



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การใช้ประโยชน์ตัวดูดซับชีวมวลจากลำต้นผักตบชวาเป็นวัสดุปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อกำจัดสีย้อมผ้า

The Utilization of Water Hyacinth Stem Bioadsorbent as Growing Material in Constructed Wetland Systems for Dyestuff Removal

นามผู้วิจัย นางสาวพิมพ์มณี ฐ์ประเสริฐ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณาภิรักษ์, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้ประโยชน์ตัวดูดซับชีวมวลจากลำต้นผักตบชวาเป็นวัสดุปลูกใน
ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อกำจัดสีย้อมผ้า

The Utilization of Water Hyacinth Stem Bioadsorbent as Growing Material in Constructed
Wetland Systems for Dyestuff Removal

โดย

นางสาวพิมพ์ฉวี ฐีประเสริฐ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2558

พิมพ์ฉันทิ ฐัประเสริฐ 2558: การใ้ประโยชน์ตัวดูดซับชีวมวลจากลำต้นผักตบชวาเป็น
วัสดุปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อกำจัดสีย้อมผ้า ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภรณ์,
Ph.D. 110 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม
ร่วมกับตัวดูดซับชีวมวลจากลำต้นผักตบชวาผสมกับดินสำหรับการกำจัดสีย้อมผ้าในสารละลายสี
ย้อมผ้า จากการทดลองแบบแบตช์พบว่า สีย้อมรีแอกทีฟ 6 ชนิด (2%Yellow LS-R-01, 2%Red
LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn) ถูกดูดซับด้วยตัวดูด
ซับชีวมวลจากลำต้นผักตบชวา มีการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิดได้สูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง
และมีร้อยละการกำจัดมากกว่า 90 ยกเว้น สีย้อม 2%Yellow LS-R-01 เท่ากับร้อยละ 76.20 การดูด
ซับสีย้อมเป็นไปตามรูปแบบไอโซเทอร์มของฟรุนดิชและแลงเมียร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัว
ดูดซับชีวมวลต่อดินที่เหมาะสมเท่ากับ 1:30 การทดลองแบบคอลัมน์เป็นการจำลองชั้นวัสดุปลูก
ซึ่งจากชั้นล่างขึ้นบนประกอบด้วย กรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด และผักตบชวาผสมดิน (1:30)
ผลการศึกษาพบว่า การแช่ขังไว้ 2 วันและปล่อยแห้ง 2 วัน ให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า
นอกจากนี้ทำการจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมในถังพลาสติกขนาด 51x51x54 ซม. ซึ่งบรรจุชั้น
วัสดุปลูก ปลูกหญ้าแฝกและฐูปฤณีในแต่ละกระเบะและทำการบำบัดโดยการแช่ขังไว้ 2 วันปล่อย
แห้ง 2 วัน ผลการศึกษาพบว่าพืชทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดใกล้เคียงกันที่ร้อยละ
85.07 และ 84.20 ตามลำดับ โดยหน่วยระบบบำบัดที่มีตัวดูดซับชีวมวลให้ประสิทธิภาพการกำจัด
ดีกว่าระบบที่ไม่มีตัวดูดซับชีวมวล ดังนั้นระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่ใช้ตัวดูดซับชีวมวล
จากลำต้นผักตบชวาคือสามารถนำไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียจากการย้อมผ้าที่ปนเปื้อนสีย้อมรี
แอกทีฟ 6 ชนิดได้

Pimmanee Ruparseart 2015: The Utilization of Water Hyacinth Stem Bioadsorbent as Growing Material in Constructed Wetland Systems for Dyestuff Removal.

Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science,

Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor

Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 110 pages.

This research was to investigate the feasibility of using the constructed wetland which mixing the bioadsorbent from water hyacinth stem with soil for removal textile dyes in aqueous solution. Batch experiments showed that, six reactive dyes (2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G and 2%Turquoise H-Gn) were adsorbed by water hyacinth stem bioadsorbent. Maximum decolorization of each dyes was observed at 3 hr of contact time and the percentage of removal was over than 90% with the exception of 2%Yellow LS-R-01 was 76.20%. Adsorption of dyes was found to follow the Freundlich and Langmuir isotherm model. The suitable ratio by weight of bioadsorbent to soil was 1:30. The column experiments were conducted to simulate the growing material layers which consisted of gravel, coarse sand, sand and mixture of water hyacinth and soil (1:30) from the bottom to the top. The resulted revealed that the 2-days stagnation and 2-days drainage gave the better removal efficiency. Furthermore, the constructed wetland model was carried out in square plastic tank size 51×51×54 cm. which containing the growing layers, growing *Vetiveriazizanioides* and *Typhaangustifolia* in each tank and treatment by the 2-days stagnation and 2-days drainage. The results showed that the two treatment plants were effective in removal of dyes nearly at 85.07 % and 84.20 % respectively. The treatment unit which had bioadsorbent gave the better removal efficiency than unit which without bioadsorbent. Therefore, the constructed wetland which using water hyacinth adsorbent could be applied to treat textile wastewater which contaminated with these six reactive dyes.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลต่างๆ หลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ คณิตา ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ และสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและ คำสั่งสอนแก่ผู้วิจัย เพื่อนำความรู้ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ รวมถึงขอขอบพระคุณวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ สถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้และขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท คณะสิ่งแวดล้อม รุ่น 36 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวรัฐประเสริฐ ที่คอยเป็นกำลังใจ ในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้อบรม สั่งสอนและคอยให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษา จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พิมพ์มณี รัฐประเสริฐ

กุมภาพันธ์ 2558

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	43
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	74
สรุป	74
ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	79
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยฝักตบชวา	18
2	องค์ประกอบของฝักตบชวาแห้ง	19
3	ความสามารถในการลดมลสารของฝักตบชวา	20
4	ความยาวคลื่นที่สีย้อมดูดกลืนแสงได้มากที่สุด	49
5	ชนิดของสีย้อมที่ถูกดูดซับได้ด้วยตัวดูดซับฝักตบชวา	50
6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่จุดเริ่มหมดสภาพและจุดหมดสภาพ	68
7	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมมาตรฐาน 6 ชนิด ระหว่างหญ้าแฝก และรูปถาฐิในการบำบัดครั้งที่ 1	73
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับปริมาณฝักตบชวา 0.5 กรัม	80
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับปริมาณฝักตบชวา 1 กรัม	80
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับปริมาณฝักตบชวา 2 กรัม	81
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับปริมาณฝักตบชวา 3 กรัม	81
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับปริมาณฝักตบชวา 4 กรัม	82
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับปริมาณฝักตบชวา 5 กรัม	82
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอช 4	83
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอช 5	83
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอช 6	84
10	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอช 6.6	84
11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับค่าพีเอช 8	85
12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาสัมผัสนที่ 1 ชั่วโมง	85
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาสัมผัสนที่ 1.30 ชั่วโมง	86
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาสัมผัสนที่ 2.00 ชั่วโมง	86
15	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาสัมผัสนที่ 2.30 ชั่วโมง	87
16	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาสัมผัสนที่ 3.00 ชั่วโมง	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
56	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกธูปฤาษี ครั้งที่ 3	107
57	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกธูปฤาษี ครั้งที่ 4	108
58	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกธูปฤาษี ครั้งที่ 5	108
59	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของการใช้ดินอย่างเดียวกับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก	109

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	โครงสร้างสี่รีแอกทีฟ	7
2	โครงสร้างสี่รีแอกทีฟ 9 ชนิด	8
3	สูตรโครงสร้างเซลล์โลส	15
4	ส่วนประกอบต่างๆของผักตบชวา	17
5	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	23
6	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	24
7	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	27
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	30
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	31
10	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	32
11	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช	33
12	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	34
13	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	34
14	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	35
15	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	36
16	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	37
17	ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	38
18	ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย	39
19	คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูก	45
20	กระบะบรรจุวัสดุปลูกตามพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	47
21	ลักษณะตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา	48
22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่ข้อมแต่ละชนิดกับปริมาณตัวดูดซับผักตบชวา	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์กับปริมาณตัวดูดซับผักตบชวา	52
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดด้วยตัวดูดซับผักตบชวากับพีเอช	53
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับผักตบชวากับพีเอช	54
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์กับระยะเวลาสัมพัทธ์เป็นชั่วโมง	55
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมมาตรฐานแต่ละชนิดด้วยตัวดูดซับผักตบชวากับระยะเวลาสัมพัทธ์เป็นชั่วโมง	55
28	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดด้วยตัวดูดซับผักตบชวากับระยะเวลาสัมพัทธ์เป็นวัน	56
29	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์กับระยะเวลาสัมพัทธ์เป็นวัน	56
30	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับผักตบชวา	58
31	ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับผักตบชวา	58
32	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดกับปริมาณตัวดูดซับผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ	59
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ กับปริมาณตัวดูดซับผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ	59
34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 3 ชั่วโมง	61
35	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 3 ชั่วโมง	61
36	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแซ่ง 3 ชั่วโมง	62

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน	63
38	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน	64
39	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่แข็ง 2 วัน	65
40	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดแบบปล่อยผ่านกับครั้งที่ของการเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 15 นาที	66
41	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อม 6 ชนิดแบบปล่อยผ่านในน้ำเสียสังเคราะห์กับครั้งที่ของการเก็บตัวอย่างครั้งละ 15 นาที	66
42	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบปล่อยผ่าน	67
43	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก	69
44	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก	70
45	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม โดยเฉลี่ยระหว่างกระบะที่ใช้วัสดุปลูกเป็นตัวดูดซับผักตบชวาผสมดินกับกระบะที่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูกเพียงอย่างเดียว	70
46	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก	71
47	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก	72

การใช้ประโยชน์ตัวดูดซับชีวมวลจากลำต้นผักตบชวาเป็นวัสดุปลูกใน
ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อกำจัดสีย้อมผ้า

The Utilization of Water Hyacinth Stem Bioadsorbent as Growing Material in
Constructed Wetland Systems for Dye Removal

คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วตามการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผลิตเครื่องนุ่งห่ม อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปริมาณมาก จึงก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากเช่นกัน โดยน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะมีค่า BOD และ COD ที่สูง รวมทั้งยังมีสีย้อมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำเนื่องจากอนุภาคของสีย้อมขัดขวางไม่ให้แสงอาทิตย์ส่องถึงใต้น้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้การละลายของออกซิเจนในน้ำลดลง จากสิ่งเหล่านี้ส่งผลให้ระบบนิเวศน์เสียสมดุลและยังเป็นการทำลายทัศนียภาพอีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยใช้ตัวดูดซับชีวมวล (bioadsorbent) พงเซลล์ูโลสจากผักตบชวามาช่วยในการดูดซับและจับสีย้อมเพื่อให้จุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายต่อไป ในการเลือกผักตบชวามาใช้เป็นตัวดูดซับเนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชที่มีเปอร์เซ็นต์เซลล์ูโลสค่อนข้างสูง พบได้ทุกพื้นที่ของประเทศไทยและยังถือได้ว่าเป็นการกำจัดผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำอีกด้วย วิธีการนี้สามารถนำมาปรับใช้ได้กับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอได้ทั้งโรงงานขนาดกลางและโรงงานขนาดครัวเรือน

เซลล์ูโลสมีคุณสมบัติดูดซับสีย้อมได้ดี ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดผสมพงเซลล์ูโลสจากผักตบชวากับดินเพื่อเป็นวัสดุปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนโดยผู้วิจัยเน้นที่สีย้อมผ้าจากโรงงานย้อมผ้าดอยตุงซึ่งเป็นสีย้อมที่ใช้กันทั่วไปในการย้อมผ้าพื้นเมืองและเน้นการนำไปใช้ประโยชน์กับโรงงานย้อมผ้าพื้นเมืองในประเทศไทย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาเป็นวัสดุปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม



การตรวจเอกสาร

1. สีย้อม

สีย้อม (dyestuffs) หมายถึง สารให้สีที่สามารถจับติดวัสดุด้วยตัวเองหรือด้วยการชักนำโดยปฏิกิริยาในกระบวนการย้อมหรือกระบวนการพิมพ์ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2530)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ สีย้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมา มีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสภาวะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่นอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals' force) แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม กับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ ในการเกิดสีของสีย้อมสีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า โครโมฟอร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือกลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) กลุ่มไนโตร (nitro group) กลุ่มเอโซ (azo group) กลุ่มเอธิลีน (ethylene group) กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group) กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group) กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป (ธงชัย, 2527)

1.1 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่ใช้โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีมากมายหลายชนิด ตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อม สีย้อมอาจจำแนกได้หลายประเภท ตามลักษณะกายภาพ (อัจฉลาพร, 2527) โดยแบ่งออกเป็น สารละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม และสารที่ไม่ละลายน้ำเรียกว่า พิเมนต์ หรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมีซึ่งวิธีนี้ยุ่งยากด้วยอาศัยความรู้ทางเคมี และสูตร โครงสร้างของสีด้วย วิธีจำแนกสีย้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่ายได้แก่ การจำแนกสีย้อมตามการใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภท (จินตนา, 2550) คือ

1.1.1 สีดิสเพิร์ส (Disperse dye)

ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียด ละลายอยู่ในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจาย (dispersing agent) ที่เหมาะสมจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วย นอกจากสารพา บางชนิดที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ สีดิสเพิร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากหมู่เคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีเอโซ (azo dyes) และสีย้อม amino anthraquinone ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้ปกติจะประกอบด้วยอนุพันธ์ของ ethanoline – $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

1.1.2 สีเอซิด (Azid dye)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และโพลีเอสเตอร์ ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน สำหรับการเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบน โมเลกุลของสีกับประจุบวกของเส้นใย และสีกลุ่มนี้มักมีกลุ่มซัลโฟนิค (Sulfonic group) ซึ่งเป็นประจุลบในน้ำ

1.1.3 สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งหนึ่งด้วย

เกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเฮโซที่ให้อิทธิพลเหนี่ยวนำ ปฏิกิริยานี้เรียกว่าคัปปลิง (coupling)

1.1.4 สีย้อมเบสิก (basic dyes)

ใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ที่แคทไอออนทำให้เรียกสีนี้ว่า สีแคทไอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

1.1.5 สีย้อมไครเรกต์ (direct dyes)

บางครั้งเรียกว่าสีย้อมฝ้าย เนื่องจากเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรก ที่สามารถย้อมติดใยฝ้ายได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันจะใช้เกลือเข้าช่วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเฮโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ สีย้อมนี้ให้คุณสมบัติในการย้อมคงทน ตลอดจนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่คงทนดีโครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิตและราคาจำหน่ายย้อมสูงขึ้นด้วย

1.1.6 สีย้อมเมอร์แดนท์ (merdant dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีย้อมเอซิดที่ สามารถก่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ และจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำได้ดีกว่าไม่ย้อมทับ

1.1.7 สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยเฉพาะ ราคาค่อนข้างถูกแต่สีย้อมไม่สดใส ตามปกติแล้วตัวสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้ละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้ได้ชื่อว่าสีซัลเฟอร์เพราะสารที่นำมารีดิวซ์เป็นสารละลายของโซเดียมซัลไฟด์ และโครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ ประกอบด้วยกลุ่มซัลโฟนิค (sulfonic group) เมื่อสี

ย้อมละลายในน้ำแล้ว จะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใย และสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดส์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ

1.1.8 สีย้อมแวต (vat dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลายน้ำ ที่นิยมใช้ทั่วไปได้แก่ โซเดียมไฮไดรซัลไฟด์ สีย้อมเมื่อถูกรีดิวซ์แล้วจะให้สารประกอบลิวโค (leuco compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดส์กลับคืนสภาพเป็นสีแวตที่ไม่ละลายน้ำทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ดี สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 ชนิด คือ สีครามอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (anthraquinoid)

1.1.9 สีย้อมโลหะ (metallic dyes)

สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิดใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส และให้สีต่างๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ยึดจับตัวในเส้นใย

1.1.10 สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

นิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสารสีที่สามารถทำให้ละลายน้ำได้ รูปแบบการย้อมดำเนินคล้ายกับสีแวต คือต้องทำให้ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมไม่ละลายน้ำด้วยการออกซิไดส์กลับคืน

1.1.11 สีรีแอกทีฟ (Reactive dye)

สีรีแอกทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ เป็นสีย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ดีที่สุดมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ในเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโคเวเลนต์กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิด

ใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติในการละลายและการดูดซับเส้นใยของตัวสีทำให้สีนี้เข้าไปอยู่ภายในเส้นใยเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสียึดติดเส้นใย

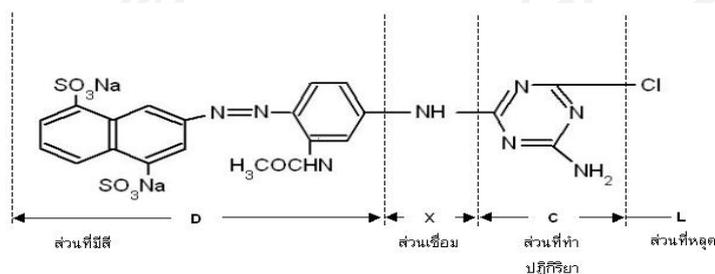
สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่มคือ (1) กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียสและ (2) กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอกทีฟจะให้สีที่สดใสและสีจะติดทนในทุกสภาวะเนื่องจากสีรีแอกทีฟมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างเล็กจึงทำให้สีแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ดีอีกทั้งยังมีความคงทนต่อแสงและการซักได้ดี (ธงชัย, 2527)

โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือ

1.1.11.1 สารที่ทำให้เกิดสี หรือกลุ่มเคมีที่มีสีใช้แทนด้วยตัวอักษร “D”

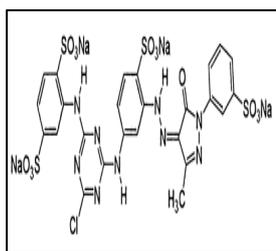
1.1.11.2 ส่วนประกอบของกลุ่มไฮโดรครอกซิล หรือ อะไมโน ในโมเลกุลของสี เป็นกลุ่มที่ทำปฏิกิริยาใช้แทนด้วยอักษร “R”

ส่วนที่มีสีนั้น มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับโมเลกุลของสีย้อมทั่วไป ส่วนใหญ่จะเป็นพวกสีอะโซ แอนทราควินโนน และพธาโลไซยาเอมีน สำหรับส่วนที่เป็นกลุ่มทำปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมกับส่วนที่มีสี (ใช้แทนด้วยตัวอักษร “X”) ส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของกลุ่มทำปฏิกิริยา (ใช้แทนด้วยตัวอักษร “L”) เมื่อสีย้อมทำปฏิกิริยากับเส้นใย สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟที่แสดงเป็นส่วนประกอบต่างๆ (วรัญญู, 2549) ดังภาพที่ 1

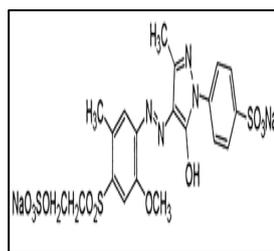


ภาพที่ 1 โครงสร้างของสีรีแอกทีฟ

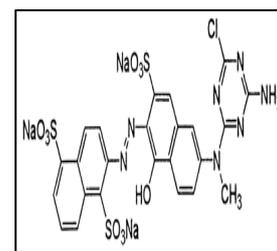
ที่มา: วรัญญู (2549)



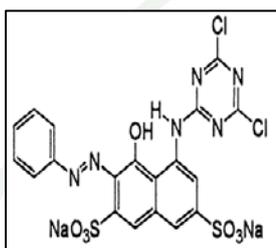
(ก.)



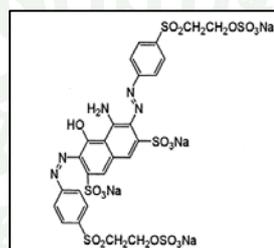
(ข.)



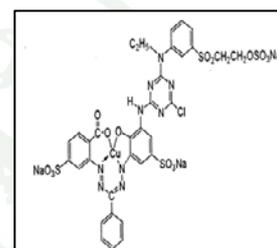
(ค.)



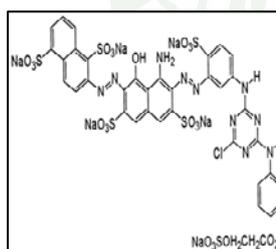
(ง.)



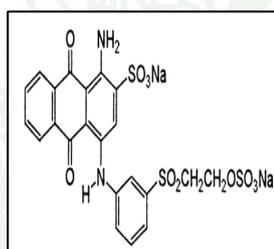
(จ.)



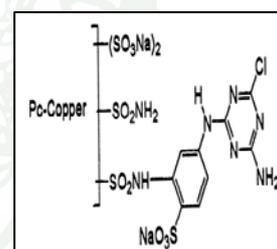
(ฉ.)



(ช.)



(ซ.)



(ณ.)

ภาพที่ 2 โครงสร้างของสีรีแอกทีฟ 9 ชนิด 2% Yellow LS-R-01(ก.) 2% Yellow LS-4G (ข.) 2% Orange Hf-2R (ค.) 2% Red LS-B (ง.) 2% Black R (จ.) 2% Blue LS-3R (ฉ.) 4% Navy LS-G (ช.) 2% Blue G (ซ.) 2% Turquoise H-Gn (ณ.)

ที่มา: นีรนาม (2555)

2. น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

2.1 แหล่งที่มาของน้ำทิ้ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

สภาพการเกิดและการระบายน้ำทิ้งเริ่มจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ระบายน้ำทิ้งลงในรางระบายน้ำภายในโรงงาน ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกันคือ

2.1.1 ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำทิ้งภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเกือบปนค่อนข้างสูง และน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเกือบปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำทิ้งในประเภทแรก

2.1.2 น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม มักอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ และเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลง และกลั่นตัวในท่อไอน้ำ ก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนกับสารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเพิ่มปริมาณของสารละลายสีย้อมและจะรวมเป็นน้ำทิ้งที่สกปรกที่สุด

2.1.3 น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นในกระบวนการฟอกย้อม บางขั้นตอนทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นน้ำสะอาดและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่

2.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน น้ำในส่วนนี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ และในบางกรณีเป็นน้ำทิ้งที่มีความสกปรกสูงมาก เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

2.1.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ นอกจากน้ำทิ้งจากแหล่งต่างๆ ข้างต้น โรงงานฟอกย้อมสิ่งทออาจมีน้ำทิ้งจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

2.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำ

2.2.1 สีข้อม การข้อมเส้นใยมีการดูดซึมสีข้อมจากสารละลายสีข้อมเพียงบางส่วน เท่านั้นสีข้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีข้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณสีข้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายสีข้อมแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีข้อมที่ใช้

2.2.2 สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกข้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จสารเคมีที่ใช้มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

2.2.2.1 สารช่วยข้อม ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก สารช่วยเปียก และสารที่ช่วยในการข้อมสีให้ได้สีสม่ำเสมอ

2.2.2.2 สารเคมีพื้นฐาน เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกข้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

2.2.2.3 สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา ซึ่งสารเคมีต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกข้อม สารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเหลืออยู่ในสารละลายสีข้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำทิ้ง

2.2.3 สิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้ง วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกข้อมส่วนใหญ่มีสสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากก็น้อย โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยสัตว์มีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารจีผึ้ง ไชมัน โปรตีน โลหะหนักต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตก็ยังมีสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วยเช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้ง เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกข้อม และจะหลุดติดมาในน้ำทิ้งจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

2.2.4 เศษเส้นใย น้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกข้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (oligomers) ที่หลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำทิ้งด้วย (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

2.2.5 โลหะหนัก เนื่องจากสารโลหะหนักมีคุณสมบัติในการให้ความสาคูใสกับสีของสิ่งทอ ดังนั้นจึงมีการเติมสารโลหะหนัก เช่น โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี พรอท โคบอลต์ ลงไปในสีย้อม และใช้เป็นเป็นสารออกซิไดซ์อีกด้วย ซึ่งปริมาณและชนิดของโลหะหนักที่พบนั้นขึ้นอยู่กับเคมีภัณฑ์ของในแต่ละบริษัทที่จะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

2.2.6 สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้าซึ่งเป็นสารประเภทคลอรีเนตเบนซีน (chlorinated benzene) สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่อง เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งในภายหลัง

2.3 มลพิษที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ (อศปภา, 2555)

โดยทั่วไปมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ มีดังนี้

2.3.1 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ น้ำเสียจากน้ำย้อมผ้ามีสารที่เป็นพิษซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น สารประกอบอะนิลีน เป็นต้น

2.3.2 การลดของออกซิเจนในแหล่งน้ำ น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ และใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสีย้อมบางประเภท

2.3.3 ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น ทำให้สภาพลำน้ำไม่น่าดู นอกจากนี้สีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำนั้น

3. การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอส่วนใหญ่มักจะเจือปนสี สารเคมีและเศษวัสดุ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต เมื่อปล่อยน้ำทิ้งก่อนผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะส่งผลกระทบต่อ

สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและก่อให้เกิดความรู้สึกรำแค้นต่อบุคคลทั่วไป ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอก่อนปล่อยออกจากโรงงานจึงต้องผ่านการบำบัดสารต่างๆ รวมไปถึงสีที่ตกค้างให้เป็นไปตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้น้ำทิ้งต้องไม่เป็นที่น่ารังเกียจ สำหรับวิธีในการบำบัดสีมีหลายวิธีด้วยกันดังนี้

3.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีที่ถูกดูดซับบนอนุภาคสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง

3.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถกำจัดสีได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

3.2.1 ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งทางชีววิทยาซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กิน ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง ให้มีค่าความสกปรกตกลง

3.2.2 ระบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) คัดแปลงจากการบำบัดน้ำทิ้งแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกันโดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

3.3 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นาน ซึ่งอาจได้รับความ

นิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนชั้น (ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำที่อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มีมักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

3.4 นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

3.5 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 จึงต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลให้เหมาะสมโดยการโดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาว ปริมาณมากในการปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้ pH ของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นต้องมีการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้งประสิทธิภาพในการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ในการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่มีต้นทุนที่สูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูง ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงก็ตาม

3.6 เทคโนโลยีเมมเบรน กระบวนการกำจัดสีด้วยเมมเบรน (membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

3.6.1 ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมซัลเฟอร์ สีแควด และสีอะโซอิกที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายและวิสคอส (viscose) สีย้อมดิสเพิร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

3.6.2 ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) เหมาะสำหรับใช้กำจัดไอออนละลาย และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเมมเบรน 2 ชั้นตอน คือ เมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเมมเบรนแรกจะสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเมมเบรนที่สองและสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

3.6.3 ไดนามิกเมมเบรน (dynamic membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่นเหล็ก สแตนเลส วัสดุคาร์บอนหรือเซรามิกซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคริลิก(Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุนกระบวนการนี้สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

3.7 เทคโนโลยีใหม่ๆ เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้นมีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกัน คือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุดตัวอย่าง เช่น

3.7.1 ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้ในโรงงานประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูง หรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกัน

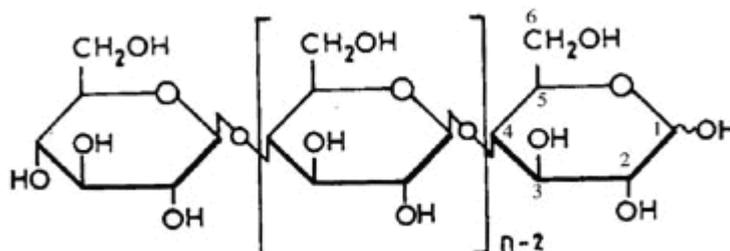
3.7.2 ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กโทรไลซิสที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีนและไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ เซลลูโลสซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันน้ำตาลแตกเปลี่ยนไอออน หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

วิธีการบำบัดสีในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมอาจใช้วิธีหนึ่งใดดังกล่าวหรืออาจใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสีบางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสม จำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

4. เซลลูโลส

4.1 ลักษณะทั่วไปของเซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นโพลีแซคคาไรด์เชิงเส้นตรงที่ประกอบไปด้วยหน่วยซ้ำๆกันของ β -D-anhydroglucopyranose มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ เมื่อ n เป็นจำนวนหน่วยของกลูโคสโมโนเมอร์ในสายโซ่โพลิเมอร์ ซึ่งปกติ n มีค่าตั้งแต่ 30-300 หน่วย กลูโคสทำให้เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุล ตั้งแต่ 50,000-500,000 โดยมีพันธะที่เชื่อมต่อแต่ละหน่วยคือ β -1,4-glycoside linkage ระหว่าง C_1 และ C_4 ต่อกันเป็นสายตรงโครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวสูงมาก มักเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ โดยทั่วไปเซลลูโลสจะเป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืชโดยพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซนแกม แทนนิน ไชมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น



ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างเซลลูโลส

ที่มา: International Pectin Producer's Association. (2001)

4.2 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

4.2.1 การละลาย เซลลูโลสไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดซัลฟิวริกเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นและกรดฟอสฟอริกเข้มข้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้องแต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ

เซลลูโลสบวมตัวในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) บางครั้งทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

4.2.2 ความหนืด ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

4.2.3 ค่าความหนาแน่นของเซลลูโลส เซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยวจะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน ค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มาหรืออาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

4.2.4 จุดหลอมเหลวเท่ากับ 260-270 องศาเซลเซียส (สลายตัว)

4.2.5 การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับ หรือการคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่น ๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมัน จนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

5. ผักตบชวา

5.1 ลักษณะทั่วไป

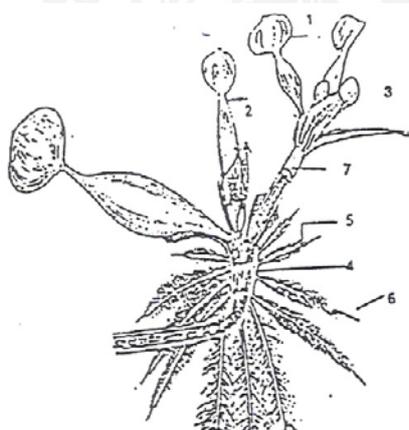
ชื่อไทย	: ผักตบชวา
ชื่อสามัญ	: Water hyacinth
ชื่อวิทยาศาสตร์	: <i>Eichornia crassipes</i> (Mart.) Solms
ชื่อวงศ์	: PONTEDERIACEAE

ผักตบชวามีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ พบครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2367 โดย Karl Von Matius และมีการขยายพันธุ์ไปประเทศในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน โดยมีการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในปี พ.ศ. 2444 เป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป ก่อให้เกิดปัญหามากมายในด้านการกำจัดรวมถึงประเทศไทยด้วย

5.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เป็นพืชล้มลุกที่เจริญอยู่บนผิว โดยปกตึรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดิน จึงถูกระแสลมหรือน้ำพัดพาไปได้ไกลๆ แต่ถ้าน้ำตื้นแล้ว รากจะหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ ลักษณะทรงต้นผักตบชวาประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นกระจุก ในต้นหนึ่งๆ จะมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไป ที่โคนก้านใบจะมีกาบใบ ลักษณะเป็นเยื่อบางๆ สีขาวแกมเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นก็จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล บริเวณของกาบใบ เป็นสีน้ำตาลแกมม่วง รากของผักตบชวาเป็นแบบรากฝอย (fibrous root) โดยแตกออกจากข้อบนลำต้นมีความยาวตั้งแต่ 10-90 เซนติเมตร ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้าลักษณะเป็นช่อดอกประมาณ 6-12 ดอก ดังภาพที่ 4

การขยายพันธุ์ของผักตบชวาสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่อาศัยเพศ (vegetative propagation) และแบบใช้เพศ (sexual reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อ โดยสามารถเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ที่ได้เป็น 2 เท่า ทุกระยะเวลา 62 วันหรือใช้การขยายพันธุ์โดยใช้เพศจะผสมเกสรภายในตัวเองสามารถเพิ่มจำนวนจาก 10 ต้น เป็น 6 แสนต้น ภายในเวลา 8 เดือน แต่ในกรณีของการผสมพันธุ์ข้ามต้นจะเกิดขึ้นในฤดูแล้งเท่านั้น



- 1) แผ่นใบ
- 2) ท่อนพวงลำต้น
- 3) ลิเกิ้ล
- 4) เหง้า
- 5) ขนราก
- 6) หมวกราก
- 7) ลำต้น

ภาพที่ 4 ส่วนประกอบต่างๆของผักตบชวา

ที่มา: เปล่งศักดิ์ (2546)

5.3 แหล่งที่พบ

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 C° และในต้นพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ประกอบด้วยในใบร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96 (เปล่งศักดิ์, 2546) ซึ่งในปัจจุบันพบว่ามีการแพร่กระจายของผักตบชวาอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่างๆ ในหลายจังหวัดทั่วประเทศ

5.4 คุณสมบัติผักตบชวา

โครงสร้างลำต้นผักตบชวาส่วนใหญ่มีความพรุนคล้ายฟองน้ำ ดังนั้นผักตบชวาจึงมีความสามารถในการดูดความชื้นในอากาศได้ดีและดูดซึมน้ำได้สูง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยผักตบชวา

ลักษณะ	ค่าเฉลี่ย
เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	0.80-1.20
ความถ่วงจำเพาะ	0.428
ปริมาณความชื้น (%)	8.44
การดูดซึมน้ำ (%)	38.8

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2543)

5.5 องค์ประกอบของผักตบชวา

ต้นผักตบชวา 100 กิโลกรัม หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กิโลกรัมคิดเป็นกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า ผักตบชวาประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และแร่ธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง

องค์ประกอบ	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์
ลิกนิน	12-13
เซลลูโลส	43-44
เพนโทแซน	14-15
ไนโตรเจน	2.8-3.5
แคลเซียม	0.6-1.3

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2543)

5.6 การบำบัดน้ำทิ้งด้วยผักตบชวา

การบำบัดน้ำทิ้งด้วยผักตบชวาเป็นวิธีที่อาศัยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

5.6.1 ทำหน้าที่กรอง

ผักตบชวาที่ขึ้นหนาแน่นเปรียบได้กับการบรรจุวัสดุพรุนในกรวยกรองน้ำที่ไหลผ่านผักตบชวาอย่างช้าๆ ทำให้ของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้น และระบบรากผักตบชวาที่มีจำนวนมากจะช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด

5.6.2 ดูดซับสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

สารอาหารที่พืชต้องการ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ผักตบชวามีความต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเช่นเดียวกัน และการกินอาหารของผักตบชวาจะใช้รากดูดซับสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำลำเลียงไปยังใบ เพื่อการสังเคราะห์แสงซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำจึงจัดเป็นมลสารที่ต้องกำจัดให้หมดไป การดูดกินอาหารในน้ำของผักตบชวาจึงเป็นการลดมลพิษดังกล่าวให้น้อยลง อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำที่ส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมีเช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน (organic-N) แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) และไนเตรต ไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) ซึ่งผักตบชวาสามารถดูดซับสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้สูง

กว่าไนโตรเจนรูปอื่น คือประมาณร้อยละ 9 ในขณะที่มลสารไนเตรตไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนจะลดลงประมาณร้อยละ 80 และ 77 ตามลำดับ แต่การใช้ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงจะส่งผลให้ผักตบชวาเจริญเร็วขึ้นและปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำมากขึ้น จึงควรมีการดูแลระบบเก็บต้นที่เจริญเต็มที่ขึ้นจากน้ำอย่างสม่ำเสมอไม่เช่นนั้นเมื่อผักตบชวาทายจะเน่าอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำเสียมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอีก (จักริน และธรรมบุญ, 2543)

5.6.3 การลดมลสารอื่น

นอกจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้วผักตบชวาสามารถลดมลสารอื่นๆ ได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสามารถในการลดมลสารของผักตบชวา

มลสาร	ปริมาณการลดมลสาร (กรัม/ตารางเมตร/วัน)
คาร์บอน	28.0
โพแทสเซียม	2.0
แคลเซียม	1.0
แมกนีเซียม	0.2
โซเดียม	2.0

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2543)

5.6.4 ลดมลสาร โดยจุลินทรีย์ที่ผักตบชวา

แบคทีเรียที่เกาะอยู่ที่รากของผักตบชวาชนิดหนึ่งคือ *Azospirillum* spp. จัดเป็นแบคทีเรียแกรมลบชนิดต้องการออกซิเจน และมีคุณสมบัติพิเศษสามารถตรึงไนโตรเจน คุณสมบัติดังกล่าวมีส่วนในการลดมลสารไนโตรเจนได้ดียิ่งขึ้น

5.6.5 การดูดโลหะหนัก

มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของผักตบชวาในการดึงโลหะหนักจากน้ำที่ปรากฏว่าผักตบชวาสามารถกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้ เช่น แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล เงิน โคบอลต์ สตรอนเตียม และฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังดูดสารพิษ เช่น ยาฆ่าแมลงได้อีกด้วย(จักริน และธรรมบุญ, 2543)

6. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ (โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับหรือระหว่างหน้า (interface) กัน) เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลวกระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากอากาศ และน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลาย

ด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวคูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือคูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การคูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกคูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวคูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกคูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกคูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกคูดซับบนตัวคูดซับ (นิพนธ์ และกนิดา, 2550)

6.1 กลไกการคูดซับ

กลไกการคูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

6.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกคูดซับเข้าถึงตัวคูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวคูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวคูดซับ

6.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกคูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวคูดซับ เพื่อให้เกิดการคูดซับ

6.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกคูดซับติดที่ผิวของตัวคูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

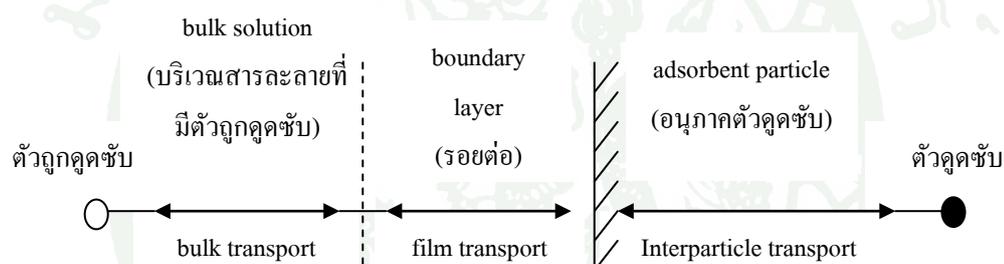
6.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

อัตราการคูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการคูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการคูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการคูดซับ ขั้นตอนในการคูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

6.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

6.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกละลายแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้น

6.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ

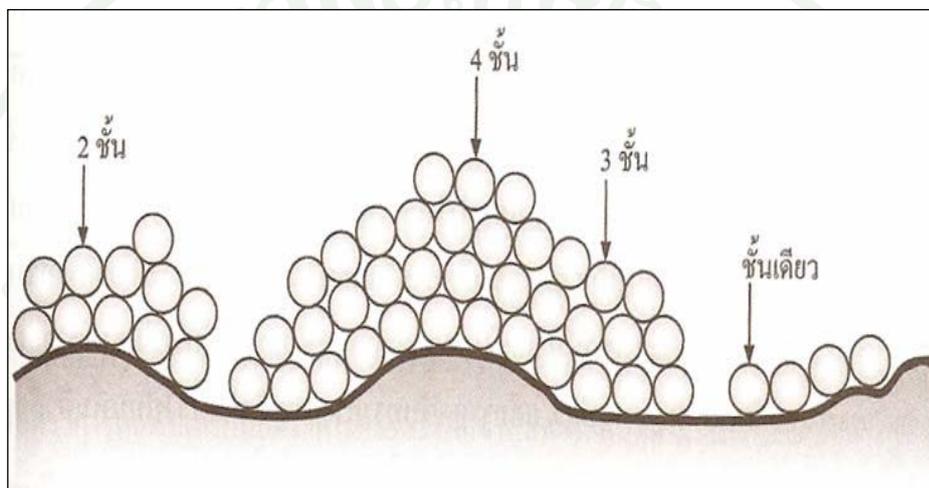
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.3 รูปแบบของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

6.3.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (london dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ่อนกันเป็นหลายชั้น

(multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้า และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกละลายกับตัวถูกละลายด้วยในระหว่างชั้นอาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ได้อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การดูดซับของตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.3.2 การดูดซับทางเคมี

เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกละลาย เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (reversible) เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้น จากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพด้วย เหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

6.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

6.4.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

6.4.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อยและอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

6.4.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายใน ก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบางส่วนอาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

6.4.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

6.4.5 pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

6.4.6 อุณหภูมิ จะมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อน กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

6.4.7 ระยะเวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

6.5 สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

6.5.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์และแอคติเวตเต็ดซีลิกา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัมแต่สารสังเคราะห์อาจจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

6.5.2 ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

6.5.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

6.5.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จีเลื้อย ไคโตซาน (chitosan) กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) เถาแกลบดำ เป็นต้น

6.5.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

6.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สถานะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

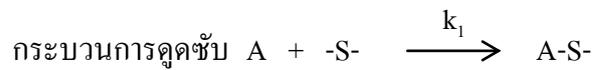
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ให้ A เป็น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

-S- เป็น โมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็น สัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1-q) เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q)$$



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

$$\begin{aligned} k_1[C](1-q) &= k_2(q) \\ \frac{q}{(1-q)} &= \frac{k_1}{k_2}[C] = K[C] \end{aligned}$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล $K = \frac{q}{C} \dots\dots\dots(2)$

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_i - C_e) \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ กรัมต่อกรัม

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นมิลลิกรัมหรือกรัม

V เป็นปริมาตรสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร หรือลิตร

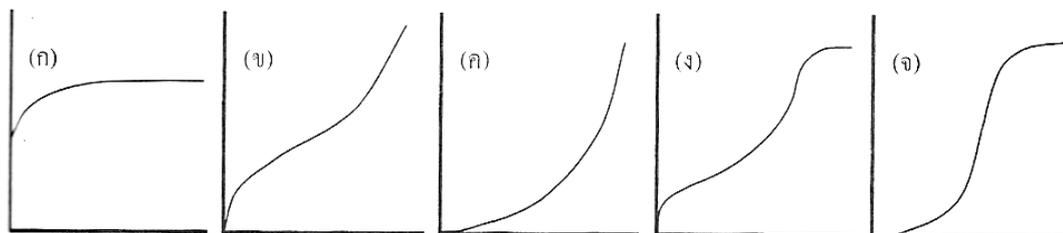
C_i เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

6.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

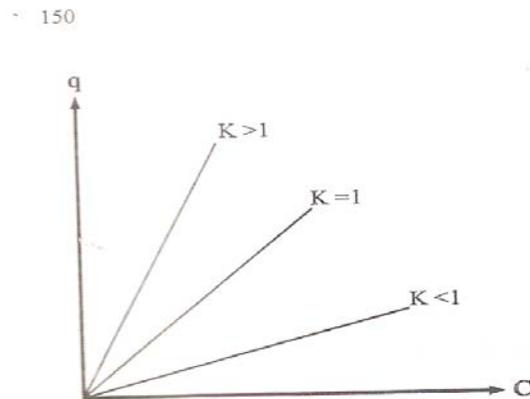
จากภาพที่ 7 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

6.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad K &= \frac{q}{C} \\ q &= KC \end{aligned}$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

6.7.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \dots\dots\dots(4)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป $1/n$ จะมีย่านค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots(5)$$

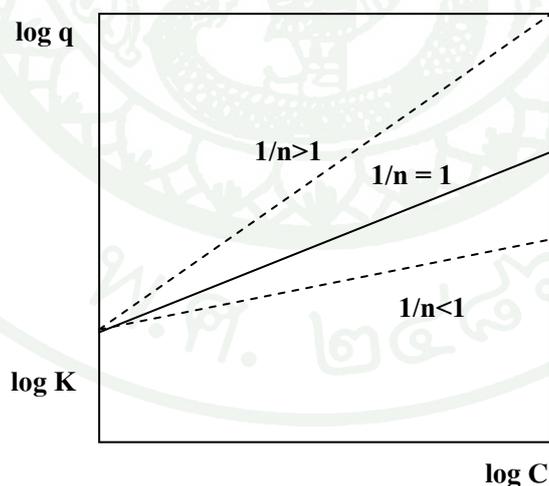
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

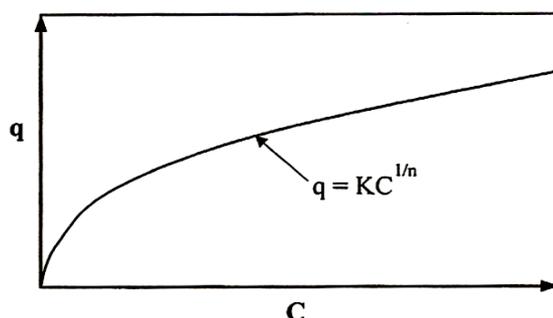
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกลถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกลถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (5) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้

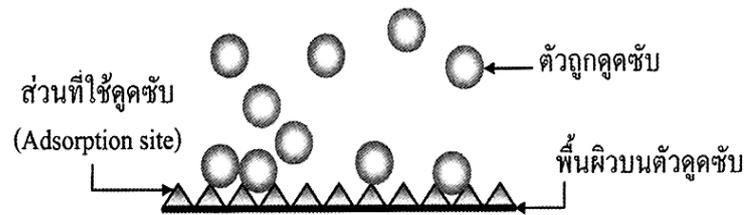


ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

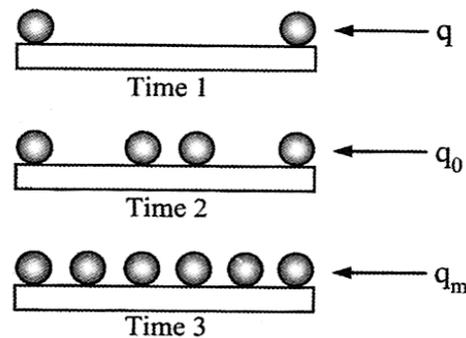
6.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการช้อนทับกัน พื้นผิว

บนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 13 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

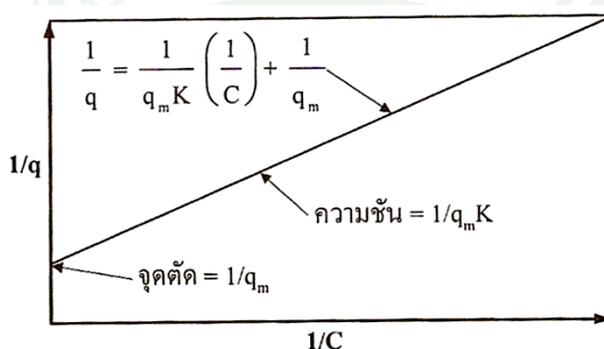
$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad (6)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad \dots\dots\dots(7)$$

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{K q_m}$

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

7.7.4 สมการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett Teller หรือ BET adsorption isotherm)

ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่านในปี ค.ศ.1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer Adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน

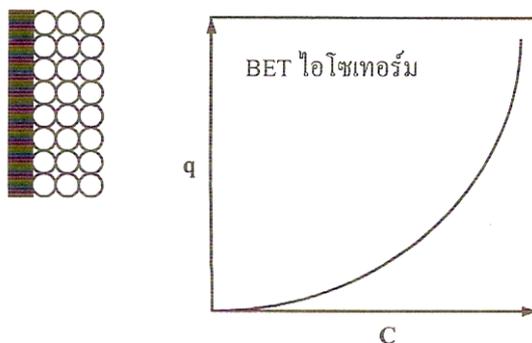
4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบตซ์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = \frac{q_m K C}{(C_0 - C)[1 + (K-1)C/C_0]} \dots\dots\dots(8)$$

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

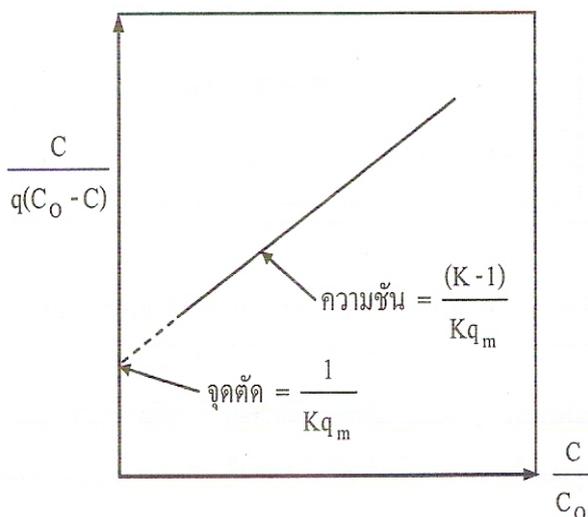
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

$$\frac{C}{q(C_0 - C)} = \frac{1}{q_m K} + \frac{K-1}{q_m K} \left(\frac{C}{C_0} \right) \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับ ค่า $\frac{C}{C_0}$ จะได้กราฟเส้นตรงมี

ความชันเท่ากับ $\frac{(K-1)}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

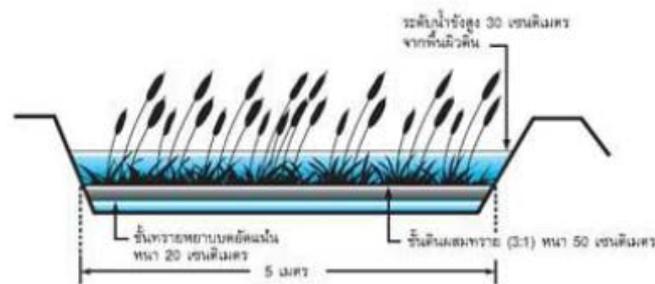
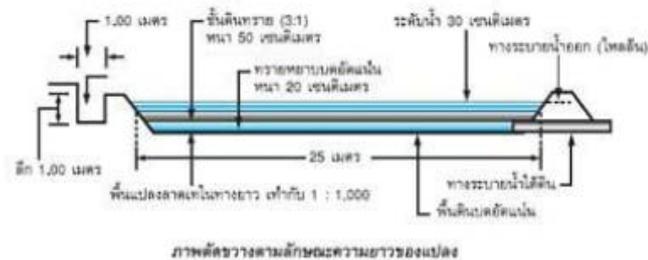
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

7. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางธรรมชาติ

7.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

รูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมได้ยึดหลักการตามแนวพระราชดำริ โดยการทำแปลงและ/หรือทำบ่อเพื่อกักเก็บน้ำเสียที่รวบรวมได้จากชุมชน และปลูกพืชน้ำที่ผ่านการคัดเลือกแล้วว่าเหมาะสมที่สุด 2 ชนิด คือ กกกลม (กกจันทบูรณ) และธูปฤาษี ช่วยในการบำบัดน้ำเสียอาศัยการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้น ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย อีกทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน และระยะเวลาการกักพักเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในการบำบัดน้ำเสียจะมีลักษณะการให้น้ำเสีย หรือระบายน้ำเสีย 2 ระบบ คือ ระบบที่ให้น้ำเสียขังไว้ในระดับหนึ่ง และมีการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดอย่างต่อเนื่อง (ระบบเปิด) น้ำเสียใหม่เข้าไปต้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบให้ไหลเส้นทางระบายน้ำและ/หรือทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีระยะเวลาในการกักพักน้ำเสีย 1 วัน เมื่ออายุของพืชครบระยะเวลาที่ใช้

ในการบำบัดจะตัดพืชนั้นออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้กับพืชได้ พืชที่ตัดออกเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นผลพลอยได้อีกต่อไปด้วย



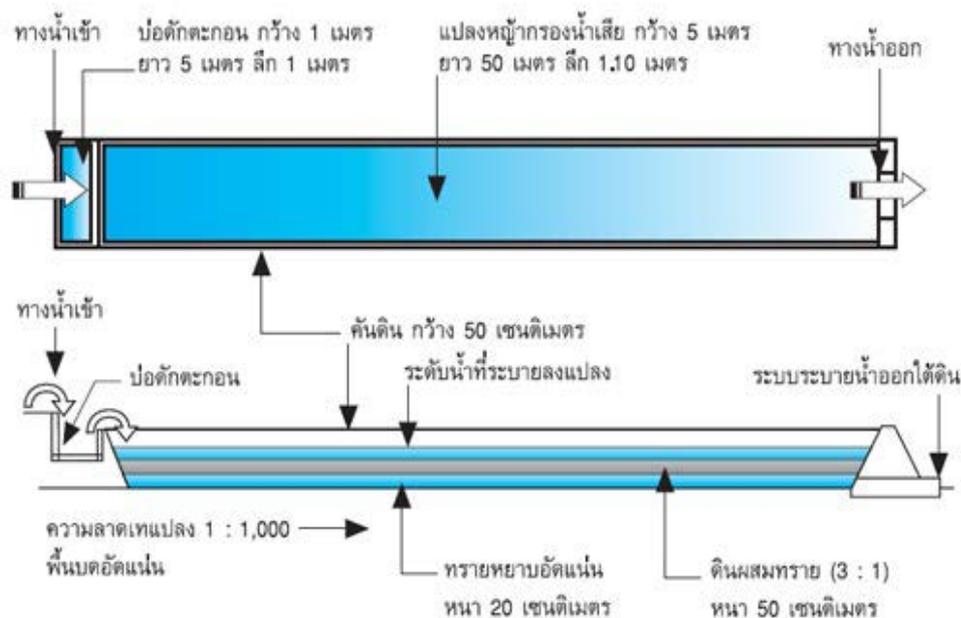
ภาพที่ 17 ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ที่มา: มุลนิธิชัยพัฒนา (2543)

7.2 การบำบัดด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

ระบบพืชกรองน้ำเสีย เป็นแนวคิดที่ประยุกต์มาจากระบบการบำบัดน้ำเสียของประเทศออสเตรเลียที่ใช้พืชเป็นตัวกรองน้ำเสีย โดยการปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่านไปตามแปลงพืชที่ปลูกไว้ ได้แก่ กกกลม ธูปฤาษี หญ้าแฝกพันธุ์อินโดนีเซีย หญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา หญ้าโคลครอส และหญ้าสตาร์ ที่ทำการปลูกพืชในแปลงขนาด 5 x100 เมตร ลึก 0.5 เมตร ความลาดชัน 0-3 เปอร์เซ็นต์ ดินปลูกเตรียมจากดินนาผสมทรายในอัตราส่วน 3 : 1 การบำบัดจะปล่อยน้ำเสียเข้าสู่แปลงจนระดับน้ำในแปลงเท่ากับ 30 เซนติเมตร ทำการขังไว้นาน 5 วัน และปล่อยแห้ง 2 วัน พบว่าในขณะที่น้ำไหลผ่านเคลื่อนที่ไปตามระยะทางและความลาดชันของแปลงปลูกพืชที่ปลูกไว้นั้นจะเป็นการเติมออกซิเจนให้กับน้ำที่เคลื่อนที่ เป็นการบำบัดน้ำเสียในแนวราบ ในขณะที่เดียวกันจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในแปลงพืชจะช่วยเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เป็นสารอนินทรีย์ที่พืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด สามารถนำไปใช้ในการสร้างความเจริญงอกงามและมวลชีวภาพได้ โดยกระบวนการทางชีวเคมีในสภาพใช้ออกซิเจนนอกจากนี้ดินยังเสมือนฟองน้ำยักษ์ในการดูดซับ

สารพิษหรือสิ่งเจือปนในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี ถือว่าเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียในแนวดิ่งหรือแนวดิ่งอีกทางหนึ่ง (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2543)



ภาพที่ 18 ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหน้ากรองน้ำเสีย

ที่มา: มูลนิธิชัยพัฒนา (2543)

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เปล่งศักดิ์ (2546) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีย้อมผ้าชนิดละลายน้ำด้วยเรซิน ผักตบชวาที่ปรับสภาพ การทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์โทนสีน้ำเงินที่เหมือนกันในทางการค้า 3 ชนิด ได้แก่ สีเอสดีดี สีไดเร็กซ์ และสีรีแอคทีฟ และการใช้เรซินแบบต่างๆ ที่ปรับสภาพจาก ผักตบชวาในรูปวัสดุบำบัดสีทั้งหมด ได้แก่ เรซินแบบกรดแก่ เรซินแบบด่างแก่ และเรซินแบบกรดอ่อน การบำบัดสีด้วยเรซินผักตบชวาศึกษาโดยใช้เทคนิคทางสเปกโตรโฟโตเมตริก พบว่า เรซิน ผักตบชวาแบบกรดแก่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โทนสีน้ำเงินทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ร้อยละ 98.78 , 96.70 และ 46.35 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการ บำบัดสี ซีไอดี สารแขวนลอย และปริมาณสารละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสียย้อมผ้า มีค่าร้อยละ 52.66 , 38.46 , 54.28 และ 79.67 ตามลำดับ ค่าพีเอชหลังการบำบัดมีค่าลดลงจาก 7.1 เป็น 3.6 หลัง การบำบัด ซึ่งคุณภาพน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พบว่า

คุณภาพน้ำที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกพารามิเตอร์ ยกเว้น ค่าพีเอช ดังนั้นจึงต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้วยสารละลายต่างหรือปูนขาวก่อนปล่อยทิ้งต่อไป

จินตนา (2550) ศึกษาการเตรียมตัวคูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรทท์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกสีย้อมสิ่งทอ โดยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีเพื่อปรับสภาพตัวคูดซับซึ่งตัวคูดซับที่มีลักษณะเป็นผงถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 % 20 % 25% และตัวคูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่า พีเอช ปริมาณตัวคูดซับ เวลาการปั่นกวน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นของสีย้อมไคเรทท์โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ พบว่าประสิทธิภาพตัวคูดซับเป็นไปตามกลไกสมการคูดซับของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลตัวคูดซับจากผักตบชวาสามารถกำจัดสีย้อมไคเรทท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อดิศักดิ์ (2546) ได้ทำการศึกษการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายแบบกรองช้าร่วมกับการคูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าระบบบำบัดให้ประสิทธิภาพสูงโดยสามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ดีที่สุดที่อัตราการน้ำล้นผิว 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ก็สามารถบำบัดความขุ่นของแข็งแขวนลอย สี ซีไอดี และลดค่าพีเอชได้เฉลี่ยอยู่ในช่วง 70.51-74.41%, 61.42-65.92%, 5.21-8.36%, 30.62-34.20% และ 3.26-6.02% ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและของแข็งแขวนลอยเบื้องต้นได้สูง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของระบบบำบัด เนื่องจากชั้นถ่านกัมมันต์เกิดการอุดตันช้าลง

บุษยา (2555) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผงผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการคูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง ผลการศึกษาพบว่าผงใบผักตบชวา 1 กรัม สามารถคูดซับสีย้อมได้ 6 ชนิด ร้อยละการคูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 55.43 ที่สภาวะเหมาะสมคือ พีเอช 5 ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบ/ นาที ระยะเวลาในการเขย่า 30 นาที เวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะสมดุล 150 นาทีและความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสม 30 มิลลิกรัมต่อ/ลิตร ในขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 5 กรัม สามารถคูดซับสีย้อมได้ 9 ชนิด ร้อยละการคูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 93.04 ที่สภาวะเหมาะสมคือ พีเอช 7 ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบ/นาที ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัม/ลิตร โดยกลไกการคูดซับสีย้อมของผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สอดคล้องกับไอโซเทอรัมของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ ตามลำดับ การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง พบว่า อัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เท่ากับ 60 มิลลิลิตร/นาที เริ่มหมดประสิทธิภาพการคูดซับเมื่อคูดซับสีย้อมในสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม 25.2 ลิตร และน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุงที่ 3.6 ลิตร ในการประยุกต์ใช้จริงแบบแบดซ์ โดยใช้ผง

ผักตบชวา สามารถกำจัดสีย้อมในสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม 10 ลิตร ได้ร้อยละ 44.17 และสามารถกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง ได้ร้อยละ 46.31

Santhy *et al.* (2006) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากใยเปลือกมะพร้าว พบว่าในการทดลองแบบแบดซ์ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลและปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองพบว่า การดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับที่ผิวหน้าของแลงเมียร์ ในการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลที่น้อยลงและใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น และการฟื้นฟูถ่านที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านจากใยเปลือกมะพร้าวสามารถลดสีและซีไอดีในน้ำเสียได้

Ghash *et al.* (1978) ได้ทำการศึกษา การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานทอผ้าเกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์และสี โดยทั่วไปวิธีการกำจัดสีและสารอินทรีย์จะสามารถทำได้โดยการใช้ระบบทางชีววิทยาควบคู่กับระบบฟิสิกส์ - เคมี แม้ว่าระบบบำบัดทางชีววิทยาจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้เป็นที่น่าพอใจ กระบวนการการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จะตามด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีสามารถกำจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าได้

Metcalf *et al.* (1991) ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรมแห่งมหาวิทยาลัยควีนที่ไอร์แลนด์เหนือ กล่าวถึงวิธีการกำจัดสีของน้ำเสียไว้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการใดที่ประหยัดและดีที่สุดในการกำจัดสีของน้ำเสีย น้ำเสียแต่ละชนิดจะมีปัญหาเฉพาะแห่ง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำเสียนั้นควบคู่ไปด้วย เช่น สภาพท้องถิ่น สีย้อม และสารเคมีที่ใช้ ปริมาณและส่วนประกอบ น้ำเสีย เป็นต้น ในอดีตวิธีการบำบัดทางชีววิทยาได้ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับโรงงานทอผ้า แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่มีขีดจำกัดพอสำหรับกำจัดสีย้อม วิธีการในการกำจัดสีย้อมจะกระทำได้โดยวิธีทางฟิสิกส์และเคมีช่วย วิธีการกำจัดสีมีหลายวิธี ได้แก่ adsorption, ion-exchange, chemical oxidant เช่น foam fractionation, dynamic membrane hyperfiltration, gamma radiation, induced oxidation, electrolytic treatment เป็นต้น

Senthikumaaar *et al.* (2006) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากดอกมะพร้าว (Coconut Tree Flower) และเส้นใยปอกระเจา (Jute Fiber) เพื่อใช้ดูดซับสี Reactive Red 120 และนำไปดูดซับสีที่ความเข้มข้น 20, 30 และ mg/l และเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 536 nm พบว่า เปรอร์เซนต์ในการดูดซับสี Reactive Red 120 จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซนต์ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเส้นใยปอกระเจาสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากดอกมะพร้าวคือ 200 mg/g และ 181.9 mg/g ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

- 1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ เช่น เครื่องวัดค่าดีไอ เครื่องวัดค่าพีเอช เครื่องวัดความขุ่น เครื่องวัดสี เครื่องวัดความขุ่น เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า และเครื่องวัดค่าความเค็ม
- 1.2 เครื่องยิวี วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด อ่านค่าละเอียด 0.0001 g
- 1.4 ตู้อบ
- 1.5 คอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร
- 1.6 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- 1.7 กระบะพลาสติกขนาด 51× 51 ×54 เซนติเมตร

2. สารเคมี

- 2.1 สีย้อม (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง 9 ชนิด คือ 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange Hf-2R ,2% Red LS-B, 2% Black R, 2%Blue LS-3R, 4% Navy LS-G, 2% Blue G และ 2% Turquoise H-Gn
- 2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
- 2.3 ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl)

3. ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับจากผักตบชวา

4. วัสดุปลูก

ได้แก่ ดินผสมทราย,กรวด, ทรายหยาบ และทรายละเอียด

5. พีชที่ใช้ปลูก

ได้แก่ รูปถ่ายและหญ้าแฝก

วิธีการ

1. การเตรียมตัวดูดซับ

1.1 วิธีการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวา

นำผักตบชวาส่วนลำต้นมาล้างให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตากแดดให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปั่นด้วยเครื่องปั่นจะได้ตัวดูดซับผักตบชวาที่มีขนาดเล็ก

2. การเตรียมสารละลาย

2.1 สารละลายมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด แต่ละชนิด เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งสีย้อมแต่ละชนิด 20 มิลลิกรัม ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ชนิดละขวด เจือจางแต่ละขวดด้วยน้ำกลั่นจนครบปริมาตร 1 ลิตร

2.2 สารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม 6 ชนิด

ชั่งสีย้อมแต่ละชนิดมา 20 มิลลิกรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและเจือจางปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร จะได้สารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นของสีย้อมแต่ละชนิดเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและใช้เป็นน้ำเสียดังเคราะห์ตลอดการทดลอง

3. การวิเคราะห์ค่าความยาวคลื่นที่สีย้อมแต่ละชนิดดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (λ_{max})

นำสารละลายมาตรฐานสีย้อมแต่ละชนิด ที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 มาเสกนหา λ_{\max} ด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยเสกนจากความยาวคลื่น

4. ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดของตัวดูดซับผักตบชวา

ชั่งตัวดูดซับผักตบชวาที่เตรียมจากข้อที่ 1.1 ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละชนิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโดยวัดความยาวคลื่นที่ λ_{\max} ของแต่ละสีด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

5. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของผักตบชวาโดยวิธีการทดลองแบบเบดซ์

5.1 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

ชั่งตัวดูดซับผักตบชวาที่เตรียมขึ้นจากข้อ 1.1 ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโดยการวัดค่าดูดกลืนแสงที่ λ_{\max} ของสีย้อมแต่ละชนิดด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

5.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

ชั่งตัวดูดซับผักตบชวา ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดจากการทดลองข้อ 5.1 ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับพีเอชเป็น 4, 5, 6, 8 และที่ไม่ปรับ (พีเอชเท่ากับพีเอชของน้ำเสีย 6.6) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แต่ละใบตามลำดับ ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อที่ 5.1

5.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสน้ำ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.2 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับพีเอชให้เท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 5.2 และตั้งทิ้งไว้ในระยะเวลาต่างกันคือ 1-4 ชั่วโมง และ 1-5 วัน

5.4 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

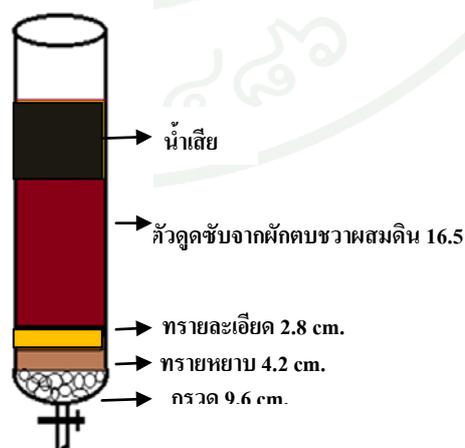
ทำการทดลองที่สภาวะเหมาะสมที่ศึกษาได้จากข้อ 5.2 และ 5.3 โดยแปรผันปริมาณ ผักตบชวา 1-5 กรัม นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณและพลอตกราฟไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดิช

5.5 ศึกษาอัตราส่วนตัวดูดซับผักตบชวาต่อดินที่เหมาะสม

อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวดูดซับผักตบชวาต่อดินที่ทำการศึกษาคือ 1:10 ถึง 1:60 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 5.3 และตั้งทิ้งไว้ด้วยระยะเวลาสัมผัสที่ศึกษาได้จากข้อ 5.3

6. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับผักตบชวา โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (Continuous Flow)

6.1 การทดลองแบบคอลัมน์เป็นการจำลองชั้นวัสดุเพราะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ในคอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้นวัสดุปลูก โดยชั้นกรวด 9.6 เซนติเมตร ทรายหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทรายละเอียด 2.8 เซนติเมตร และตัวดูดซับ ผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 5.4 สูง 16.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูก

6.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของชั้นวัสดุปลูกด้วยวิธีการบำบัดแบบต่างๆ

6.2.1 แบบแข่งขันด้วยระยะเวลาเป็นชั่วโมง

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์บรรจุวัสดุปลูกจากข้อที่ 6.1 แข่งขันไว้ตามระยะเวลาเป็นชั่วโมงที่ศึกษาได้จากข้อ 5.3 ปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ปล่อยให้ชั้นวัสดุแห้งและทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงหรือคงที่

6.2.2 แบบแข่งขันด้วยระยะเวลาเป็นวัน

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 6.1 แข่งขันทิ้งไว้ตามระยะเวลาเป็นวันที่ศึกษาได้จากข้อ 5.3 ปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม ปล่อยให้ชั้นวัสดุแห้งและทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงหรือคงที่

6.6.3 แบบปล่อยผ่าน

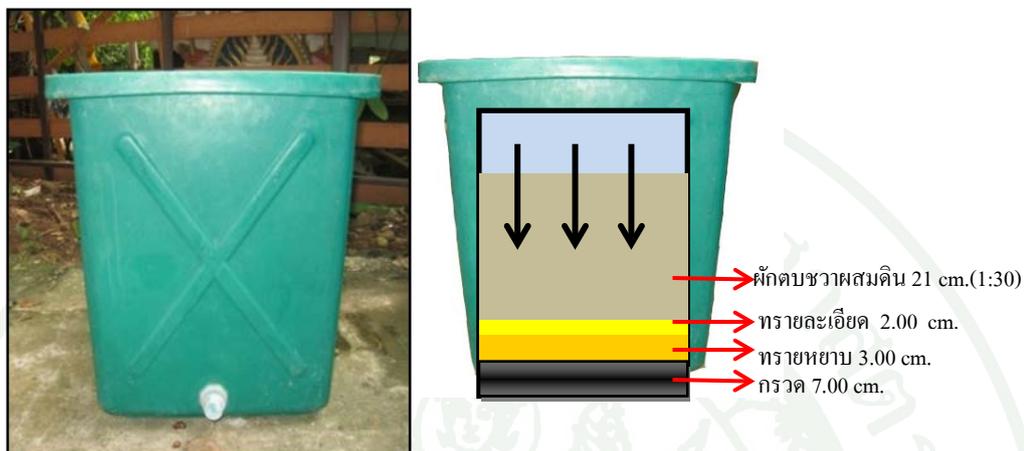
เติมน้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มิลลิลิตรลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 6.1 อย่างต่อเนื่องและเก็บน้ำตัวอย่างที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหรือคงที่

7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมแบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน (Free water surface constructed wetlands)

7.1 ทำการทดลองโดยใช้กระบะพลาสติกขนาด 51×51×54 เซนติเมตร ที่บรรจุชั้นกรวด 7 เซนติเมตร ชั้นทรายหยาบ 3 เซนติเมตร ชั้นทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และชั้นบนสุดเป็นตัวดูดซับ

ผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 5.4 สูง 21 เซนติเมตร ดังภาพที่ 20 ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ กล้วย้าและหน้าแผลในแต่ละกระบะ

7.2 อนุบาลรากพืชจนเจริญเติบโต มีรากแผ่กระจายเต็มกระบะ



ภาพที่ 20 กระบะบรรจุวัสดุปลูกตามพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

7.3 แบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสม

เติมน้ำเสียดังเคราะห์ 20 ลิตร ลงในกระบะแข่งตามระยะเวลาหรือวิธีที่ศึกษาได้ ปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงหรือคงที่

7.4 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 7.3 เป็นการใช้น้ำเพียงอย่างเดียวในชั้นบนสุด เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลอง

ผลและวิจารณ์

การใช้ประโยชน์ตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมร่วมกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนที่หนึ่งคือ การทดลองแบบแบตช์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับผักตบชวา พีเอชที่เหมาะสม อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตัวดูดซับผักตบชวาต่อดิน ระยะเวลาสัมผัส และวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ส่วนที่สองคือ การทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อเป็นการจำลองชั้นวัสดุปลูกของระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและส่วนที่สามคือ การจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมในกระบอกของระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยใช้ผักตบชวาผสมดินเป็นวัสดุปลูกและร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ ต้นธูปฤาษีและหญ้าแฝก ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

นำส่วนลำต้นผักตบชวาที่ผ่านการล้างทำความสะอาด หั่น ตากแดด อบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและปั่นด้วยเครื่องปั่น ได้ตัวดูดซับชีวภาพที่มีลักษณะเป็นผงหยาบปนละเอียด สีน้ำตาล ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ลักษณะตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

2. ผลการศึกษาหาความยาวคลื่นที่สีข้อมดุดกสีนแสงได้มากที่สุด (λ_{\max})

จากการทดลองในข้อที่ 3 สามารถหาค่าความยาวคลื่นที่สีข้อมแต่ละชนิดดุดกสีนแสงได้มากที่สุด แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความยาวคลื่นที่สีข้อมดุดกสีนแสงได้มากที่สุด

Dyes	λ_{\max} (nm)
2% Yellow LS-R-01	400
2% Yellow LS-4G	420
2% Orange Hf-2R	470
2% Red LS-B	546
2% Black R	550
2% Blue LS-3R	588
4% Navy LS-G	616
2% Blue G	660
2% Turquoise H-Gn	662

3. ผลการศึกษาชนิดของสีย้อมที่ถูกดูดซับได้ด้วยตัวดูดซับผักตบชวา

จากการทดลองข้อที่ 4 พบว่า ตัวดูดซับผักตบชวาสามารถดูดซับสีย้อมได้ 6 ชนิดจากทั้งหมด 9 ชนิดคือ 2% Yellow LS-R-01, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 4% Navy LS-G, 2% Blue G และ 2% Turquoise H-Gn โดยแต่ละชนิดมีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 9.30, 65.31, 72.16, 75.29, 73.61 และ 69.20 และสีย้อมอีก 3 ชนิดที่ตัวดูดซับผักตบชวาไม่สามารถดูดซับได้คือ 2% Yellow LS-4G, 2% Orange Hf-2R และ 2% Black R ดังตารางที่ 5 เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสีย้อมทั้ง 3 ชนิด มีกลุ่มอะโซ(-N=N-) อยู่ด้วยซึ่งเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำจึงไม่สามารถดูดซับได้ด้วยตัวดูดซับผักตบชวา ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนต่อไปจะใช้สีย้อมรีแอกทีฟ 6 ชนิดที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับผักตบชวา

ตารางที่ 5 ชนิดของสีย้อมที่ถูกดูดซับได้ด้วยตัวดูดซับผักตบชวา

ชนิดสี	ร้อยละการดูดซับ
2% Yellow LS-R-01	9.30
2% Yellow LS-4G	0.00
2% Orange Hf-2R	0.00
2% Red LS-B	65.31
2% Black R	0.00
2% Blue LS-3R	72.16
4% Navy LS-G	75.29
2% Blue G	73.61
2% Turquoise H-Gn	69.20

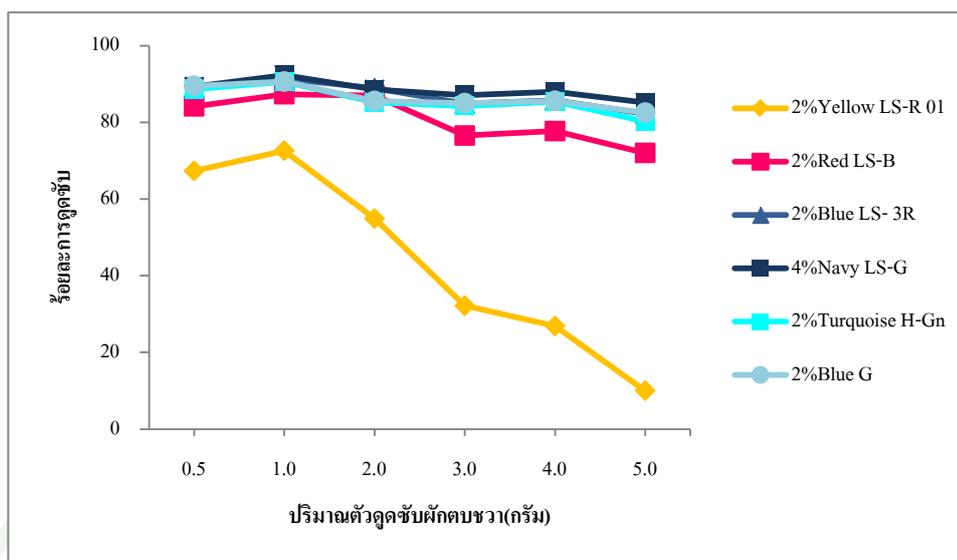
4. ผลการทดลองโดยวิธีแบบเบตซ์

การทดลองโดยวิธีแบบเบตซ์ทำเพื่อศึกษาปริมาณตัวดูดซับ พีเอช ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมและไอโซเทอร์มการดูดซับ

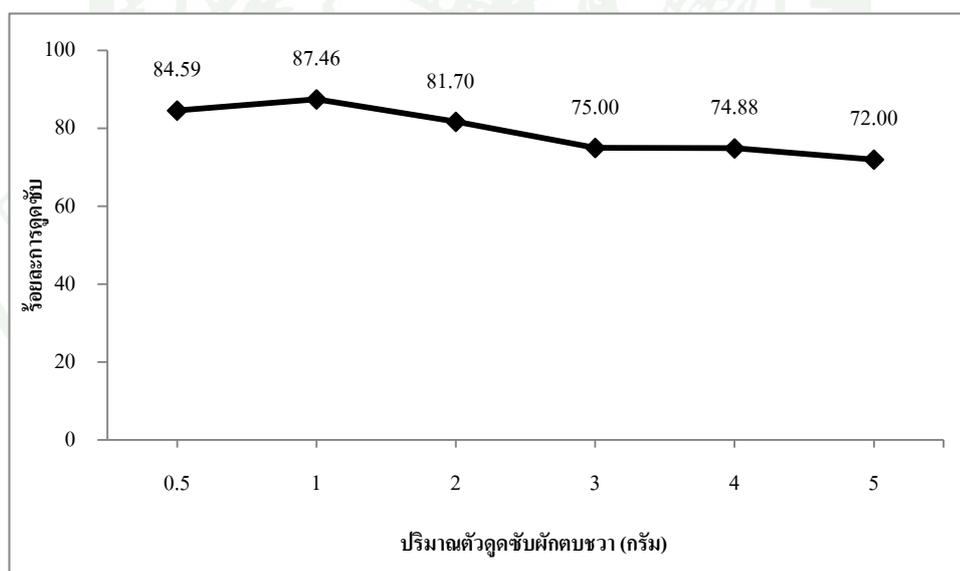
4.1 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับผักตบชวา

จากการทดลองในข้อที่ 5.1 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับผักตบชวาจาก 0.5 กรัมจนถึง 5 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง พบว่า ผักตบชวาปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละชนิด คือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 72.60, 87.31, 91.38, 92.33, 90.60 และ 90.55 ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 และให้ร้อยละโดยเฉลี่ยในการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดมากที่สุดเท่ากับ 87.46 ดังภาพที่ 23

จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.5 กรัมเป็น 1 กรัม ร้อยละการดูดซับสีย้อมทั้ง 6 ชนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับสีย้อม แต่หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มค่อยๆลดลงเนื่องจากปริมาณสีย้อมที่ตัวดูดซับผักตบชวาดูดซับได้ในแต่ละการทดลองมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นและอาจเกิดการคายซับร่วมด้วยจึงทำให้ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มลดลง (นิพนธ์และคณิตา, 2550)



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดกับปริมาณตัวดูดซับฝักคอบชา

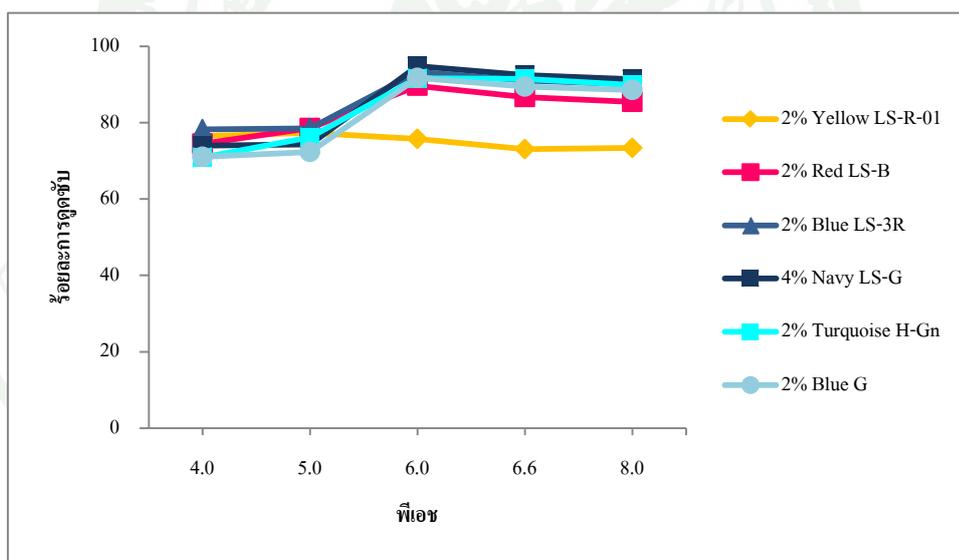


ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ โดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ กับปริมาณตัวดูดซับฝักคอบชา

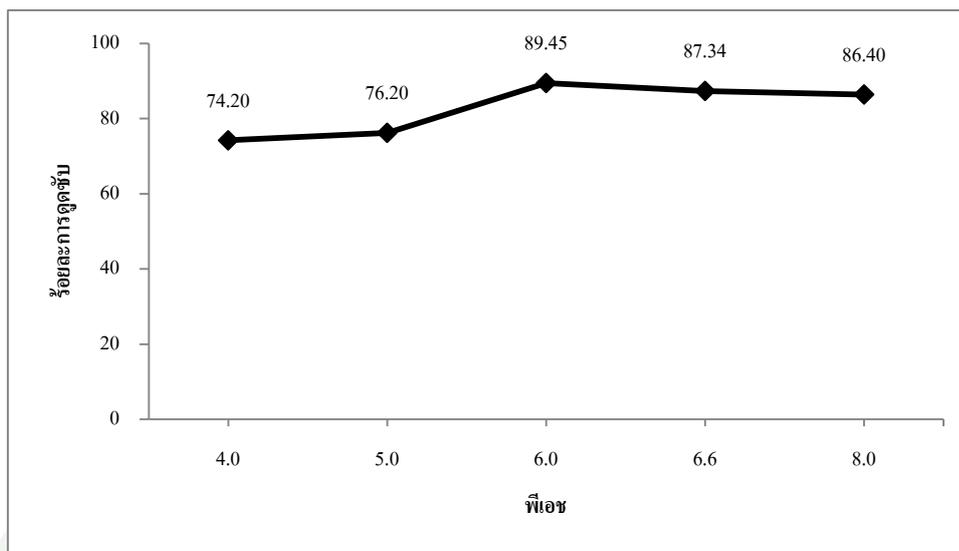
4.2 ผลการศึกษาพีเอชของน้ำเสียดังเคราะห์ต่อการดูดซับสีข้อม

จากการทดลองในข้อ 5.3 นำน้ำเสียดังเคราะห์มาปรับค่าพีเอชเป็น 4, 6, 6.6 (พีเอชของน้ำเสียดังเคราะห์ที่ไม่มีการปรับพีเอช) และ 8 ใช้ปริมาณตัวดูดซับผักตบชวา 1 กรัม ต่อน้ำเสียดังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร เขย่าและใช้ระยะเวลาเข้าสัมผัส 1 ชั่วโมง มีผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 6 สามารถดูดซับสีข้อมแต่ละชนิดคือ 2% Yellow LS-R-01, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 4% Navy LS-G, 2% Blue G และ 2% Turquoise ได้ร้อยละ 75.72, 89.64, 93.31, 94.76, 91.54 และ 91.67 ดังภาพที่ 24 และให้ร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีข้อม 6 ชนิด มากที่สุดเท่ากับ 89.45 ดังภาพที่ 25 อธิบายได้ว่า ที่พีเอช 6 เป็นสภาวะกรดอ่อนทำให้โครงสร้างของสีข้อมมีสภาพที่มีประจุอ่อนๆจึงสามารถแทรกตัวอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมแต่ละชนิดด้วยตัวดูดซับผักตบชวากับพีเอช

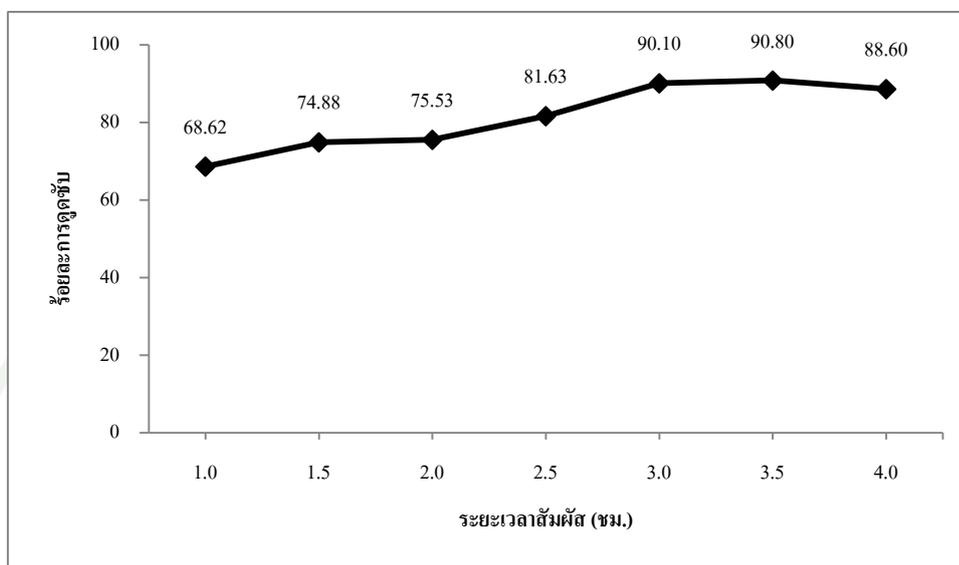


ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดในน้ำเสียดังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับผักตบชวากับพีเอช

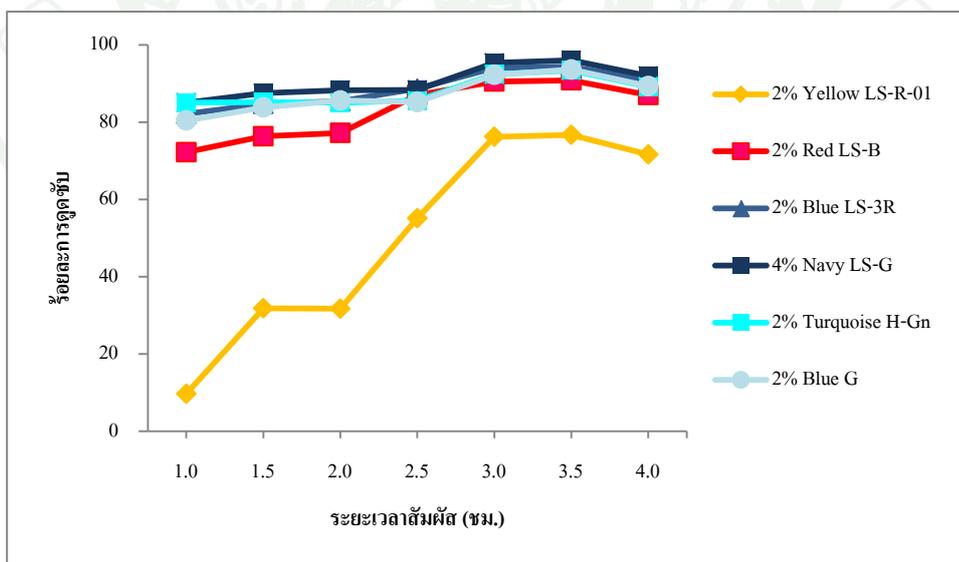
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสน้ำ

จากการทดลองข้อที่ 5.3 ทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัสน้ำเป็นชั่วโมง (1-4 ชม.) และวัน (1-5 วัน) ผลการทดลองประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียดังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสน้ำมากขึ้น ระยะเวลาสัมผัสน้ำแบบชั่วโมงที่ตัวดูดซับผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียดังเคราะห์ดีที่สุดคือ 3.5 ชั่วโมง ให้ร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดมากที่สุดเท่ากับ 90.80 แต่เนื่องจากที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำ 3 ชั่วโมงให้ร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดเท่ากับ 90.10 ดังภาพที่ 26 ซึ่งใกล้เคียงกับระยะเวลาสัมผัสน้ำที่ 3.5 ชั่วโมง จึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัสน้ำ 3 ชั่วโมงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม โดยผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำที่ 3 ชั่วโมงสามารถดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดคือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 72.60, 90.49, 94.00, 95.31, 92.34 และ 92.24 ตามลำดับ ดังภาพที่ 27 และระยะเวลาสัมผัสน้ำแบบวันที่สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุดคือ 2 สามารถดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดคือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 76.60, 90.90, 94.50, 95.76, 93.70 และ 93.77 ตามลำดับ ดังภาพที่ 28 และร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดมากที่สุดเท่ากับ 90.87 ดังภาพที่ 29 ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสน้ำมากขึ้นทำให้มีผลสารมีโอกาสสัมผัสน้ำ หรือถูกตัวดูดซับจากผักตบชวาได้มากขึ้น แต่พื้นที่ของตัวดูด

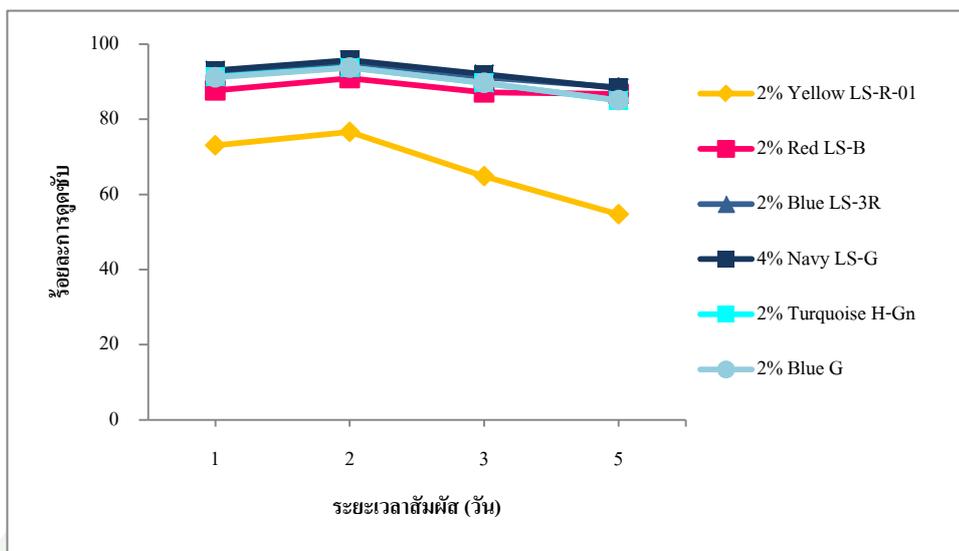
ชั้นมีจำกัด เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับจนเข้าสู่สถานะสมดุล ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ (นิพนธ์และคณิตา, 2550)



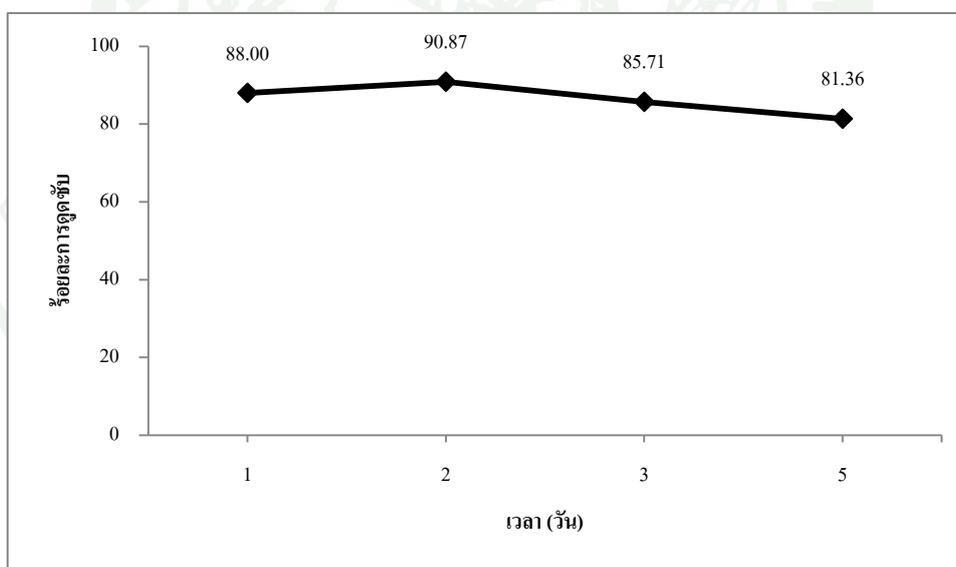
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์กับระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดด้วยตัวดูดซับผักตบชวา กับระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการงอกข้ามสปีชีส์ของแต่ละชนิดด้วยตัวงอกข้ามฝักตบชวากับระยะเวลาสัมพัทธ์เป็นวัน



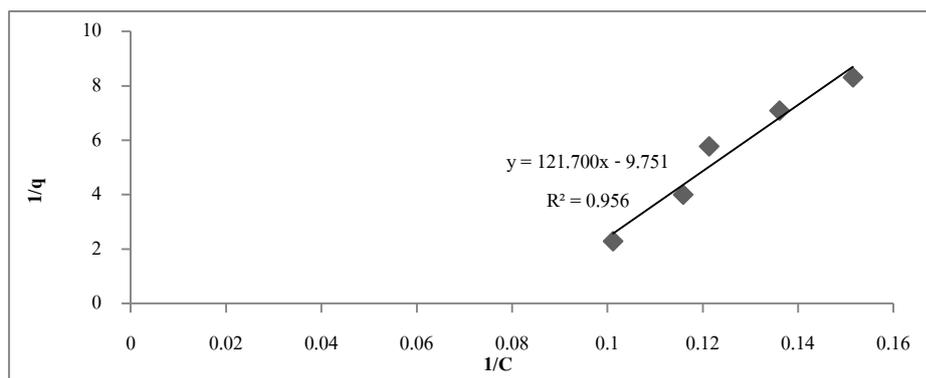
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการงอกข้ามสปีชีส์ 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์กับระยะเวลาสัมพัทธ์เป็นวัน

4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

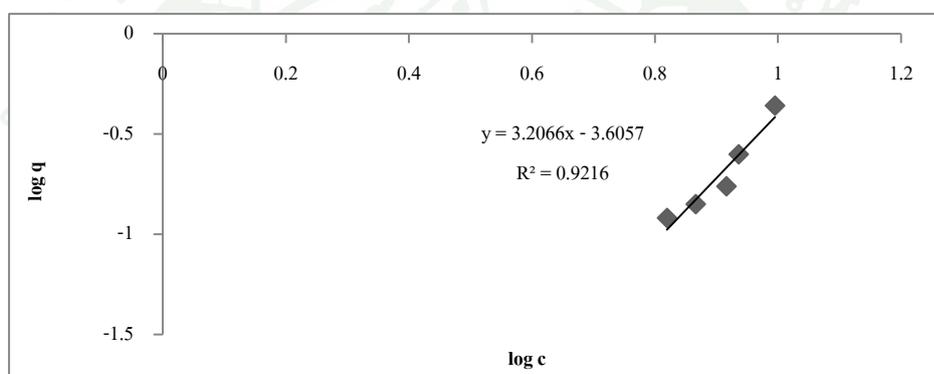
จากการทดลองที่ 5.5 นำผลการทดลองจากการศึกษาการดูดซับสี่ข้อมของผักตบชวา โดยแปรผันปริมาณผักตบชวา ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 1 ชั่วโมง มาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9560 และ 0.9210 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30 และ 31 ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นกลไกการดูดซับจึงสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช นั่นคือ กลไกการดูดซับของแลงเมียร์เป็นการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน (Johnson, 1989) และฟรุนดลิชเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (Buckley, 1992)

จากสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ จุดตัดแกน y มีค่าติดลบ (-9.751) ทำให้เส้นกราฟตัดแกน x ที่จุด $\frac{1}{C}$ มีค่ามากกว่าศูนย์ นั่นหมายถึง C ซึ่งหมายถึง ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าน้อยนั่นเอง ประกอบกับ ณ จุดนี้ $\frac{1}{q}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง q ซึ่งคือปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับมีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า C ที่มีค่าน้อย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับชนิดนั้นได้มาก ประกอบกับการทดลองมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ปริมาณตัวถูกดูดซับคงที่จึงส่งผลให้ C มีค่าน้อยมากและ q มีค่ามากนั่นเอง

ส่วนไอโซเทอร์มฟรุนดลิชของการดูดซับด้วยตัวดูดซับผักตบชวา ดังภาพที่ 31 เมื่อเปรียบเทียบสมการไอโซเทอร์มฟรุนดลิชที่ได้ กับสมการไอโซเทอร์มฟรุนดลิชทั่วไปคือ $\log q = \frac{1}{n} \log C + \log K$ พบว่า $\frac{1}{n}$ มีค่ามาก (ความชันมาก) แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับผักตบชวาในทุกค่าความเข้มข้น (C) มีความสามารถสูง หรือกล่าวได้ว่า ตัวดูดซับผักตบชวามีพื้นที่ผิวดูดซับปริมาณมาก (นิพนธ์และคณะ, 2550)



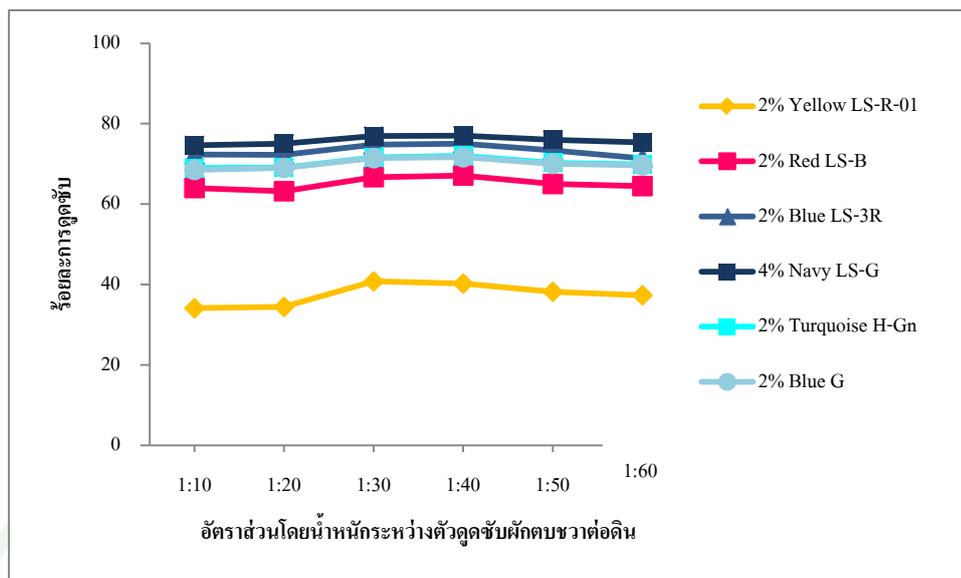
ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับสี้อมด้วยตัวดูดซับผักตบชวา



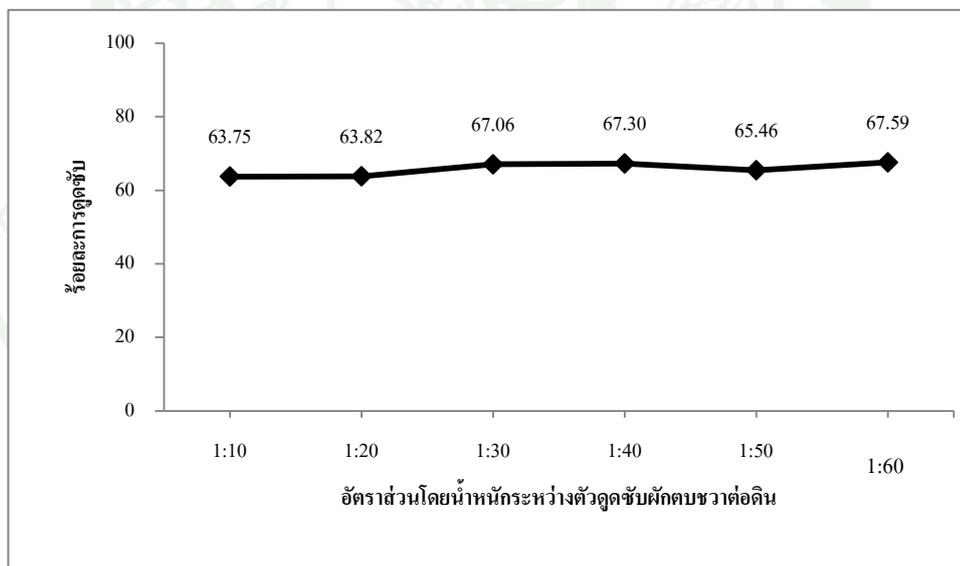
ภาพที่ 31 ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับสี้อมด้วยตัวดูดซับผักตบชวา

4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตัวดูดซับผักตบชวาต่อดิน

จากการทดลองข้อที่ 5.4 แปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับผักตบชวาต่อดิน ดังนี้ 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับพีเอช 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณตัวดูดซับผักตบชวาต่อดินที่อัตราส่วนแตกต่างกันมีแนวโน้มแตกต่างกันไม่มากจึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับผักตบชวาต่อดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ คือ 1:30 โดยสามารถดูดซับสี้อมแต่ละชนิดคือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 40.79, 66.70, 74.75, 76.90, 71.58 และ 71.43 ตามลำดับ ดังภาพที่ 32 และให้ร้อยละเฉลี่ยของการดูดซับสี้อม 6 ชนิดมากที่สุดเท่ากับ 67.06 ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่ย้อมแต่ละชนิดกับปริมาณตัวดูดซับผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ



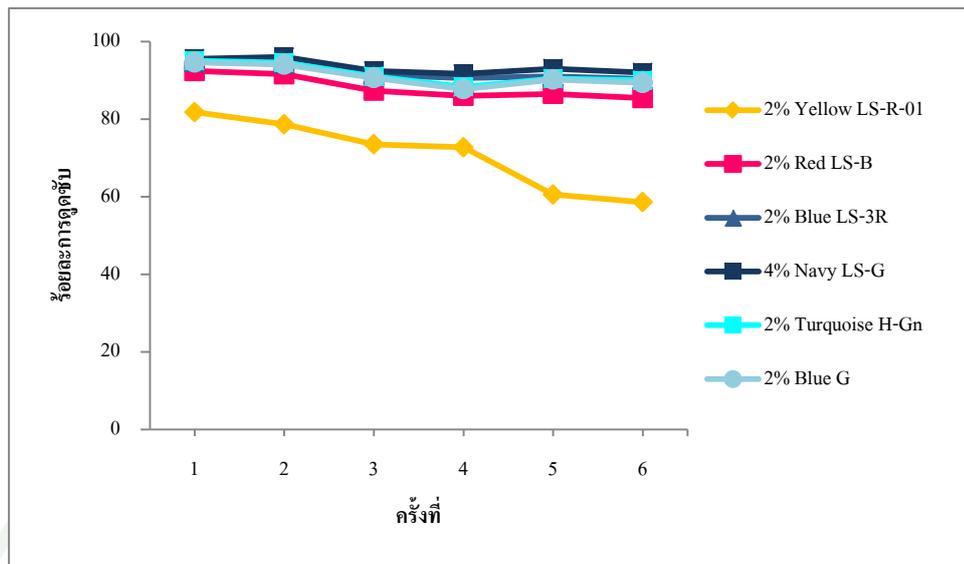
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสี่ย้อม 6 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์กับปริมาณตัวดูดซับผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ

5. ผลการทดลองแบบคอลัมน์

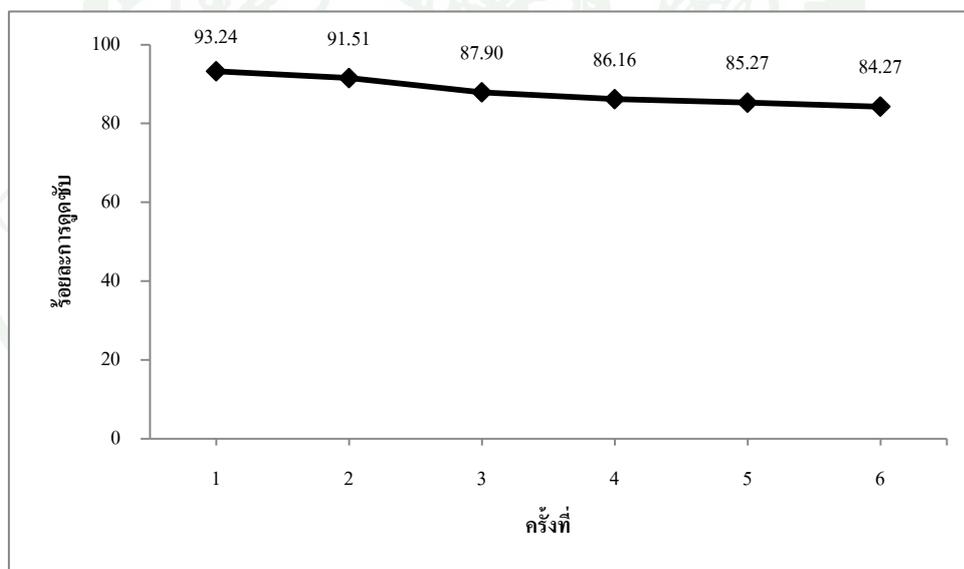
เป็นการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของชั้นวัสดุปลูกที่จำลองใส่ในคอลัมน์แก้วและบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 3 แบบ คือแบบแข่งด้วยระยะเวลาเป็นชั่วโมง, แบบแข่งด้วยระยะเวลาเป็นวันและแบบปล่อยผ่าน

5.1 แบบแข่งด้วยระยะเวลาเป็นชั่วโมง

แช่น้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูก แข่งไว้ 3 ชั่วโมง ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ออกจากคอลัมน์ พบว่าครั้งแรกมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดโดยสามารถดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดคือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 81.77, 92.38, 94.73, 95.54, 95.00 และ 94.60 ตามลำดับ ดังภาพที่ 34 และให้ร้อยละเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดมากที่สุดเท่ากับ 93.24 ดังภาพที่ 35 และมีแนวโน้มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมลดลงอย่างต่อเนื่องในการบำบัดครั้งต่อไป อธิบายได้ว่า การบำบัดในครั้งแรก พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับผักตบชวาและดินยังมีพื้นที่ดูดซับเป็นจำนวนมากจึงให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสูง แต่เมื่อผ่านการดูดซับสีย้อมไปหลายๆครั้ง พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับผักตบชวาและดินลดน้อยลง เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสถูกครอบครองด้วยโมเลกุลสีย้อมจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดน้อยลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 3 ชั่วโมง

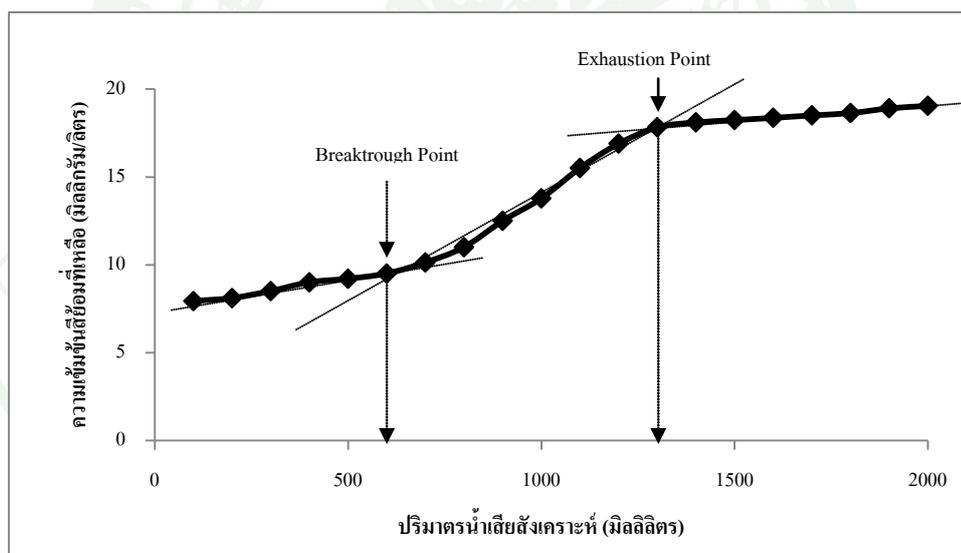


ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 3 ชั่วโมง

โดยในการทดลองแบบไหลต่อเนื่องสามารถหาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ ที่มีความเป็นไปได้ในการดูดซับ คือเมื่อตัวถูกดูดซับไหลผ่านตัวดูดซับ ตัวดูดซับชั้นบนจะหมด

ประสิทธิภาพการดูดซับก่อน และชั้นของตัวดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาการใช้งาน หลังจากนั้นความเข้มข้นจะถึงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ เรียกว่า จุดเบรคทรูจ (Breakthrough Point) ซึ่งการทดลองนี้เมื่อพลอตกราฟเบรคทรูจระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้กับความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือ เพื่อดูประสิทธิภาพของตัวดูดซับผักตบชวาได้ผลดังภาพที่ 35 ซึ่งมีเส้นโค้งเบรคทรูจ (Breakthrough Curve) เป็นเวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุด เบรคทรูจ เรียกว่า เวลาการใช้งาน

เมื่อคำนวณปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำที่ปล่อยออกจากคอลัมน์ หลังการแข่งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ครั้งละ 100 มิลลิลิตร และสร้างกราฟเบรคทรูจ พบว่าจุดเบรคทรูจหรือจุดที่ตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพอยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 600 มิลลิลิตร มีปริมาณสีย้อมผ้าเหลือ 9.50 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพ(Exhaustion Point)อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 1,300 มิลลิลิตร มีปริมาณสีย้อมเหลือ 17.83 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงดังภาพที่ 36

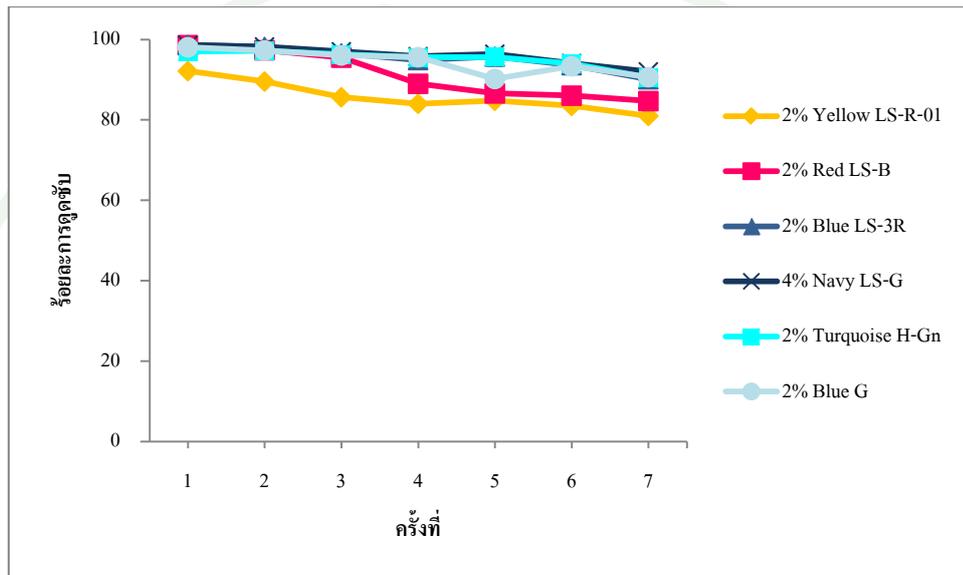


ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแข่ง 3 ชั่วโมง

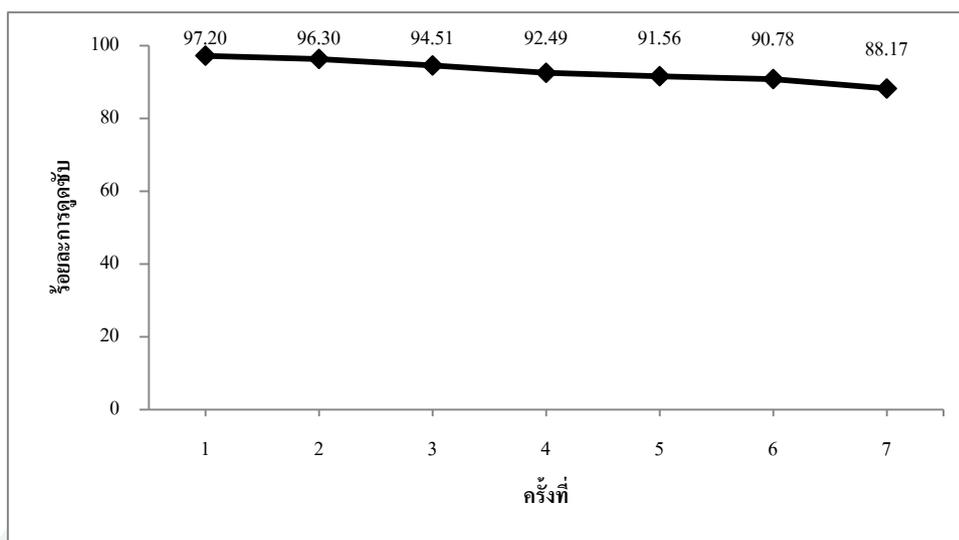
5.2 แบบแข่งด้วยระยะเวลาเป็นวัน

แช่น้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูก แข่งไว้ 2 วัน ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ออกจากคอลัมน์และปล่อยแห้ง 2 วัน พบว่า ครั้งแรกมีประสิทธิภาพในการบำบัดดี

ที่สุดโดยสามารถดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดคือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 92.15, 98.63, 98.66, 98.60, 97.05 และ 98.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 37 และให้ร้อยละ โดยเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดมากที่สุดเท่ากับ 97.20 ดังภาพที่ 38 และมีแนวโน้มประสิทธิภาพของการบำบัดสีลดลงอย่างต่อเนื่องในการบำบัดครั้งต่อไป อธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.1

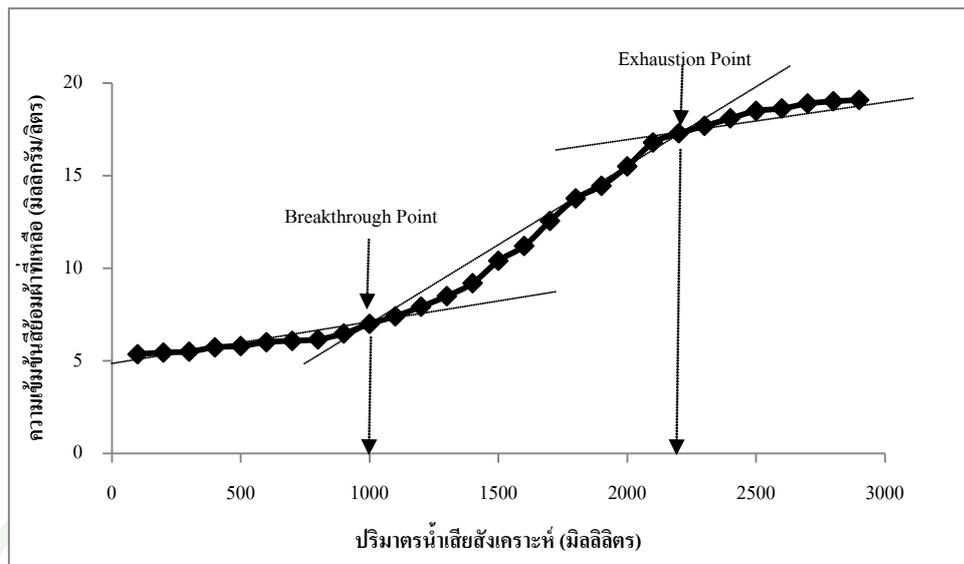


ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ โดยเฉลี่ยของการบำบัดสีข้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์ กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน

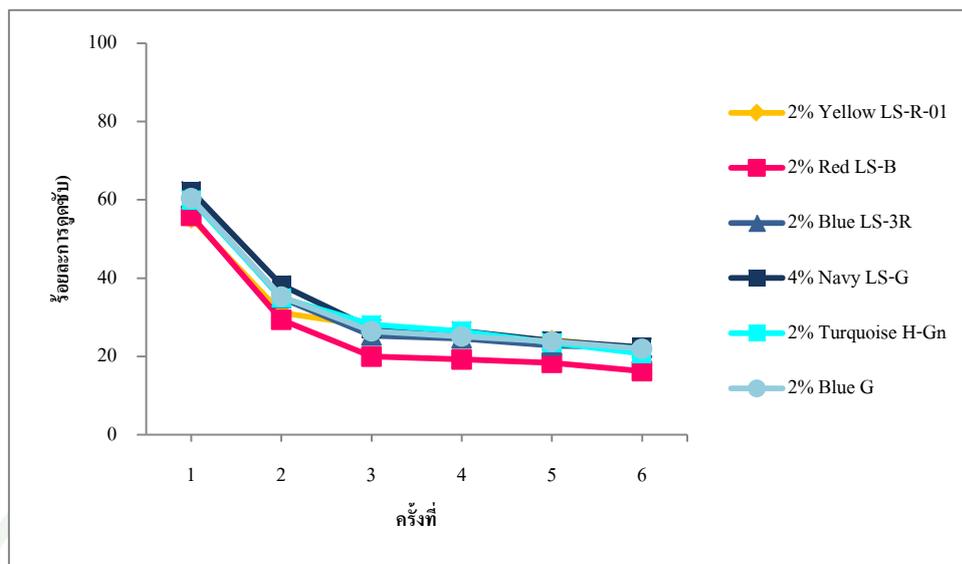
เมื่อคำนวณปริมาณสีข้อมที่เหลืออยู่ในน้ำที่ปล่อยออกจากคอลัมน์ หลังการแข่งเป็นเวลา 2 วัน โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ครั้งละ 100 มิลลิลิตร และสร้างกราฟเบรคทรูจ พบว่าจุดเบรคทรูจอยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มิลลิลิตร มีปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือ 7.00 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพอยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 2,200 มิลลิลิตร มีปริมาณสีข้อมเหลือ 17.30 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงดังภาพที่ 39



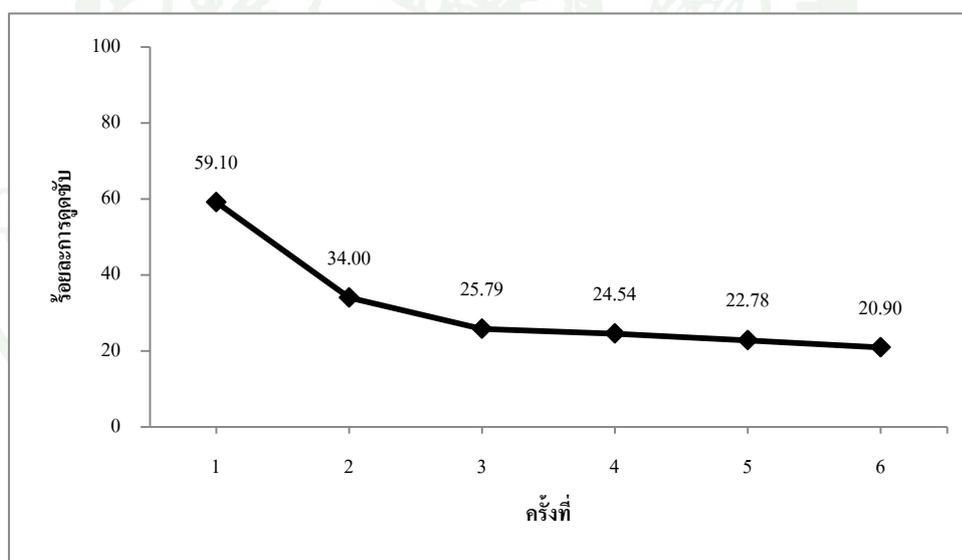
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่าน คอลัมน์แบบแซงซ์ 2 วัน

5.3 แบบปล่อยผ่าน

ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ 3,000 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์อย่างต่อเนื่องเก็บน้ำตัวอย่างที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีของดีที่สุดในการบำบัดครั้งแรก และลดลงอย่างต่อเนื่องโดยสามารถดูดซับสีของแต่ละชนิดคือ 2% Yellow LS-R-01, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 4% Navy LS-G, 2% Blue G และ 2% Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 55.34, 55.92, 60.54, 62.30, 60.44 และ 60.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 40 และให้ร้อยละ โดยเฉลี่ยของการดูดซับสีของ 6 ชนิดโดยเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 59.10 ดังภาพที่ 41 อธิบายได้เช่นเดียวกับข้อที่ 5.1



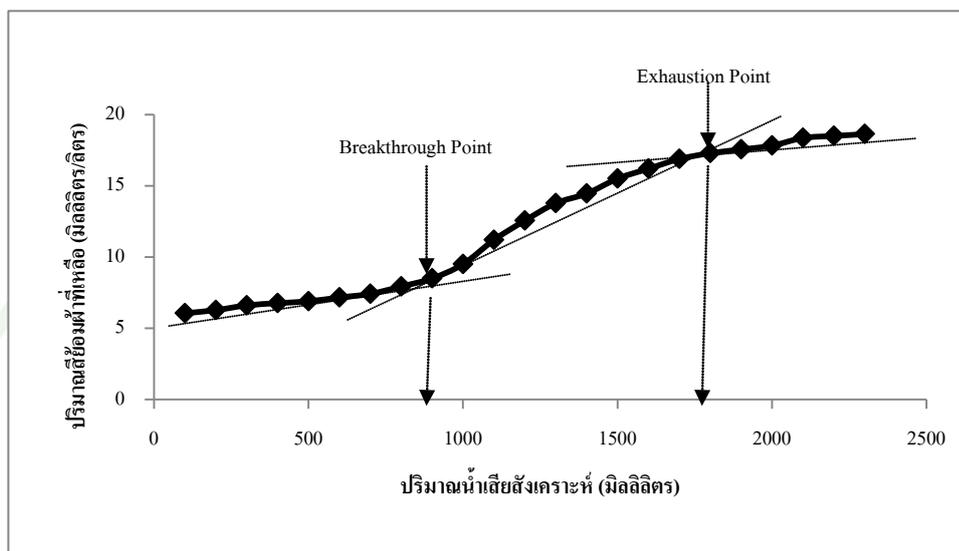
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดแบบปล่อยผ่านกับครั้งที่ของการเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 15 นาที



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ โดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อม 6 ชนิดแบบปล่อยผ่านในน้ำเสียสังเคราะห์กับครั้งที่ของการเก็บตัวอย่างครั้งละ 15 นาที

เมื่อคำนวณปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำที่ปล่อยออกจากคอลัมน์ หลังการปล่อยผ่านน้ำเสียสังเคราะห์อย่างต่อเนื่อง และสร้างกราฟเบรคทรุจ พบว่าจุดเบรคทรุจอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย

สังเคราะห์ 900 มิลลิลิตร มีปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือ 8.50 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพอยู่ที่ ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 1,800 มิลลิลิตร มีปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือ 17.30 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีข้อมฟ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่าน คอลัมน์แบบปล่อยผ่าน

จากการทดลองแบบคอลัมน์ทั้ง 3 วิธี โดยใช้วิธีการบำบัดที่แตกต่างกันคือ แบบแข่งขันเป็น ชั่วโมง แบบแข่งขันเป็นวัน และแบบปล่อยผ่าน พบว่า การบำบัดทั้ง 3 วิธี มีแนวโน้มการบำบัดที่ เหมือนกันคือ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมดีที่สุดในการบำบัดครั้งแรกและประสิทธิภาพในการ บำบัดจะลดลงอย่างต่อเนื่องในการบำบัดครั้งต่อไป และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดย พิจารณาจากจุดเริ่มหมดสภาพและจุดหมดสภาพดังตารางที่. 6 จากการทดลองทั้ง 3 วิธีพบว่า แบบ แข่งขันเป็นวัน ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกแบบแข่งขันเป็นวัน ไปใช้ในการ ทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่จุดเริ่มหมดสภาพและจุดหมดสภาพ

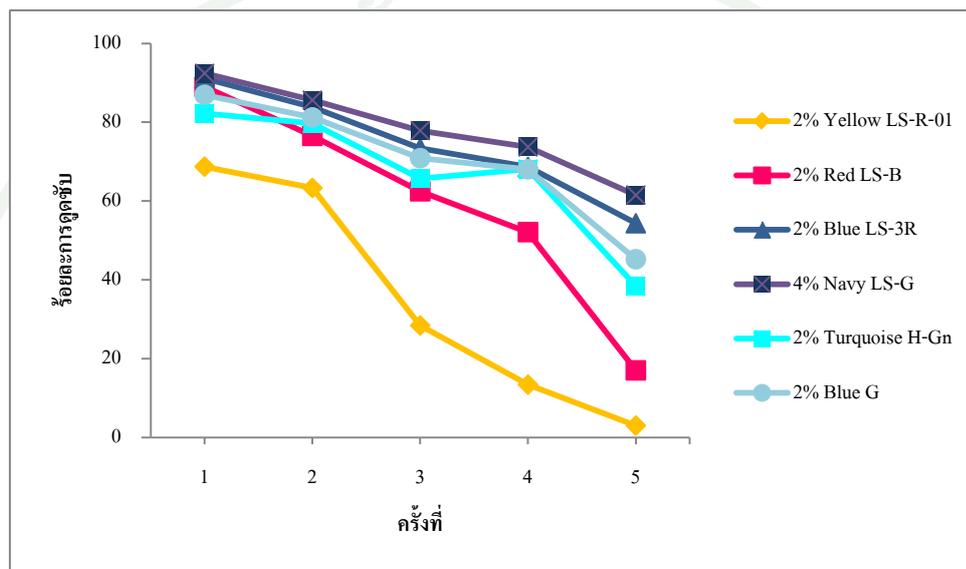
วิธีการบำบัด	จุดเริ่มหมดสภาพ	จุดหมดสภาพ
1. แบบแข่งด้วยระยะเวลา เป็นชั่วโมง		
ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	600 มิลลิลิตร	1,300 มิลลิลิตร
ปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือง	9.50 มิลลิกรัม/ลิตร	17.83 มิลลิกรัม/ลิตร
2. แบบแข่งด้วยระยะเวลา เป็นวัน		
ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	1,000 มิลลิลิตร	2,200 มิลลิลิตร
ปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือง	7.00 มิลลิกรัม/ลิตร	17.30 มิลลิกรัม/ลิตร
3. แบบปล่อยผ่าน		
ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	900 มิลลิลิตร	1,800 มิลลิลิตร
ปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือง	8.50 มิลลิกรัม/ลิตร	17.30 มิลลิกรัม/ลิตร

6. ผลการทดลองการจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมแบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน

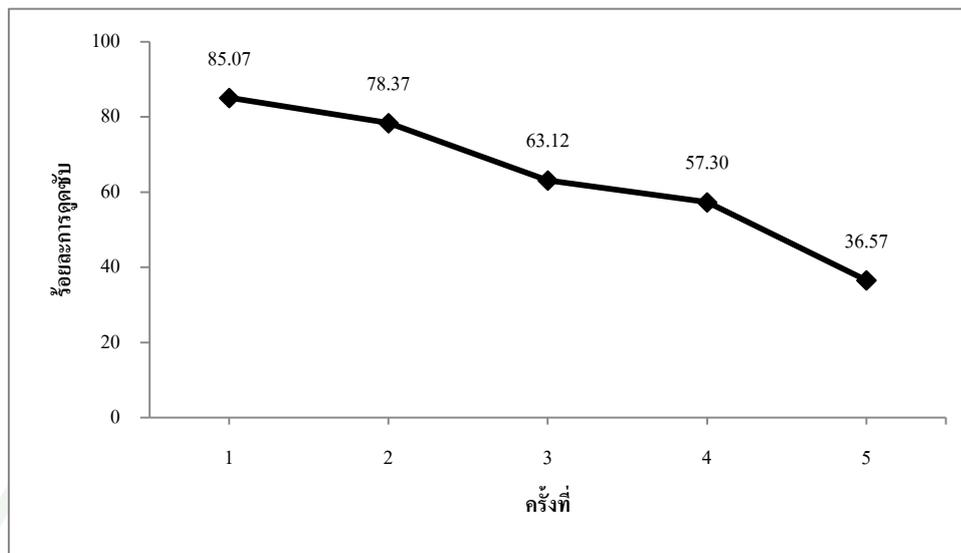
6.1 การจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมแบบน้ำไหลอยู่เหนือผิวดินกับการปลูกหญ้าแฝก

จากการทดลองด้วยกระบะที่บรรจุวัสดุปลูกผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนที่ได้จากผลการทดลองในข้อที่ 4.5 คือ 1:30 และเข้าน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 20 ลิตร เป็นระยะเวลา 2 วัน และปล่อยแห้ง 2 วัน ตามผลการทดลองในข้อที่ 5.2 ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมดีที่สุดในครั้งแรก โดยสามารถดูดซับสีข้อมแต่ละชนิดคือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B, 2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 68.72, 89.00, 91.14, 92.41, 82.20 และ 86.95 ตามลำดับ ดังภาพที่ 43 และให้ร้อยละโดยเฉลี่ยของการดูดซับสีข้อม 6 ชนิดมากที่สุดเท่ากับ 85.07 ดังภาพที่ 44 และพบว่า การบำบัดในครั้งต่อไป ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกับการทดลองแบบคอลัมน์และพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าแบบคอลัมน์ แสดงว่าพืชไม่ได้ช่วยในการกำจัดสีข้อมนอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมระหว่างกระบะที่ใช้วัสดุปลูกเป็นผักตบชวา

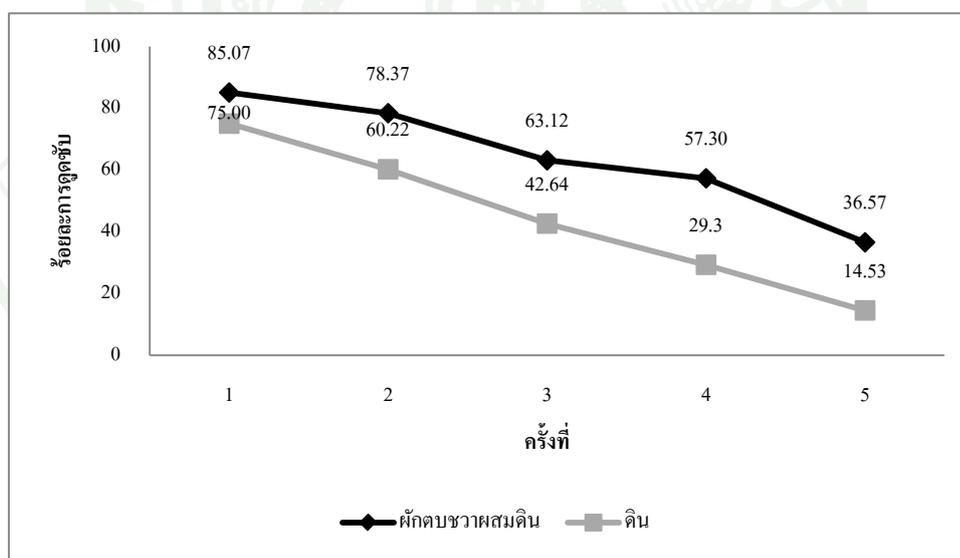
ผสมดินกับกระบะที่ใช้วัสดุปลูกเป็นดินเพียงอย่างเดียว พบว่ากระบะที่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูกเพียงเดียวให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่ากระบะที่ใช้วัสดุปลูกเป็นผักตบชวาผสมดิน ดังภาพที่ 45 เนื่องจากผักตบชวามีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารต่างๆและสีได้ดีกว่าดิน จึงทำให้กระบะที่ใช้วัสดุปลูกเป็นผักตบชวาผสมดินมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่ากระบะที่ใช้วัสดุปลูกเป็นดินเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีข้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วันร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก



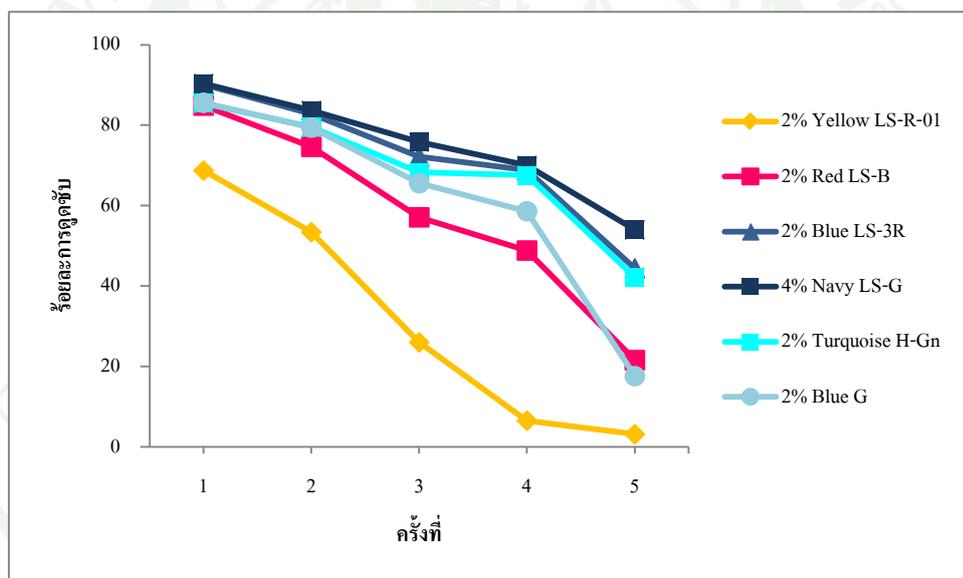
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ โดยเฉลี่ยของการบำบัดสีข้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์ กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วันรวมกับการปลูกหญ้าแฝก



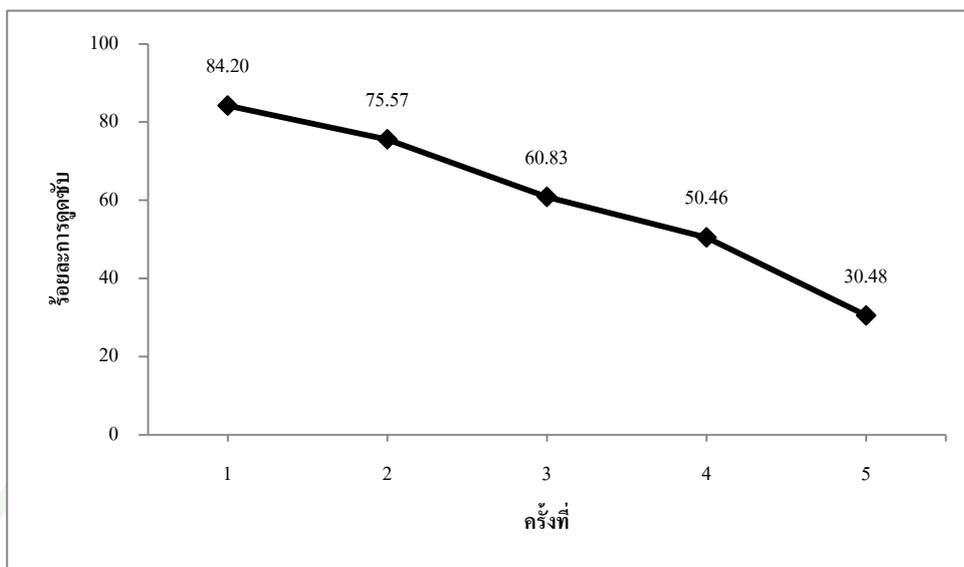
ภาพที่ 45 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมโดยเฉลี่ยระหว่างกระบะที่ใช้วัสดุปลูกเป็นตัวดูดซับฟักคบชาวมสมดินกับกระบะที่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูกเพียงอย่างเดียว

6.2 การจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมแบบน้ำไหลอยู่เหนือผิวดินร่วมกับการปลูก รูปถ่าย

จากการทดลองด้วยกระบอกที่บรรจุวัสดุปลูกเป็นผักตบชวาผสมดินในอัตราส่วนที่ได้
จากผลการทดลองในข้อที่ 5.4 คือ 1:30 และแข่งขันน้ำเสียสังเคราะห์ไว้เป็นระยะเวลา 2 วันปล่อยแห้ง
2 วัน ตามผลการทดลองในข้อที่ 5.2 ร่วมกับการปลูกรูปถ่าย พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมดี
ที่สุดในครั้งที่แรก โดยสามารถดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดคือ 2%Yellow LS-R-01, 2%Red LS-B,
2%Blue LS-3R, 4%Navy LS-G, 2%Blue G และ 2%Turquoise H-Gn ได้ร้อยละ 68.72, 84.90,
90.10, 90.38, 85.46 และ 85.60 ดังภาพที่ 46 และร้อยละการเฉลี่ยของการดูดซับสีย้อม 6 ชนิดมาก
ที่สุดเท่ากับ 84.20 ดังภาพที่ 47 ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1



ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมแต่ละชนิดกับครั้งที่ของการทดลองที่
ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน ร่วมกับการปลูกรูปถ่าย



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ โดยเฉลี่ยของการบำบัดสีข้อม 6 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์ กับครั้งที่ของการทดลองที่ระยะเวลาบำบัดครั้งละ 2 วัน ร่วมกับการปลูกธูปฤาษี

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมระหว่างหญ้าแฝกและธูปฤาษีพบว่า พืชทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมที่ใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 85.07 และร้อยละ 84.20 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมมาตรฐานทั้ง 6 ชนิดในการบำบัดครั้งแรกของธูปฤาษีและหญ้าแฝก ดังแสดงในตารางที่ 6 เนื่องจากรากของพืชทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ เป็นระบบรากที่แผ่กว้าง มีรากฝอยที่แข็งแรงกระจายทั่วพื้นที่ จึงทำให้มีการลำเลียงออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงไปยังรากได้ในปริมาณที่มาก จึงเป็นการเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และโมเลกุลสีข้อม(คารินท์, 2551) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พืชทั้ง 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมใกล้เคียงกัน และจะเห็นได้ว่า กระบะควบคุมที่ใช้ดินไม่ผสมตัวดูดซับผักตบชวาและปลูกหญ้าแฝกมีประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมทั้ง 6 ชนิด ต่ำกว่ากระบะที่ใช้ดินผสมตัวดูดซับผักตบชวาและปลูกหญ้าแฝก

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม 6 ชนิด ระหว่างหญ้าแฝก ฐปฤณี และชุดควบคุมที่ปลูกหญ้าแฝก

ชนิดสีย้อม	ร้อยละการบำบัดครั้งที่ 1		
	หญ้าแฝก	ฐปฤณี	ชุดควบคุมปลูกหญ้าแฝก
2% Yellow LS-R-01	68.71	68.72	61.81
2% Red LS-B	89.00	84.90	77.80
2% Blue LS-3R	91.14	90.1	78.60
4% Navy LS-G	92.41	90.38	79.90
2% Blue G	82.20	85.46	74.43
2% Turquoise H-Gn	86.95	85.60	77.20

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการใช้ประโยชน์ตัวดูดซับชีวมวลจากลำต้นผักตบชวาเป็นวัสดุปลูกในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อกำจัดสีย้อมผ้าพบว่า ตัวดูดซับผักตบชวามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดี

โดยการทดลองแบบแบตช์ พบว่า ตัวดูดซับผักตบชวา 1 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตรที่ค่าพีเอช 6 และระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ร้อยละเฉลี่ย 90.10 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผักตบชวากับดินที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมดีที่สุดคือ 1:30 ซึ่งสามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 67.06 โดยมีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดลิชและแลงเมียร์จากผลการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 วิธี คือ การทดลองแบบแช่ขังด้วยระยะเวลาเป็นชั่วโมงโดยระยะเวลาเป็นชั่วโมงที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมดีที่สุดคือ 3 ชั่วโมง การทดลองแบบแช่ขังด้วยระยะเวลาเป็นวันโดยระยะเวลาเป็นวันที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมดีที่สุดคือ 2 วันและการทดลองแบบปล่อยผ่าน พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเฉลี่ยร้อยละ 93.24, 97.20 และ 59.10 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าการทดลองแบบแช่ขังด้วยระยะเวลาเป็นวันให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมดีที่สุดและในส่วนของ การทดลองการจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมแบบน้ำอยู่เหนือผิวดินร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ หญ้าแฝกและรูปฤาษี พบว่าหญ้าแฝกและรูปฤาษีให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ยร้อยละ 85.07 และ 84.20 ตามลำดับ นอกจากนี้การทดลองการจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมแบบน้ำอยู่เหนือผิวดินที่ใช้วัสดุปลูกเป็นผักตบชวาผสมดินมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมากกว่าการทดลองการจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมแบบน้ำอยู่เหนือผิวดินที่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูกเพียงอย่างเดียวซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉลี่ยร้อยละ 75.00 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อกำจัดสีย้อมได้

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากตัวดูดซับชีวมวลจากผักตบชวามีความสามารถในการกำจัดสีข้อมที่สูงจึงควรมีการนำมาประยุกต์และนำไปใช้ในพื้นที่โรงงานฟอกข้อมสิ่งทอขนาดเล็กและขนาดกลางเพื่อเป็นการกำจัดสีข้อมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำ
2. ควรมีการศึกษาการนำเอาส่วนต่างๆของผักตบชวามาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นตัวดูดซับทางชีวมวลต่อไป
3. ศึกษาและประยุกต์การนำเอาตัวดูดซับชีวมวลจากผักตบชวาไปใช้ในการบำบัดมลสารอื่นๆ จากแหล่งน้ำทิ้งต่างๆ เช่น น้ำทิ้งจากอาคารและชุมชน น้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมและโรงงานอุตสาหกรรม
4. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับชีวมวลจากผักตบชวาในการดูดซับสีข้อมชนิดอื่นๆ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือผู้ควบคุมและผู้ปฏิบัติงานระบบบำบัดมลพิษโรงงาน. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.

จิระศักดิ์ แสงพุ่ม, เดชา นัครศิริเวช และวิจิตรา จงศิลา. 2543. ผลของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาสำหรับการดูดซับไอเบนซิน. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต 4(1) : 48-54

จินตนา จุลอุล. 2550. การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกที่จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกสีย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คารินทร์ แซ่ตั้ง. 2551. การใช้หญ้าแฝกในการบำบัดน้ำจากโรงนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2555. สีย้อมรีแอคทีฟ. แหล่งที่มา:

<http://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive>, 5 ธันวาคม 2557.

บุษยา มากงลาด. 2555. การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดูด้วยผงบิผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เปล่งศักดิ์ ภู่อจร. 2546. การใช้เรซินผักตบชวาบำบัดสีจากน้ำเสียย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- มูลนิธิชัยพัฒนา. 2543. **คู่มือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริ**. วิทยาลัย
สิ่งแวดลอม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วีรัญญู สงกรานต์. 2549. **การศึกษาสมรรถนะในการดูดติดสีย้อมรีแอกทีฟโดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิต
จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัชพืช**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2530. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสีย้อม:
ไคเรกท์**. มอก. 739-2530.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. **คู่มือ
การจัดการสิ่งแวดล้อมฟอกย้อม**. กรุงเทพฯ.
- อศปภา สุขอั้งจะสกุล. 2555. **การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย
โดยใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาและกกกลม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อัจฉรากร ไสละสูต. 2527. **คู่มือการย้อมสี**. เทคนิค 19 การพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- อดิศักดิ์ อัญชลีสังกาศ. 2546. **การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทราย
และการดูดซับด้วยซีเมนต์เคลือบดำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Buckley, C.A. 1992. Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents. **Wat
Sci.Tech.** 25: 203-209.
- International Pectin Producer' s Association. 2001. **What is Pectin**. Available Source:
<http://www.ippa.info>, March 25, 2006.
- Johnson, A.T. 1989. The theory of coloration of textiles. **Society of Dyes and Colorist.** 90:
912-920.

Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse.**

3rd ed., McGraw-Hill, Inc., Singapore.

Ghash, M.M., F.E. Woodard, O.T. Sproul, P.B. Knowlton and P.D. Gvertin. 1978. Treatability studies and design considerations for textile wastewater. **Water and Waste End.**

15(4): 35-41.

Santhy, K. and P. Selvathy. 2006. **Removal of Reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon.** *Bioresource Technology*, (97): 1623-1629.

Senthikumar, S., P. Kalaamani, K. Porkodi, P. Varadarajan, R., and S. Pattabhi. 2003.

Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dye and metal ions from aqueous solutions. **Bioresource Technology**, (87) : 129-132.



ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีขึ้นอยู่กับปริมาณผักตบชวา 0.5 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณผักตบชวา 0.5 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.303	0.302	0.303	0.303	67.31
546	0.946	0.150	0.151	0.150	0.150	84.14
588	1.196	0.135	0.136	0.135	0.135	88.14
616	1.278	0.137	0.136	0.137	0.137	89.71
660	0.889	0.101	0.102	0.101	0.101	88.63
662	0.915	0.096	0.097	0.096	0.096	89.51

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีขึ้นอยู่กับปริมาณผักตบชวา 1 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณผักตบชวา 1 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.254	0.256	0.254	0.254	72.60
546	0.946	0.120	0.121	0.121	0.120	87.37
588	1.196	0.103	0.103	0.103	0.103	91.38
616	1.278	0.098	0.099	0.098	0.098	92.33
660	0.889	0.084	0.085	0.084	0.084	90.55
662	0.915	0.086	0.086	0.086	0.086	90.60

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับปริมาณผักตบชวา 2 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณผักตบชวา 2 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.418	0.418	0.419	0.418	54.90
546	0.946	0.122	0.121	0.122	0.122	87.00
588	1.196	0.133	0.133	0.132	0.133	88.87
616	1.278	0.146	0.147	0.146	0.146	88.58
660	0.889	0.131	0.132	0.131	0.131	85.26
662	0.915	0.132	0.132	0.132	0.132	85.57

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับปริมาณผักตบชวา 3 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณผักตบชวา 3 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.629	0.628	0.629	0.629	32.15
546	0.946	0.222	0.223	0.221	0.221	76.53
588	1.196	0.181	0.182	0.181	0.181	84.90
616	1.278	0.165	0.164	0.165	0.165	87.10
660	0.889	0.140	0.141	0.140	0.140	84.25
662	0.915	0.138	0.139	0.138	0.138	85.00

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีขึ้นอยู่กับปริมาณผักตบชวา 4 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณผักตบชวา 4 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.688	0.688	0.687	0.687	26.86
546	0.946	0.221	0.222	0.221	0.221	77.70
588	1.196	0.171	0.172	0.171	0.171	85.70
616	1.278	0.153	0.154	0.153	0.153	88.00
660	0.889	0.130	0.131	0.130	0.130	85.40
662	0.915	0.132	0.132	0.132	0.132	85.60

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีขึ้นอยู่กับปริมาณผักตบชวา 5 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณผักตบชวา 5 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.835	0.834	0.835	0.835	10.00
546	0.946	0.266	0.267	0.266	0.266	72.00
588	1.196	0.212	0.211	0.212	0.212	82.27
616	1.278	0.212	0.213	0.212	0.212	82.27
660	0.889	0.176	0.177	0.176	0.176	80.20
662	0.915	0.160	0.161	0.160	0.160	82.51

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวกับค่าพีเอช 4

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 4				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.218	0.219	0.218	0.218	76.48
546	0.946	0.213	0.214	0.213	0.213	74.48
588	1.196	0.260	0.261	0.260	0.260	78.26
616	1.278	0.333	0.332	0.333	0.333	73.94
660	0.889	0.430	0.431	0.430	0.430	70.92
662	0.915	0.266	0.265	0.266	0.266	71.01

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวกับค่าพีเอช 5

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 5				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.210	0.210	0.210	0.210	77.35
546	0.946	0.203	0.202	0.203	0.203	78.54
588	1.196	0.257	0.256	0.257	0.257	78.51
616	1.278	0.328	0.329	0.328	0.328	74.33
660	0.889	0.218	0.219	0.218	0.218	76.14
662	0.915	0.422	0.255	0.252	0.253	72.31

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับค่าพีเอช 6

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 6				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.225	0.226	0.225	0.225	75.72
546	0.946	0.098	0.099	0.098	0.098	89.64
588	1.196	0.082	0.081	0.082	0.082	93.31
616	1.278	0.067	0.066	0.067	0.067	94.76
660	0.915	0.077	0.076	0.077	0.077	91.58
662	0.889	0.073	0.074	0.074	0.074	91.67

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับค่าพีเอช 6.6

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 6.6				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.250	0.250	0.250	0.250	73.03
546	0.946	0.126	0.125	0.126	0.126	86.68
588	1.196	0.107	0.107	0.106	0.107	91.05
616	1.278	0.097	0.097	0.097	0.097	92.41
660	0.915	0.078	0.078	0.078	0.078	91.47
662	0.889	0.095	0.094	0.094	0.094	89.42

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเทียบกับค่าพีเอช 8

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 8				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.247	0.248	0.247	0.247	73.35
546	0.946	0.138	0.138	0.138	0.138	85.41
588	1.196	0.120	0.121	0.120	0.120	90.00
616	1.278	0.110	0.112	0.110	0.110	91.39
660	0.915	0.093	0.092	0.093	0.093	89.93
662	0.889	0.102	0.101	0.102	0.102	88.53

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเทียบกับระยะเวลาสัมผัสที่ 1 ชั่วโมง

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 1 ชม.				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.837	0.837	0.837	0.837	9.7
546	0.946	0.263	0.263	0.264	0.263	72.20
588	1.196	0.214	0.215	0.214	0.214	82.10
616	1.278	0.192	0.193	0.192	0.192	85.00
660	0.915	0.162	0.162	0.162	0.162	82.30
662	0.889	0.174	0.173	0.174	0.174	80.43

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเทียบกับระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 1.30 ชั่วโมง

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 1.30 ชม.				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.633	0.632	0.633	0.633	31.72
546	0.946	0.216	0.217	0.216	0.216	77.20
588	1.196	0.176	0.175	0.175	0.175	85.40
616	1.278	0.150	0.150	0.150	0.150	88.26
662	0.915	0.132	0.132	0.131	0.132	85.57
660	0.889	0.133	0.133	0.133	0.133	85.04

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเทียบกับระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 2 ชั่วโมง

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 ชม.				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.632	0.632	0.632	0.632	31.82
546	0.946	0.224	0.224	0.224	0.224	76.32
588	1.196	0.183	0.182	0.183	0.183	84.70
616	1.278	0.160	0.161	0.160	0.160	87.48
660	0.915	0.136	0.136	0.136	0.136	85.57
662	0.889	0.144	0.145	0.144	0.144	83.80

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเทียบกับระยะเวลาสัมผัสที่ 2.30 ชั่วโมง

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2.30 ชม.				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.416	0.417	0.416	0.416	55.22
546	0.946	0.123	0.123	0.123	0.123	87.00
588	1.196	0.136	0.137	0.136	0.136	88.62
616	1.278	0.148	0.149	0.149	0.149	88.34
660	0.915	0.132	0.131	0.132	0.132	85.57
662	0.889	0.132	0.132	0.132	0.132	85.15

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเทียบกับระยะเวลาสัมผัสที่ 3.00 ชั่วโมง

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3.00 ชม.				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.220	0.221	0.220	0.220	76.20
546	0.946	0.090	0.090	0.090	0.090	90.49
588	1.196	0.072	0.073	0.072	0.072	94.00
616	1.278	0.060	0.061	0.060	0.060	95.31
660	0.915	0.070	0.069	0.070	0.070	92.34
662	0.889	0.069	0.068	0.069	0.069	92.24

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาสัมผัสน้ำที่ 3.30 ชั่วโมง

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3.30 ชม.				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.214	0.214	0.214	0.214	76.70
546	0.946	0.087	0.086	0.087	0.087	90.80
588	1.196	0.068	0.067	0.068	0.067	94.31
616	1.278	0.052	0.053	0.052	0.052	96.00
660	0.915	0.061	0.061	0.061	0.061	93.33
662	0.889	0.057	0.057	0.057	0.057	93.59

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาสัมผัสน้ำที่ 4.00 ชั่วโมง

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 4.00 ชม.				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.263	0.263	0.263	0.263	71.63
546	0.946	0.123	0.123	0.122	0.123	87.00
588	1.196	0.110	0.112	0.110	0.110	90.80
616	1.278	0.103	0.102	0.103	0.103	91.94
660	0.915	0.099	0.098	0.099	0.099	89.18
662	0.889	0.095	0.095	0.095	0.095	89.31

ตารางผนวกที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาสัมผัสน้ำที่ 1 วัน

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 1 วัน				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.250	0.251	0.250	0.250	73.03
546	0.946	0.117	0.116	0.117	0.117	87.63
588	1.196	0.094	0.095	0.094	0.094	87.63
616	1.278	0.090	0.089	0.090	0.090	92.96
660	0.915	0.080	0.081	0.080	0.080	91.26
662	0.889	0.079	0.079	0.079	0.079	91.11

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาสัมผัสน้ำที่ 2 วัน

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วัน				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.217	0.217	0.216	0.217	76.60
546	0.946	0.086	0.087	0.086	0.086	90.90
588	1.196	0.066	0.066	0.067	0.067	94.50
616	1.278	0.051	0.050	0.051	0.051	95.76
660	0.915	0.057	0.056	0.057	0.057	93.77
662	0.889	0.056	0.056	0.056	0.056	93.70

ตารางผนวกที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 3 วัน

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3 วัน				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.326	0.327	0.326	0.326	64.83
546	0.946	0.122	0.122	0.122	0.122	87.10
588	1.196	0.106	0.107	0.106	0.106	91.14
616	1.278	0.103	0.102	0.103	0.103	91.94
660	0.915	0.095	0.095	0.095	0.095	89.62
662	0.889	0.092	0.092	0.092	0.092	89.65

ตารางผนวกที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 5 วัน

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 5 วัน				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.420	0.421	0.420	0.420	54.70
546	0.946	0.126	0.125	0.126	0.126	86.70
588	1.196	0.138	0.137	0.138	0.138	88.46
616	1.278	0.150	0.151	0.150	0.150	88.26
660	0.915	0.138	0.137	0.138	0.138	85.00
662	0.889	0.133	0.132	0.133	0.133	85.04

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของกับอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับจาก ผักตบชวา 1 กรัมต่อดิน 10 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณดิน 10 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.611	0.612	0.611	0.611	34.08
546	0.946	0.343	0.343	0.344	0.343	64.00
588	1.196	0.331	0.331	0.331	0.331	72.24
616	1.278	0.325	0.324	0.325	0.325	74.60
660	0.915	0.284	0.284	0.284	0.284	69.10
662	0.889	0.280	0.281	0.280	0.280	68.50

ตารางผนวกที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของกับอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับจาก ผักตบชวา 1 กรัมต่อดิน 20 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณดิน 20 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.608	0.608	0.608	0.608	34.41
546	0.946	0.348	0.348	0.348	0.348	63.21
588	1.196	0.332	0.331	0.332	0.332	72.24
616	1.278	0.323	0.323	0.323	0.323	75.00
660	0.915	0.283	0.283	0.284	0.283	69.10
662	0.889	0.278	0.278	0.278	0.278	69.00

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของกับอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับจาก
ผักตบชวา 1 กรัมต่อดิน 30 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณดิน 30 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.549	0.549	0.549	0.549	40.77
546	0.946	0.315	0.315	0.315	0.315	66.70
588	1.196	0.302	0.302	0.302	0.302	74.75
616	1.278	0.295	0.295	0.295	0.295	76.90
660	0.915	0.260	0.261	0.260	0.260	71.58
662	0.889	0.254	0.254	0.255	0.254	71.43

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของกับอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับจาก
ผักตบชวา 1 กรัมต่อดิน 40 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณดิน 40 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.553	0.554	0.554	0.554	40.23
546	0.946	0.311	0.311	0.311	0.311	67.12
588	1.196	0.299	0.299	0.289	0.299	75.00
616	1.278	0.292	0.292	0.292	0.292	77.00
660	0.889	0.256	0.256	0.256	0.256	72.00
662	0.915	0.252	0.252	0.252	0.252	71.65

ตารางผนวกที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของกับอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับจาก
ผักตบชวา 1 กรัมต่อดิน 50 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณดิน 50 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.573	0.573	0.573	0.573	40.23
546	0.946	0.334	0.334	0.334	0.334	65.00
588	1.196	0.319	0.318	0.319	0.319	73.33
616	1.278	0.311	0.312	0.311	0.311	76.00
660	0.889	0.267	0.267	0.267	0.267	70.00
662	0.915	0.273	0.271	0.272	0.272	70.27

ตารางผนวกที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของกับอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับจาก
ผักตบชวา 1 กรัมต่อดิน 60 กรัม

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณดิน 60 กรัม				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.581	0.581	0.581	0.581	37.32
546	0.946	0.336	0.335	0.336	0.336	64.48
588	1.196	0.324	0.324	0.324	0.324	71.40
616	1.278	0.315	0.315	0.315	0.315	75.35
660	0.915	0.276	0.275	0.276	0.276	69.84
662	0.889	0.270	0.270	0.271	0.270	69.63

ตารางผนวกที่ 29 ไอโซเทอร์มการดูดซับของผักตบชวา

ปริมาณ ผักตบชวา (กรัม)	Co	C	V	q	1/q	1/C	log q	log C
1	18.63	9.885	0.05	0.437	2.287	0.101	-0.360	0.995
2	18.63	8.630	0.05	0.249	4.000	0.116	-0.602	0.936
3	18.63	8.243	0.05	0.173	5.776	0.121	-0.761	0.916
4	18.63	7.348	0.05	0.141	7.091	0.136	-0.851	0.866
5	18.63	6.600	0.05	0.120	8.313	0.151	-0.919	0.819

ตารางผนวกที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่ข้อมกับระยะเวลาเป็นชั่วโมง ครั้งที่ 1

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ครั้งที่ 1				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.169	0.168	0.169	0.169	81.77
546	0.946	0.072	0.072	0.072	0.072	92.38
588	1.196	0.063	0.063	0.063	0.063	94.73
616	1.278	0.055	0.056	0.055	0.055	95.54
660	0.915	0.046	0.046	0.047	0.046	95
662	0.889	0.048	0.047	0.048	0.048	94.6

ตารางผนวกที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีสัมพันธ์กับระยะเวลาเป็นชั่วโมงครั้งที่ 2

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ครั้งที่ 2				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.198	0.198	0.199	0.198	78.64
546	0.946	0.081	0.081	0.080	0.072	91.54
588	1.196	0.068	0.068	0.069	0.068	94.31
616	1.278	0.050	0.050	0.051	0.050	96
660	0.915	0.050	0.051	0.050	0.050	95
662	0.889	0.053	0.052	0.053	0.053	94.04

ตารางผนวกที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีสัมพันธ์กับระยะเวลาเป็นชั่วโมงครั้งที่ 3

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ครั้งที่ 3				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.246	0.245	0.246	0.246	73.5
546	0.946	0.120	0.120	0.120	0.120	87.32
588	1.196	0.104	0.105	0.104	0.104	91.3
616	1.278	0.097	0.097	0.097	0.097	92.41
660	0.915	0.050	0.051	0.050	0.050	91.00
662	0.889	0.053	0.053	0.052	0.053	90.6

ตารางผนวกที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีขึ้นอยู่กับระยะเวลาเป็นชั่วโมง ครั้งที่ 4

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ครั้งที่ 4				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.253	0.254	0.253	0.253	72.7
546	0.946	0.132	0.132	0.132	0.132	86.00
588	1.196	0.112	0.113	0.112	0.112	90.61
616	1.278	0.107	0.106	0.107	0.107	91.62
660	0.915	0.107	0.107	0.107	0.107	88.31
662	0.889	0.109	0.108	0.109	0.109	87.74

ตารางผนวกที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีขึ้นอยู่กับระยะเวลาเป็นชั่วโมง ครั้งที่ 5

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ครั้งที่ 5				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.365	0.365	0.365	0.365	60.54
546	0.946	0.128	0.127	0.128	0.128	86.5
588	1.196	0.108	0.108	0.109	0.108	91.00
616	1.278	0.089	0.089	0.089	0.089	93.00
660	0.915	0.088	0.087	0.088	0.088	90.40
662	0.889	0.087	0.088	0.087	0.087	90.21

ตารางผนวกที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสียอมกับระยะเวลาเป็นชั่วโมง ครั้งที่ 6

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ครั้งที่ 6				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.384	0.384	0.384	0.384	58.61
546	0.946	0.170	0.171	0.170	0.170	85.41
588	1.196	0.146	0.146	0.147	0.146	90.30
616	1.278	0.140	0.141	0.140	0.140	92.00
660	0.915	0.125	0.125	0.126	0.125	90.00
662	0.889	0.123	0.124	0.123	0.123	89.31

ตารางผนวกที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสียอมกับระยะเวลาเป็นวัน ครั้งที่ 1

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 1				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.073	0.072	0.073	0.073	92.15
546	0.946	0.013	0.013	0.013	0.013	98.63
588	1.196	0.016	0.016	0.016	0.016	98.66
616	1.278	0.018	0.019	0.018	0.018	98.60
660	0.915	0.027	0.027	0.027	0.027	97.05
662	0.889	0.017	0.016	0.017	0.017	98.09

ตารางผนวกที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาเก็บวัน ครั้งที่ 2

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 2				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.094	0.093	0.094	0.094	89.56
546	0.946	0.025	0.024	0.024	0.024	97.35
588	1.196	0.022	0.022	0.022	0.022	98.16
616	1.278	0.023	0.023	0.023	0.023	98.20
660	0.915	0.026	0.026	0.026	0.026	97.16
662	0.889	0.024	0.024	0.023	0.024	97.30

ตารางผนวกที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเชื่อมกับระยะเวลาเป็นวัน ครั้งที่ 3

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 3				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.133	0.132	0.133	0.133	85.65
546	0.946	0.043	0.042	0.043	0.043	95.50
588	1.196	0.041	0.041	0.041	0.041	96.57
616	1.278	0.039	0.039	0.038	0.039	97.00
660	0.915	0.034	0.033	0.034	0.034	96.30
662	0.889	0.035	0.034	0.035	0.035	96.06

ตารางผนวกที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีสัมพันธ์กับระยะเวลาเป็นวัน ครั้งที่ 4

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 4				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.148	0.147	0.148	0.148	84.03
546	0.946	0.127	0.126	0.127	0.127	86.60
588	1.196	0.061	0.062	0.061	0.061	94.90
616	1.278	0.054	0.055	0.053	0.054	95.80
660	0.915	0.041	0.041	0.041	0.041	95.57
662	0.889	0.039	0.038	0.039	0.039	95.61

ตารางผนวกที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีสัมพันธ์กับระยะเวลาเป็นวัน ครั้งที่ 5

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 5				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.141	0.142	0.141	0.141	84.79
546	0.946	0.105	0.104	0.105	0.105	89.00
588	1.196	0.051	0.052	0.051	0.051	95.74
616	1.278	0.046	0.047	0.046	0.046	96.40
660	0.915	0.04	0.04	0.04	0.04	95.63
662	0.889	0.087	0.087	0.087	0.087	90.21

ตารางผนวกที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีกับความยาวคลื่นเป็นวัน ครั้งที่ 6

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 6				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.153	0.153	0.153	0.153	83.50
546	0.946	0.132	0.133	0.132	0.132	86.05
588	1.196	0.076	0.076	0.076	0.076	93.64
616	1.278	0.077	0.076	0.077	0.077	94.00
660	0.915	0.054	0.055	0.054	0.054	94.01
662	0.889	0.059	0.059	0.058	0.059	93.36

ตารางผนวกที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีกับความยาวคลื่นเป็นวัน ครั้งที่ 7

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 7				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.176	0.176	0.175	0.176	81.01
546	0.946	0.145	0.144	0.145	0.145	84.70
588	1.196	0.118	0.117	0.118	0.118	90.13
616	1.278	0.103	0.102	0.103	0.103	92.00
660	0.915	0.087	0.088	0.087	0.087	90.50
662	0.889	0.083	0.083	0.083	0.083	90.30

ตารางผนวกที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาเป็นนาที 15 นาที

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 15 นาที				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.414	0.414	0.413	0.414	55.34
546	0.946	0.417	0.416	0.417	0.417	55.92
588	1.196	0.472	0.472	0.472	0.472	60.54
616	1.278	0.482	0.483	0.482	0.482	62.30
660	0.915	0.362	0.361	0.363	0.362	60.44
662	0.889	0.356	0.357	0.356	0.356	60.00

ตารางผนวกที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาเป็นนาที 30 นาที

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 30 นาที				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.638	0.638	0.638	0.638	31.18
546	0.946	0.668	0.669	0.668	0.668	29.39
588	1.196	0.778	0.779	0.778	0.778	34.95
616	1.278	0.789	0.788	0.789	0.789	38.26
660	0.915	0.592	0.591	0.592	0.592	35.30
662	0.889	0.578	0.578	0.578	0.578	35.00

ตารางผนวกที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีสัมพันธ์กับระยะเวลาเป็นนาที 45 นาที

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 45 นาที				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.670	0.671	0.671	0.671	27.72
546	0.946	0.757	0.757	0.757	0.757	19.97
588	1.196	0.893	0.894	0.893	0.893	25.33
616	1.278	0.931	0.932	0.931	0.931	27.15
660	0.915	0.673	0.673	0.672	0.673	26.45
662	0.889	0.639	0.639	0.639	0.639	28.12

ตารางผนวกที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีสัมพันธ์กับระยะเวลาเป็นนาที 60 นาที

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 60 นาที				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.695	0.694	0.695	0.695	25.30
546	0.946	0.764	0.765	0.764	0.764	19.24
588	1.196	0.902	0.902	0.902	0.902	24.60
616	1.278	0.939	0.939	0.939	0.939	26.53
660	0.915	0.685	0.686	0.685	0.685	25.14
662	0.889	0.654	0.654	0.654	0.654	26.53

ตารางผนวกที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาเป็นนาที 75 นาที

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 75 นาที				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.703	0.703	0.702	0.703	24.2
546	0.946	0.772	0.773	0.772	0.772	18.40
588	1.196	0.924	0.925	0.924	0.924	22.74
616	1.278	0.971	0.970	0.971	0.971	24.00
660	0.915	0.697	0.698	0.697	0.697	23.83
662	0.889	0.680	0.679	0.680	0.680	23.51

ตารางผนวกที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมกับระยะเวลาเป็นนาที 90 นาที

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 90 นาที				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.724	0.723	0.724	0.724	21.90
546	0.946	0.792	0.792	0.793	0.792	16.28
588	1.196	0.931	0.932	0.931	0.931	22.16
616	1.278	0.992	0.993	0.992	0.992	22.38
660	0.915	0.714	0.713	0.714	0.714	21.96
662	0.889	0.682	0.682	0.682	0.682	20.70

ตารางผนวกที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก ครั้งที่ 1

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 1				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.290	0.290	0.291	0.290	68.72
546	0.946	0.104	0.103	0.104	0.104	89.00
588	1.196	0.106	0.106	0.106	0.106	91.14
616	1.278	0.097	0.097	0.098	0.097	92.41
660	0.915	0.163	0.162	0.163	0.163	82.20
662	0.889	0.116	0.115	0.116	0.116	86.95

ตารางผนวกที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก ครั้งที่ 2

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 2				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.343	0.343	0.343	0.343	63.32
546	0.946	0.222	0.221	0.222	0.222	76.53
588	1.196	0.193	0.194	0.193	0.193	83.86
616	1.278	0.184	0.183	0.184	0.184	85.60
660	0.915	0.186	0.186	0.186	0.186	79.70
662	0.889	0.167	0.167	0.167	0.167	81.21

ตารางผนวกที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก ครั้งที่ 3

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 3				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.663	0.663	0.662	0.663	28.40
546	0.946	0.355	0.355	0.354	0.355	62.47
588	1.196	0.318	0.317	0.318	0.318	73.41
616	1.278	0.283	0.282	0.283	0.283	77.86
660	0.915	0.314	0.315	0.314	0.314	65.68
662	0.889	0.259	0.258	0.259	0.259	70.87

ตารางผนวกที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก ครั้งที่ 4

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 4				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.803	0.802	0.803	0.803	13.38
546	0.946	0.453	0.453	0.452	0.453	52.11
588	1.196	0.375	0.374	0.375	0.375	68.65
616	1.278	0.336	0.337	0.336	0.336	73.71
660	0.915	0.292	0.292	0.292	0.292	68.10
662	0.889	0.284	0.284	0.284	0.284	68.05

ตารางผนวกที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก ครั้งที่ 5

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 5				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.898	0.898	0.898	0.898	3.13
546	0.946	0.742	0.741	0.742	0.742	21.56
588	1.196	0.665	0.664	0.665	0.665	44.4
616	1.278	0.588	0.589	0.588	0.588	54.00
660	0.915	0.529	0.592	0.593	0.592	42.20
662	0.889	0.634	0.634	0.634	0.634	17.58

ตารางผนวกที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก ครั้งที่ 1

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 1				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.290	0.291	0.290	0.290	68.72
546	0.946	0.143	0.142	0.143	0.143	84.90
588	1.196	0.119	0.119	0.118	0.119	90.10
616	1.278	0.123	0.123	0.124	0.123	90.38
660	0.915	0.133	0.132	0.132	0.133	85.46
662	0.889	0.128	0.129	0.128	0.128	85.60

ตารางผนวกที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกจุลินทรีย์ ครั้งที่ 2

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 2				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.432	0.433	0.432	0.432	53.40
546	0.946	0.240	0.241	0.239	0.240	74.63
588	1.196	0.206	0.205	0.206	0.206	87.78
616	1.278	0.209	0.210	0.209	0.209	83.65
660	0.915	0.186	0.187	0.186	0.187	79.56
662	0.889	0.183	0.184	0.183	0.183	79.42

ตารางผนวกที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกจุลินทรีย์ ครั้งที่ 3

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 3				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.686	0.687	0.686	0.686	26.00
546	0.946	0.406	0.407	0.406	0.406	57.10
588	1.196	0.333	0.332	0.333	0.333	72.16
616	1.278	0.309	0.310	0.309	0.309	75.82
660	0.915	0.299	0.300	0.299	0.299	68.31
662	0.889	0.306	0.307	0.306	0.306	65.58

ตารางผนวกที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกจุลินทรีย์ ครั้งที่ 4

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 4				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.867	0.867	0.868	0.867	6.50
546	0.946	0.484	0.485	0.484	0.484	48.84
588	1.196	0.373	0.374	0.373	0.373	68.81
616	1.278	0.386	0.387	0.386	0.386	70.00
660	0.889	0.288	0.289	0.288	0.288	67.54
662	0.915	0.368	0.367	0.368	0.368	58.61

ตารางผนวกที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์กับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกจุลินทรีย์ ครั้งที่ 5

λ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา 2 วันครั้งที่ 1				ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
400	0.927	0.898	0.898	0.899	0.898	3.13
546	0.946	0.742	0.743	0.742	0.742	21.56
588	1.196	0.956	0.665	0.664	0.665	44.40
616	1.278	0.893	0.588	0.589	0.588	54.00
660	0.889	0.529	0.529	0.529	0.529	42.20
662	0.915	0.634	0.634	0.634	0.634	17.58

ตารางผนวกที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของการใช้ดิน
 อย่างเดียวกับแบบการไหลต่อเนื่องตามวันที่เหมาะสมร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก

ระยะเวลาที่เหมาะสมเป็นวัน(ครั้ง)	ร้อยละของการบำบัดเฉลี่ย
1	75.00
2	60.22
3	42.64
4	29.30
5	14.53

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวพิมพ์มณี ฐีประเสริฐ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	29 ธันวาคม 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดนครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสงขลา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-