5.95	54.08±9.08	65.30±8.61	62.72±13.23

ความเข้มข้นสีข้อมในน้ำเข้าของชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 อยู่ในช่วง 133.57-152.62, 279.29-358.81 และ 557.38-634.05 Pt-Co ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าชุด SP มีประสิทธิภาพเท่ากับ 90.76, 89.08 และ 85.79 ตามลำดับ และชุด KP มีค่าเท่ากับ 70.34, 67.28 และ 67.76 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ชุด SP มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมสูงกว่าชุด KP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ทั้งนี้เนื่องจากตัวกลางมีส่วนช่วยในการกรอง การตกตะกอนและการดูดซับ อีกทั้งต้นอ้อมีเอนไซม์ peroxidase ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสารอะโรมาติก เอมีน ฟีนอล และซัลโฟเนต ที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของสีข้อมเอโซ [5] จึงทำให้สามารถกำจัดสีข้อมได้

จากผลการศึกษ้อัตราการซึมผ่าน ดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า อัตราการซึมผ่านของชุด SP ในแต่ละชุดความเข้มข้นจะมีการลดลงของค่าอัตราการซึมผ่านน้อยกว่าชุด KP ในแต่ละชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และชุดการทดลองที่มีการปลูกต้นอ้อจะมีการลดลงของค่าอัตราการซึมผ่านน้อยกว่าชุดที่ไม่ปลูกพืชของทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ 2 อัตราการซึมผ่าน (cm/d)

ชุด	ค่าเริ่มต้น	หลังเดินระบบ 98 วัน			หลังเดินระบบ 196 วัน		
		ชุดการทดลองที่			ชุดการทดลองที่		
		1	2	3	1	2	3
SP	3.8650	3.5877	3.3525	3.1957	3.0571	2.7556	1.8994
SC	3.8650	3.5696	3.2741	3.1535	3.0088	2.5385	1.8511
KP	3.8650	3.4610	3.2018	3.0812	2.7797	2.4661	1.7607
KC	3.8650	3.4249	3.1415	3.0148	2.7375	2.3395	1.6521

สรุปผล

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ตัวกลาง ที่มีหินดินดานเป็นตัวกลาง มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ และสีข้อมสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้กรวดและทรายเป็นตัวกลาง และผลการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่านของชุดตัวกลางหินดินดานมีการลดลงน้อยกว่าชุดตัวกลางกรวดและทรายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า ตัวกลางหินดินดานจะมีอายุการใช้งานได้นานกว่าตัวกลางกรวดและทรายในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Saratale, R. G., G. D. Saratale, D. C. Kalyani, J. S. Chang, and S. P. Govindwar. (2009). Enhanced Decolorization and Biodegradation of Textile Azo Dye Scarlet R by Using Developed Microbial Consortium-GR. *Bioresour Technol.* 100 (9) : 2493-2500.
- [2] Myslak, Z. W. and H. M. Bolt. (1998). Occupational Exposure to Azo Dyes and Risk of Bladder Cancer. *Zbl. Arbeitsmed.* 38 : 310.
- [3] Siripan, C. and Jarceya, Y. (2012). The use of constructed wetland for Azo Dye Textile Wastewater. *International Journal of Civil Engineering and Building Materials.* 2 (4) : 150-158.
- [4] Hua, G., Zhu, W., Zhao, L., Zhang, Y. (2010). Applying solubilization treatment to reverse clogging in laboratoryscale vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* 61 (6) : 1479-1487.
- [5] Veitch, N. (2004). Horseradish peroxidase: a modern view of classic enzyme. *Phytochemistry.* 65: 249-259.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวจรียา ยิ้มรัตนบวร
ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ที่อยู่ปัจจุบัน 79/2 ถนนนคร ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์
สถานที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224-4551

ประวัติการศึกษา
2003 Ph.D.(Environmental Technology) Ehime University, Japan

