



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าคอตงโดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยถักไนต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหญ้ากรองน้ำเสีย

The Effective Treatment of Dyes in Doi Tung Textile Wastewater by Utilizing a Mixture of Lignite Fly Ash Adsorbent and Soil for Growing Material in Grass Filtration Treatment System

นามผู้วิจัย นางสาวเสาวภาคย์ ผลเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... รองศาสตราจารย์กณิดา ตั้งคณาภิรักษ์, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(..... รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าดอยตุงโดยใช้ตัวดูดซับ
ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหญ้ากรองน้ำเสีย

The Effective Treatment of Dyes in Doi Tung Textile Wastewater by Utilizing a Mixture of
Lignite Fly Ash Adsorbent and Soil for Growing Material in Grass Filtration Treatment System

โดย

นางสาวเสาวภาคย์ ผลเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เสาวภาคย์ ผลเจริญ 2556: ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าดอยดุง โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยติกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหมุนำกรอง น้ำเสีย ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. 84 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีย้อมด้วยถ้ำลอยติกไนต์ เพื่อนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมให้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบหมุนำกรอง จากการทดลองแบบแบตช์ พบว่าร้อยละการบำบัดสีย้อมโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้าจากโรงงานย้อมผ้าดอยดุง 9 ชนิด (Yellow LS-RN, Yellow LS-4G, Orange LSB, Red LS-BN, Blue LS-3R, Black G, Navy LS-G, Turquoise H-GH และ Br.Blue G) จากน้ำเสียดังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสีย้อมแต่ละชนิด 10 มิลลิกรัม/ลิตร, ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยถ้ำลอยติกไนต์ 2 กรัม, พีเอช 7 และเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง เท่ากับ 99.41% และ 45.84% สำหรับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าดอยดุง ไอโซเทอร์มการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกระบวนการดูดซับแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ได้ทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยติกไนต์ต่อดินเท่ากับ 1: 15 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเฉลี่ยร้อยละ 99.54 และไม่มีการคายซับภายหลังเวลาผ่านไป 5 วัน นอกจากนี้ทำการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยใช้ น้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองในกระบะพลาสติกขนาด 51×51×54 ซม. ที่บรรจุชั้นกรวด 7 ซม. ทราบหยาบ 3 ซม. ทราบละเอียด 2 ซม. และชั้นถ้ำลอยติกไนต์ผสมดินในอัตราส่วน 1:15 ปลูกธูปฤาษี และหญ้าแฝก พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 99.41 และ 99.08 ตามลำดับ ดังนั้น ส่วนผสมของถ้ำลอยติกไนต์และดินมีศักยภาพสูงพอในการใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบหมุนำกรองน้ำเสีย

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Saowapak Pholjaroen 2013: The Effective Treatment of Dyes in Doi Tung Textile Wastewater by Utilizing a Mixture of Lignite Fly Ash Adsorbent and Soil for Growing Material in Grass Filtration Treatment System. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 84 pages.

This research was to study the adsorption optimum condition for removal of dyes by using lignite fly ash in order to increasing the efficiency of grass filtration and wetland treatment system. From the batch experiment, the results demonstrated the average highest removal percentage of nine dyes from of Doi Tung textile factory (Yellow LS-RN, Yellow LS-4G, Orange LSB, Red LS-BN, Blue LS-3R, Black G, Navy LS-G, Turquoise H-GH and Br.Blue G) from the synthetic wastewater contained with each of a dyes at 10 mgL^{-1} , 50 ml. by 2 gram of lignite fly ash at pH 7 and contact time 4 hrs. was 99.41% and 45.84% for Doi Tung textile factory wastewater. The adsorption isotherm could explain by both Langmuir and Freundlich isotherms. Furthermore, the continuous flow experiment was studied and found that the suitable ratio by weigh of lignite fly ash to soil was 1:15 for obtaining the average removal of dyes at 99.54% and no desorption after 5 days. In addition, the filtrated lysimeter techniques experiment with 20 L of 10 ppm of the synthetic wastewater and growing *Typha Angustifolia L.* and *Vetiveria zizanioides* was carried out in square plastic tank size 51×51×54 cm. that packed with gravel 7 cm., coarse sand 3 cm., fine sand 2 cm. and mixed lignite fly ash with soil 1:15 and found that 99.41% and 98.08% respectively of dyes were removed. Therefore, the mixture of lignite fly ash and soil has a high potential for utilizing as growing material in the grass filtration treatment system.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

___ / ___ / ___

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คณิดา ตั้งคณาภิรักษ์ กรรมการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ห้องปฏิบัติการเคมี ในการทำศึกษาวิจัยทดลอง

ขอขอบพระคุณบริษัท น้ำมันพืชปทุมธานี จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านเมล็ดที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ และโครงการพัฒนาคอตจุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างสีย้อมผ้าสังเคราะห์ และน้ำเสียด่างโรงงานย้อมผ้าคอตจุง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่ให้ความร่วมมือในการวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวผลเจริญ ที่คอยเป็นกำลังใจในการศึกษาเล่าเรียน และสนับสนุนผู้วิจัยตลอดในทุกเรื่อง ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เสาวภาคย์ ผลเจริญ

มกราคม 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	39
อุปกรณ์	39
วิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	71
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	84

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี	12
2	วิธีกำจัดสีในน้ำทิ้งสำหรับสีย้อมประเภทต่างๆ	13
3	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยลิกไนต์	35
4	สีย้อม (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง 9 ชนิด	40
5	สมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) กราฟมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด	49
6	อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์ต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากถ้ำลอยลิกไนต์	53
7	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ	58
8	ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ	59
9	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมน้ำเสียสังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าद्यตุง	60
10	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง หลังการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน เพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก	61
ตารางผนวกที่		
1	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมของถ้ำลอยลิกไนต์	72
2	อิทธิพลของปริมาณเริ่มต้นต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วย	72
3	อิทธิพลพีเอชกับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	72
4	อิทธิพลระยะเวลาชั่วโมงกับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	73
5	อิทธิพลระยะเวลาวันกับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	73
6	อิทธิพลปริมาณดินกับร้อยละการดูดซับสีย้อม	74
7	อิทธิพลอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน	74
8	อิทธิพลระยะเวลาชั่วโมง ที่เหมาะสมอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
9	อิทธิพลระยะเวลาวัน ที่เหมาะสมอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน	75
10	ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในการดูดซับของตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน	75
11	อิทธิพลการใช้งานซ้ำในการดูดซับของตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน	76
12	อิทธิพลการใช้ซ้ำในการดูดซับสีข้อม โดยบรรจุคอลัมน์ด้วยตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์และดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก เก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ทุก 3 ชั่วโมง	77

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย โม่เลกุลของตัวถูกดูดซับ ไปยังตัวดูดซับ	16
2	แรงดึงดูดระหว่างโม่เลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	17
3	แรงดึงดูดระหว่างโม่เลกุลมีขั้วกับโม่เลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราวแรง	18
4	ดึงดูดระหว่างโม่เลกุลมีขั้ว	18
5	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	20
6	การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	20
7	การเคลื่อนย้ายโม่เลกุลตัวถูกดูดซับ ไปยังตัวดูดซับ	23
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	25
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	26
10	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	28
11	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	29
12	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	29
13	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	30
14	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	31
15	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	32
16	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	33
17	ประสิทธิภาพการดูดซับสี่ข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์จากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน โดยการชั่งแช่ 3 ชั่วโมงโดยวิธีการไหลต่อเนื่อง	45
18	ประสิทธิภาพการดูดซับสี่ข้อมโดยถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินในน้ำทิ้งจากโรงงาน ย้อมผ้า โดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง	46
19	กระบะปลูกและชั้นของกรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน	47
20	ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์	48
21	ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เริ่มต้นกับร้อยละการดูดซับสี่ข้อม	50
22	พีเอชกับร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	51
23	ระยะเวลาชั่วโมงกับร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	51
24	ระยะเวลาวันกับร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	52

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของถ้ำลอยลิกไนต์กับปริมาณตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์	52
26	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีของแลงเมียร์ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	53
27	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีของฟรุนดิชด้วยถ้ำลอยลิกไนต์	54
28	การดูดซับสีของดินกับปริมาณดิน	54
29	อัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์: ดิน กับร้อยละการดูดซับสี	55
30	ระยะเวลาชั่วโมงกับร้อยละการดูดซับสีด้วยอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์: ดิน (อัตราส่วน 1: 15)	56
31	ระยะเวลาวันกับร้อยละการดูดซับสีด้วยอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์: ดิน (อัตราส่วน 1: 15)	56
32	จำนวนครั้งการใช้งานซ้ำกับร้อยละที่ใช้ในการดูดซับสีของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน	57
33	จำนวนครั้งการใช้งานซ้ำกับร้อยละที่ใช้ในการดูดซับสีของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน	58
34	เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก โดยทำการทดลองแบบแบตช์	60
35	ประสิทธิภาพการดูดซับสีในสารละลายสีผสมจากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินในน้ำเสียดังเคราะห์ โดยวิธีการไหลต่อเนื่อง	62
36	ประสิทธิภาพการดูดซับสีจากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน ในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โดยวิธีการไหลต่อเนื่อง	63
37	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กบำบัดสีผสมในกระเบปปลูกธูปฤาษี โดยใช้ชุดควบคุมและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก	64
38	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กบำบัดสีผสมในกระเบปปลูกหญ้าแฝก โดยใช้ชุดควบคุมและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร	79
2	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร	79
3	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร	80
4	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร	80
5	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร	81
6	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร	81
7	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร	82
8	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 662 นาโนเมตร	82
9	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร	83

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD (บีโอดี)	=	Biochemical Oxygen Demand (ความต้องการออกซิเจนของน้ำทิ้งโดยวิธีทางชีวภาพ)
COD (ซีโอดี)	=	Chemical Oxygen Demand (ความต้องการออกซิเจนของน้ำทิ้งโดยวิธีทางเคมี)
pH (พีเอช)	=	ค่าความเป็นกรด-เบส
TDS	=	Total Dissolved Solids (ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ)
TS	=	Total Solids (ของแข็งทั้งหมด)
TSS	=	Total Suspended Solids (ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด)

ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าดอยตุงโดยใช้ตัวดูดซับ
ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหลุมกรองน้ำเสีย

The Effective Treatment of Dyes in Doi Tung Textile Wastewater by Utilizing a
Mixture of Lignite Fly Ash Adsorbent and Soil for Growing Material in Grass
Filtration Treatment System

คำนำ

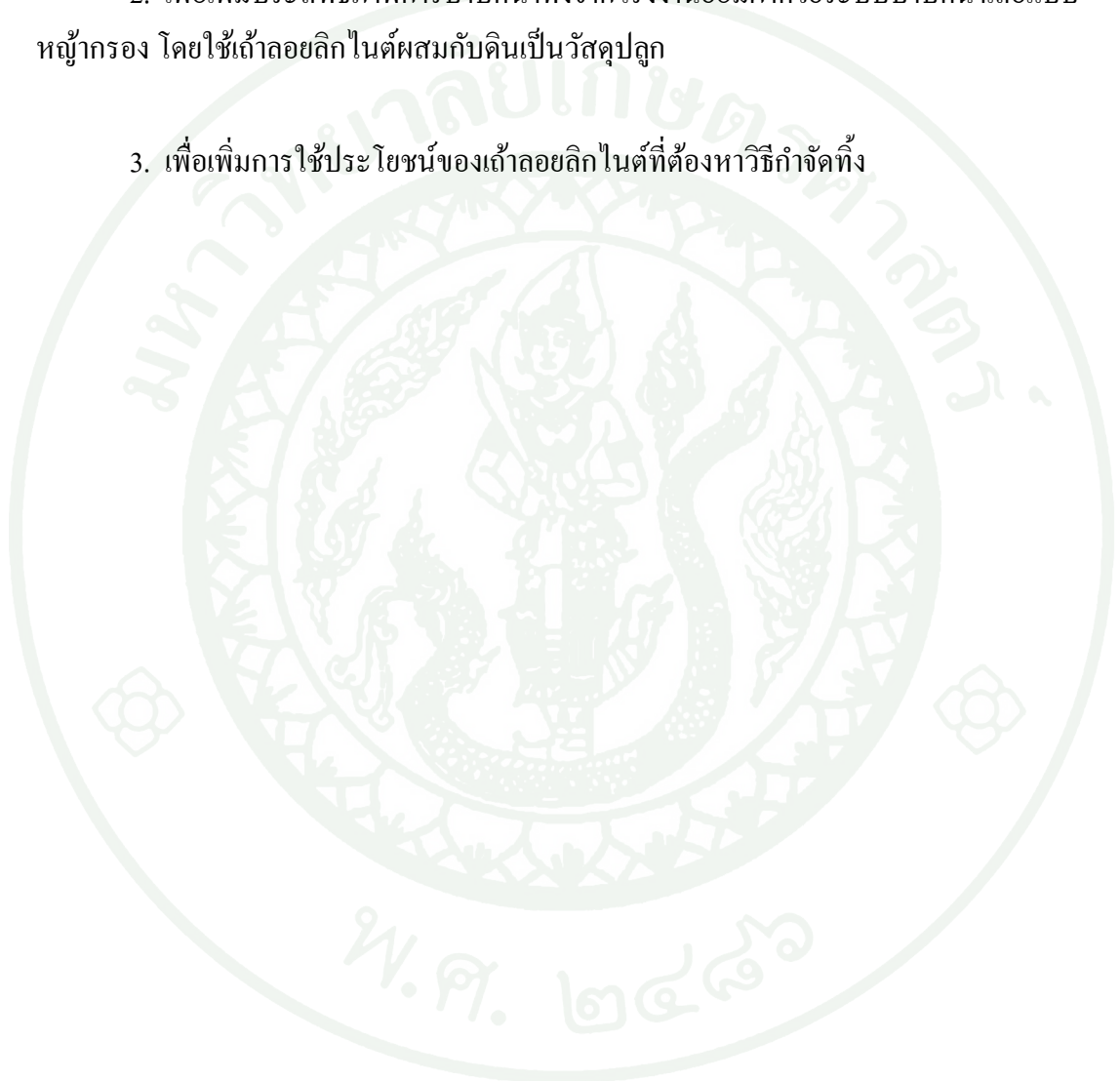
น้ำทิ้งจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิดก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำที่รุนแรง โดยเฉพาะโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ก่อให้เกิดน้ำทิ้งปริมาณมากและบำบัดได้ยาก เนื่องจากเป็นน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของสีย้อมสูง รวมทั้งมีสารอินทรีย์อื่นๆ และสารอนินทรีย์เจือปนอยู่ปริมาณมาก หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยไม่มีการบำบัด โดยเฉพาะสีย้อมที่มีปริมาณมาก สีย้อมเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่และจุลินทรีย์ย่อยสลายโดยธรรมชาติได้ยากและใช้เวลานาน จะมีผลต่อการผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่ใต้ผิวน้ำ ซึ่งขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นการทำลายทัศนียภาพ ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย

โครงการพัฒนาดอยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ เป็นพื้นที่ที่มีการประกอบกิจการโรงงานย้อมผ้าที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมและเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สามารถสร้างรายได้จำนวนมากแก่ชุมชนในพื้นที่ โดยทั่วไปสีย้อมที่ใช้มักมีความคงตัวต่อการย่อยสลายทางชีวภาพและมีความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้ยากแก่การบำบัดด้วยวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี ซึ่งวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีนี้นิยมใช้ในการบำบัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนสีที่มีความสามารถในการละลายน้ำยังคงปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว

การศึกษานี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของถ้ำลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมมาเป็นวัสดุดูดซับ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของถ้ำลอยลิกไนต์กับน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมผ้า จากนั้นนำไปหาอัตราส่วนระหว่างถ้ำลอยลิกไนต์กับดินและระยะเวลาการบำบัด ที่สามารถบำบัดสีย้อมมากที่สุด เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบหลุมกรองน้ำเสียของโครงการศึกษานี้และพัฒนาสิ่งแวดล้อมหมักเบียร์ อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยเถ้าลอยลิกไนต์
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบ
ห่อกรอง โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูก
3. เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยลิกไนต์ที่ต้องหาวิธีกำจัดทิ้ง



การตรวจเอกสาร

1. ที่มาและปัญหาของน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า

1.1 แหล่งที่มาของน้ำทิ้ง

สภาพการเกิดและการระบายน้ำทิ้งเริ่มจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ระบายน้ำทิ้งลงในรางระบายน้ำภายในโรงงาน ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกันคือ

1.1.1 ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำทิ้งภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูงและน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำทิ้งในประเภทแรก

1.1.2 น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม มักอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ และเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลง และกลั่นตัวในท่อไอน้ำ ก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนกับสารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเพิ่มปริมาณของสารละลายสีย้อมและจะรวมเป็นน้ำทิ้งที่สกปรกที่สุด

1.1.3 น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นในกระบวนการฟอกย้อม บางขั้นตอนทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นน้ำสะอาดและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่

1.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน น้ำในส่วนนี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ และในบางกรณีเป็นน้ำทิ้งที่มีความสกปรกสูงมาก เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

1.1.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ นอกจากน้ำที่จากแหล่งต่างๆ ข้างต้น โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ อาจมีน้ำที่จากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำใช้ของคองงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

1.2 ลักษณะสิ่งสกปรกในน้ำเสีย

ลักษณะสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ สามารถจำแนกได้ดังนี้

1.2.1 ปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำทิ้งนี้มักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าซีโอดี ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัม/ลิตร

1.2.2 ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัม/ลิตร สารที่ทำให้น้ำทิ้งฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (scouring)

1.2.3 อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอน ที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

1.2.4 ปริมาณของแข็ง (total solids) สูง ส่วนใหญ่เป็นสารละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

1.2.5 ความเข้มข้นสูง เนื่องจากการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

1.2.6 โลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดงตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

1.2.7 ปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solids) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำทิ้งในเครื่องข้อมได้

1.2.8 การปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่เหลืออยู่ในสารละลายสีข้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำทิ้ง

2. สีข้อม

สีข้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีนโทลูอินแนพทาลีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีข้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ สีข้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ คูดติดเส้นใยได้ สีข้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การนำสีข้อมมาใช้ให้ได้ผลดี ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสภาวะที่โมเลกุลของสีข้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการคูดติด (substantivity) กับเส้นใย แล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น

อิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีคูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals' force) แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) การคูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีข้อมกับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสาน และแรงที่ยึดติดทางเคมีที่ดีที่สุดคือ พันธะโควาเลนต์

2.1 การจำแนกสีข้อม

สีข้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีหลายชนิดตามชนิดของเส้นใยหรือประเภทของผ้าที่จะย้อม สีข้อมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพแบ่งเป็น 2 ชนิด (อัจฉราพร, 2527) คือ สารสีละลายน้ำได้เรียกว่า สีข้อม (dyes) และสารสีไม่ละลายน้ำเรียกว่า พิกเมนต์ (pigment) สีข้อมหากจำแนกตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีมีความซับซ้อนอย่างมากและยากต่อการจดจำ ดังตารางที่ 1 จึงไม่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ ทั้งนี้วิธีการจำแนกสีข้อมตามลักษณะการใช้งานจะง่ายและสะดวกต่อผู้ปฏิบัติงาน ดังตารางที่ 2 ทางสมาคมผู้ย้อมและผู้ผลิตสีข้อมยอมรับและเห็นด้วยของการจำแนกสีข้อมตามการใช้งาน ซึ่งนำมาจำแนกสีข้อมโดยทั่วไป ดังนี้

2.1.1 สีไดเร็กต์ (direct dyes) เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรก ที่ย้อมติดใยฝ้ายได้โดยตรงไม่ต้องใช้สารช่วยย้อมใดๆ บางครั้งจึงเรียกว่าสีย้อมฝ้าย แต่ในปัจจุบันการย้อมสีไดเร็กต์จะใช้เกลือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซ (azo) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิก มีประจุลบ ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้มีโทนสี คุณสมบัติในการย้อม ความคงทน ตลอดจนราคาที่แตกต่างกันมาก ซึ่งถ้าเป็นที่มีความคงทนในการย้อมสีดี โครงสร้างก็จะซับซ้อนมากขึ้น โดยจะใช้ย้อมใยเซลลูโลสซึ่งไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

2.1.2 สีรีแอคทีฟ (reactive dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้สามารถย้อมติดใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีคุณสมบัติเป็นแอมไออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นเบสโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติการละลายและดูดซับเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าไปอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดกับเส้นใย

2.1.3 สีเบสิค (basic dyes) เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (chromophore) ให้แคทไอออน (cation) บางครั้งจึงเรียกสีชนิดนี้ว่า สีแคทไอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย สีกลุ่มนี้มีความสดใสของสี แต่ไม่ทนแสงจึงนิยมใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด

2.1.4 สีแอซิด (acid dyes) เป็นสีที่เกิดสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวไอออนที่มีประจุลบ บางครั้งจึงเรียกว่าสีแอนไอออน สีในกลุ่มนี้ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพที่เป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และโพลีสเตออร์ ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบ

2.1.5 สีมอร์แดนต์หรือโครม (merdant or chrome dyes) มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเหมือนกับสีเอซิด จะมีเพียงกลุ่มสารเคมีที่สามารถเชื่อมโยงกับโครเมียมเป็นสารประกอบ Co-ordinate หรือสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะที่มีความถาวรเพิ่มขึ้น และจะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า ทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำเพิ่มขึ้นด้วย การย้อมติดสีมอร์แดนต์ต้องให้ตัวสีทำปฏิกิริยากับโครเมียมก่อนเพื่อให้คงทนต่อสภาพความเป็นด่าง สีนี้ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน

2.1.6 สีแเว็ด (vat dyes) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลายจึงติดใยเซลลูโลส สีกลุ่มนี้เกิดจากสารประกอบอินดิโกและสีแอนทราควิโนน (aminoanthraquinone) สีแเว็ดมีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกันมากสารประกอบเชิงซ้อนของสีทุกตัวต้องมีหมู่คาร์บอนิลอย่างน้อยหนึ่งหมู่รวมกันเสมอ เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำจึงต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมทำให้สามารถละลายน้ำได้ ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ เป็นสารรีดิวซ์ชนิดเดียวกับสีซัลเฟอร์ เมื่อรีดิวซ์แล้วจะให้สารประกอบลิวโค (leuco compound) มีสีเป็นสีขาวและมีประสิทธิภาพที่ในการแทรกซึม เมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสกับอากาศสารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดส์กลับไปเป็นสภาพที่ไม่ละลายน้ำทำให้ติดคงทนถาวรกับเส้นใย นอกจากนี้สีแเว็ดยังสามารถใช้ย้อมใยโปรตีนได้ ใยสังเคราะห์บางชนิดสามารถย้อมติดดีเช่น ใยครีแลนคอตและโพลีเอสเตอร์ผสมฝ้ายสีอ่อนๆ

2.1.7 สีกำมะถัน (sulphur dyes) เป็นสีที่เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรอื่นๆ ซึ่งเป็น Cyclic Hydrocarbon เช่น เบนซีนหรือ แนพทาลิน สีชนิดนี้จะติดใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายอยู่ในน้ำซึ่งมีสภาพเป็นด่างและมีสารรีดิวซ์ โดยสารที่จะนำมารีดิวซ์ที่นิยมใช้เป็นสารละลายโซเดียมซัลไฟด์และโครโมฟอร์มของสีย้อมประกอบด้วยกลุ่มธาตุซัลเฟอร์ (sulfonic group) เมื่อสีย้อมละลายในน้ำแล้ว จะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใย และสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดส์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ

2.1.8 สีดิสเพอร์ส (disperse dyes) สีนี้ผลิตขึ้นด้วยวัตถุดิบประสงค์เพื่อใช้ย้อมใยอะซิเตด ซึ่งเป็นใยที่ดูดน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำเมื่อมีสารกระจายตัว (dispersing agent) ที่เหมาะสมจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วย นอกจากสารพา (carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้อีกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาส่วนประกอบทางเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีอะโซ (azo dyes) และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน (aminoanthraquinone) ซึ่งสีทั้ง 2 กลุ่มนี้ปกติจะประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (ethanolamine) - $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกันที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ สีชนิดนี้ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตดหรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย

2.1.9 สีอะโซอิก (azoic dyes) สีในกลุ่มนี้เป็นสารประกอบอะโซ (azo) แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับ

สารประกอบพีนอลเกิดเป็นสารประกอบอะโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกริยานี้เรียกว่าคัปลิง (coupling) สีกกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสเท่านั้น

2.1.10 สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (metal complex dyes) เป็นสีเคิมของสีเมอร์แดนท์ เมื่อนำมา ให้ปฏิกิริยากับเกลือของโลหะจะได้สารประกอบที่ให้สีชนิดใหม่ โดยทั่วไปจะนิยมใช้เกลือของโครเมียม มาทำปฏิกิริยา สีชนิดนี้สามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของน้ำย้อม ได้แก่ สีเมทัลคอมเพล็กซ์ ในน้ำย้อมที่เป็นกรดและสีเมทัลคอมเพล็กซ์ในน้ำย้อมที่เป็นกลาง น้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายต้องค่อนข้าง บริสุทธิ์ ไม่มีเกลือแร่ปนอยู่

3. หลักการย้อมผ้า

กระบวนการย้อมผ้าโดยทั่วไปมักจะนำสีย้อมมาทำให้อยู่ในรูปของสารละลายหรือสารคิสเพิร์ส ซัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำมาย้อมเส้นใยที่ต้องการ ตามด้วยกระบวนการทำให้สี ย้อมติดแน่นกับเส้นใยเพื่อให้ความคงทนต่อการซักด้วยน้ำยาต่างๆ การย้อมสีโดยทั่วไปสามารถทำได้ โดยวิธีการ ดังต่อไปนี้

วิธีการที่ 1 การทำให้เกิดการแพร่กระจายหรือซึมผ่านพื้นผิวของเส้นใย

วิธีการที่ 2 การดูดซึมสีย้อมของเส้นใย

วิธีการที่ 3 การซึมผ่านของโมเลกุลสีย้อมผ่านชั้นกั้นทางจลศาสตร์เข้าสู่ภายในเส้นใย

วิธีการที่ 4 การดูดซับ

วิธีการที่ 5 การถ่ายสีด้วยแรงทางเชิงกลโดยการอัด

วิธีการที่ 6 การกักเก็บเชิงกล

วิธีการที่ 7 การสร้างพันธะทางเคมีกับอนุภาคของเส้นใย

วิธีการที่ 8 การละลายในเส้นใย เช่น การละลายของสีย้อมชนิดคิสเพิร์สที่เป็นของแข็งในเส้นใยโพลีเอสเตอร์

วิธีการที่ 9 ปฏิกริยาเคมีบนเส้นใยโดยปกติแล้ว ขั้นตอนที่สีย้อมซึมผ่านเส้นใยจะเป็นขั้นตอนที่ช้าและมีผลต่ออัตราการย้อมสีมากที่สุด

3.1 ตัวแปรที่สำคัญในการย้อมสี

3.1.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม โดยทั่วไปสีย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมเส้นใยประเภทโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ฝ้าย และเรยอน ส่วนใหญ่จะไม่สามารถย้อมเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นมาได้ สีย้อมประเภทคิสเพิร์ส ก็เหมาะสมสำหรับเส้นใยประเภทซิติล หรือโพลีเอสเตอร์ และเช่นเดียวกันไม่เหมาะที่จะนำมาย้อมฝ้ายหรือขนสัตว์

3.1.2 สารช่วยย้อม สารช่วยย้อมถือเป็นสิ่งจำเป็นในการกระบวนการย้อม เนื่องจากเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกริยาให้สีย้อมเข้าไปภายในเส้นใยได้เร็วขึ้นและทำให้สีติดทนทานสม่ำเสมอ สารช่วยย้อมที่สำคัญและใช้มากมีอยู่ 7 ชนิด ดังนี้

(1) กรด ใช้สำหรับย้อมใยโปรตีนและไนลอนด้วยสีย้อมชนิดที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสี ทำให้ประจุไฟฟ้าลบในเส้นใยน้อยลงและเพิ่มประจุไฟฟ้าบวก แอนไอออนจึงสามารถเข้าไปติดภายในเส้นใยยึดตัวสีที่ดูดซึมได้น้อยลงต้องเพิ่มกรดให้มากขึ้น ทำให้ตัวสีซึมกระจายตัวจากส่วนที่ติดสีมากไปยังส่วนที่ติดน้อยทำให้ย้อมได้สีสม่ำเสมอ สีประเภทนี้ต้องการกรดแก่เพื่อสามารถซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้มากขึ้น

(2) ค่าจ ใช้สำหรับช่วยย้อมใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมชนิดไอออนิก แร่ท กัมมะถัน และรีแอคทีฟ สีย้อมและสีกัมมะถันต้องย้อมในน้ำย้อมที่เป็นค่าจแก่และมีสารรีดิวซ์รวมอยู่ด้วย สีย้อมชนิดไอออนิกละลายในค่าจแก่ (โซดาไฟ) ส่วนสีย้อมรีแอคทีฟต้องใช้ค่าจอ่อน (โซเดียมคาร์บอเนต) ทำหน้าที่ให้โมเลกุลของสีทำปฏิกริยายึดติดกับโมเลกุลของใยเซลลูโลสได้ดียิ่ง

(3) เกลือ ใช้สำหรับช่วยย้อมใยขนสัตว์ด้วยสีย้อมชนิดไอออนิกหรือสีย้อม

(4) สารที่ทำให้สีสม่ำเสมอ เป็นสารที่ช่วยลดคุณสมบัติการดูดติดเส้นใยของสีให้ช้าลง ทำให้สีติดเส้นใยสม่ำเสมอสารประกอบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ เรียกว่า surface levelling agent ปฏิกริยาของสารนี้แบ่งออกเป็น 2 ชั้น สารประเภทนี้เป็นสารที่ดูดติดเส้นใยได้ง่าย ในขั้นต้นจึงแข่งขันซึมเข้าไปภายในเส้นใย ดังจะเห็นได้จากการย้อมขนขนสัตว์หรือ ไนลอนที่สีดูดติดเส้นใยได้เร็วมาก ขณะเดียวกันสารเคมีนี้จะไปเพิ่มพลังงานให้แก่สีย้อมเพื่อรักษาสภาพเดิมของตัวสีไว้ไม่ทำปฏิกริยากับน้ำรวมตัวกันเป็นสารประกอบสมบูรณชนิดใหม่ จึงทำให้สีรวมตัวกับเส้นใยได้ช้าลง

(5) สารพา (carriers) เป็นสารที่มีคุณสมบัติทำให้สามารถย้อมสีเข้มได้ แม้ใช้กระบวนการย้อมปกติโดยมากใช้เป็นสารช่วยในการย้อมใยโพลีเอสเตอร์ทำหน้าที่โดยดูดติดอยู่ที่ผิวเส้นใยก่อน เมื่อสีเข้าไปติดตัวสีจะละลาย เส้นใยจะดูดติดสีไว้ได้มากขึ้น ระดับการติดสีก็จะเพิ่มขึ้น

(6) สารละลายอินทรีย์ ใช้เป็นสารช่วยย้อมสำหรับย้อมขนสัตว์และไนลอนในกรณีที่ย้อมละลายน้ำได้น้อย จะทำให้การย้อมได้ผลดีขึ้น รวดเร็วขึ้น และเส้นใยจะมีลักษณะดีกว่าการย้อมตามปกติ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารละลายอินทรีย์สามารถก่อเป็นเยื่อบางๆภายในเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ซึมผ่านเข้าไปติดเส้นใยได้เร็วขึ้น

3.1.3 อุณหภูมิในการย้อมสี ในแต่ละระบบการย้อมสีก็จะมีลักษณะที่แตกต่างเฉพาะแบบกันออกไป การย้อมที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้การย้อมสีติดมากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้สีย้อมกระจายหรือซึมผ่านได้ดีขึ้น

3.1.4 น้ำย้อม/พื้นผิวสัมผัส ลักษณะอัตราการหมุนเวียนของของเหลว เช่น ในเครื่อง Jet เครื่อง Beam หรือ Package จะทำหน้าที่ควบคุมความสม่ำเสมอของสีย้อมให้คงที่

3.1.5 วิธีการต่างๆ และเทคนิคในการย้อมสี วิธีการและเทคนิคบางอย่างที่ทำให้สีย้อมติดแน่นบนเส้นใยอย่างถาวร แต่ละวิธีจะมีลักษณะเฉพาะของตัว เช่น mordanting, vatting และ after-treatments เป็นต้น

3.1.6 อัตราส่วนของเหลว อัตราส่วนของเหลวที่ใช้ในขณะที่ย้อมสี มีผลกระทบอย่างมากต่อการใช้สีทุกชนิด อัตราส่วนของเหลวถูกกำหนดโดยชนิดของเครื่องที่ใช้ การใช้อัตราส่วนของเหลวในอัตราที่ต่ำจะทำให้ปริมาณการใช้สีรีแอกทีฟเป็นไปอย่างประหยัด ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากปฏิกริยาไฮโดรไลซิสในการย้อม

4. ผลกระทบของสีย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแหล่งน้ำในธรรมชาติ ดังต่อไปนี้

4.1 สารอินทรีย์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ลดลงซึ่งมีผลทำให้ สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน ทำให้แหล่งน้ำขาดคุณสมบัติในการทำความสะอาดด้วยตนเอง (self purification) ได้ ทำให้แหล่งน้ำเกิดกลิ่นเหม็นและไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เกิดประโยชน์ในทางเศรษฐกิจได้ อีกทั้งสารอินทรีย์บางตัวอาจหากสารนั้นสลายตัวได้ยากก็จะเกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ (bio accumulation) และอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม

4.2 ค่าความเป็นด่าง ทำให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่สูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำที่มีสภาวะเป็นกลางช่วงความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 6.0-9.0

4.3 อุณหภูมิของน้ำที่ที่สูง จะมีผลทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อีกด้วย

4.4 โลหะหนัก และของแข็งที่ละลายน้ำบางชนิด อาจทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำเป็นโรคได้ อีกทั้งโลหะหนักยังเป็นสารสะสมในระบบนิเวศอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

4.5 สี เป็นการทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ และทำให้ปริมาณแสงที่จะส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

4.6 ของแข็งแขวนลอย เป็นสิ่งที่จะช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ สามารถตกตะกอน อาจทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้

5. การกำจัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมเนื่องจากการย้อมผ้า นั้น ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและถูกปล่อยลงในแหล่งน้ำ แม้จะมีการโต้เถียงว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่ก่อให้เกิดความรู้สึกรังเกียจต่อคนทั่วไป ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนจะถูกปล่อยออกนอกโรงงานจะต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการต่างๆ ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมี 5 ประเภทหลัก ดังตารางที่ 1 และสีแต่ละประเภทก็มีวิธีการกำจัดที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2 วิธีการกำจัดสีในน้ำทิ้งสำหรับสีย้อมประเภทต่างๆ

ตารางที่ 1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี

Process	Color Removal	Capacity	Speed	Cost	Treatment
1. Chemical Coagulation	Good	Large	Good	Large	Solid Removal Nitrificati
2. Activated Charcoal	Very Good	Small	Slow	High	Regeneration
3. Ozone T	Good	Large	Medium	High	By Product Dyestuff of
4. Membran Technology	Good	Large	Fast	High	Dyes in Wastewater
5. New Technology (Electrolysis/Inorganic Adsorption)	Good	Large	Fast	Medium or Fast	Adsorption of Dyes in Wastewater

ที่มา: นิรนาม (2536)

ตารางที่ 2 แสดงวิธีกำจัดสีในน้ำทิ้งสำหรับสีข้อมประเภทต่างๆ

Dye Type	Solu- Bility	Coag- ulation Alum	Acti- vated Carbon	Bio- logical	Physic- chemical Biological	Ozone	Sludge Adsorp- Tion
Acid	√	×	√	×	√	√	×
Basic	√	×	√√	√	√	√	√
Direct	√	-	-	-	√	-	√
Reactive	√	×	√	×	√	√√	×
Vat	×	√	×	×	√	√	-
Sulphur	×	√	×	×	√	√	-
Dye Type	Solu- Bility	Coag- ulation Alum	Acti- vated Carbon	Bio- logical	Physic- chemical Biological	Ozone	Sludge Adsorp- Tion
Dissperse	×	√	×	×	√	√	×

หมายเหตุ √√ = ให้ผลดีมาก √ = ให้ผลดี × = ใช้ไม่ได้

ที่มา: นันทยา, 2537

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 การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถ

แยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และ โมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า โมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

6.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

6.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

6.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

6.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

6.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

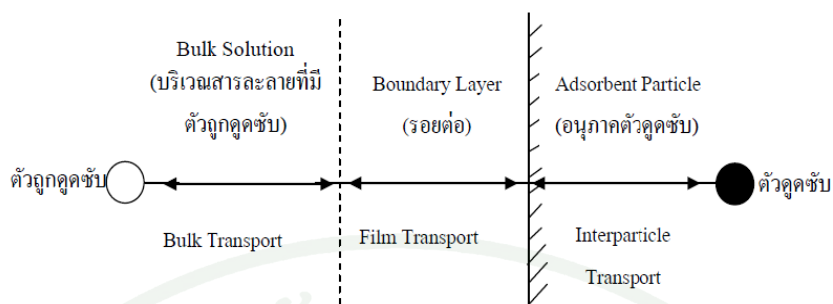
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

6.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

6.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

6.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)

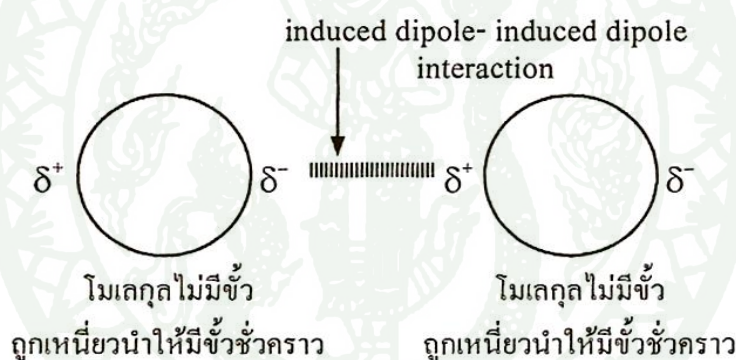
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

6.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

(1) แรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (london force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (induce dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน

โดยวิธีนี้ โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อๆ ไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย



ภาพที่ 2 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

(2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ฮาโลฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

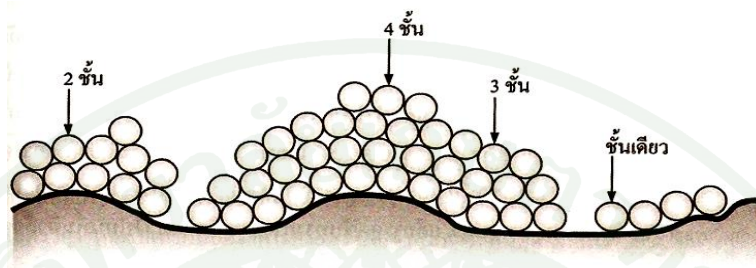
6.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงคู่ (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน) การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

6.4 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

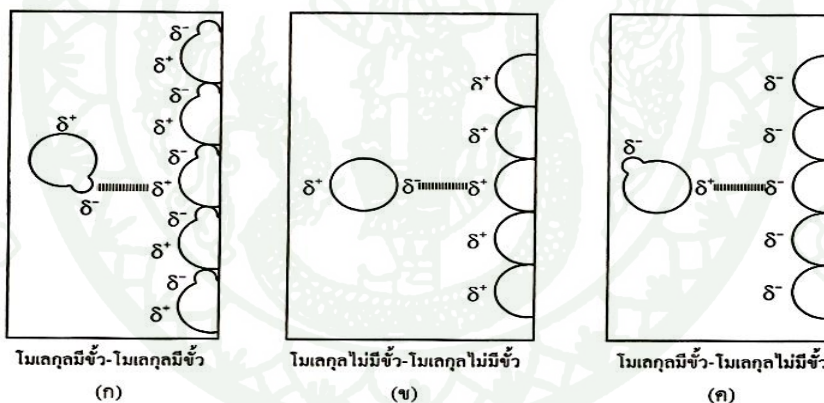
6.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงคู่ค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพลและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกจับก่อนหน้านั้น และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และ

ระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
 ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่
 ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้ว และ โมเลกุลตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

ภาพที่ 6 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.4.2 การดูดซับทางเคมี จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา (2550) อ้างถึง Maron and Prutton (1961))

6.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

6.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

6.5.2 ขนาดและลักษณะของตัวดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

6.5.3 อัตราเร็วการปั่นกววน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่น

กวนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้น การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกวนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

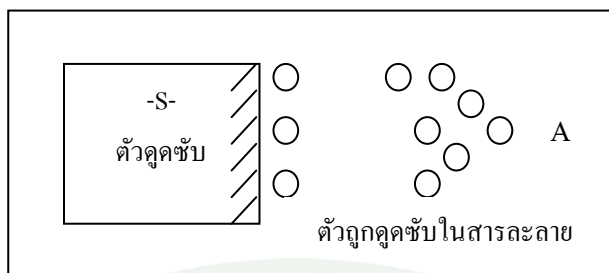
6.5.4 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

6.5.5 อุณหภูมิ อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

6.5.6 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

6.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในการละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายสถานะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

A เป็น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

-S- เป็น โมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็น สัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

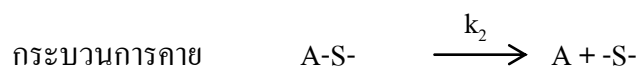
(1 - q) เป็น สัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

$$k_1 = [C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{1-q} = \frac{k_1}{k_2} [C] = K[C]$$

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = v(C_i - C_e) \quad (3)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับหน่วยเป็น ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็น โมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

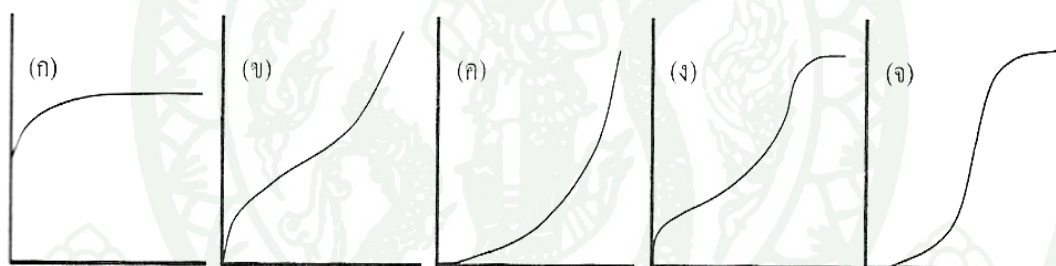
v เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร หรือลิตร

C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

6.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550) อ้างถึง Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 8 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

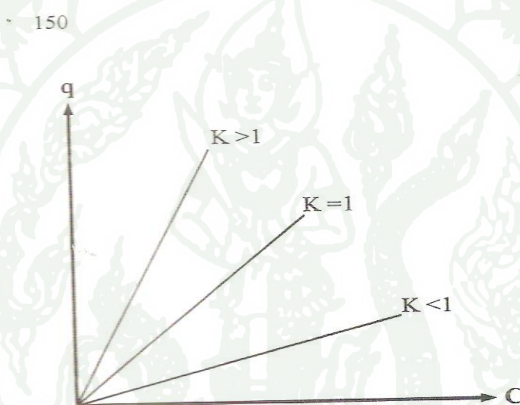
สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

6.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง (linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C จะได้

$$K = \frac{q}{C}$$

$$q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกคูดซั้บที่ถูกูดซั้บบนพื้นผิวตัวคูดซั้บ จะแปรตามความเข้มขั้บของตัวถูกูดซั้บที่เหลื้บอยู่ในสารละลายในสภาวะสมคูล โดยกั้บหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวคูดซั้บมีบริเวณให้ถูกูดซั้บแบบไม่จั้บกัดแรงยั้ดเห็นั้บระหว่างโมเลกุลตัวคูดซั้บและตัวถูกูดซั้บเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใ้ใช้ใ้ด้กั้บสารละลายที่ม่มีความเข้มขั้บของตัวถูกูดซั้บต่ำดั่งภาพที่ 9



หมายเหตุ $K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกูดซั้บ ถูกูดซั้บไว้ได้มากบนพื้นที่ผิวตัวคูดซั้บ
 $K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกูดซั้บ ถูกูดซั้บไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวคูดซั้บ
 $K = 1$ แสดงว่าการคูดซั้บอยู่ในสภาวะสมคูล

ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการคูดซั้บแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.7.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (freundlich adsorption isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอรัมของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

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

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอรัมของการดูดซับ โดยทั่วไป $1/n$ จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

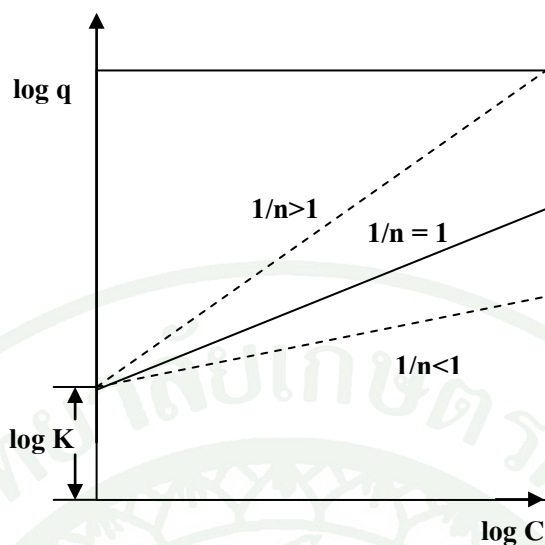
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

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



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

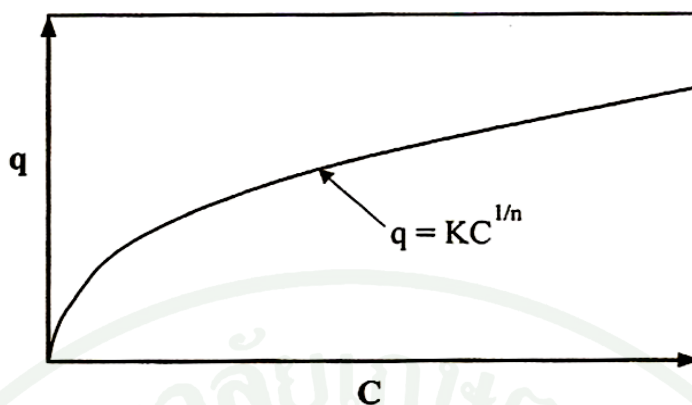
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

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

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

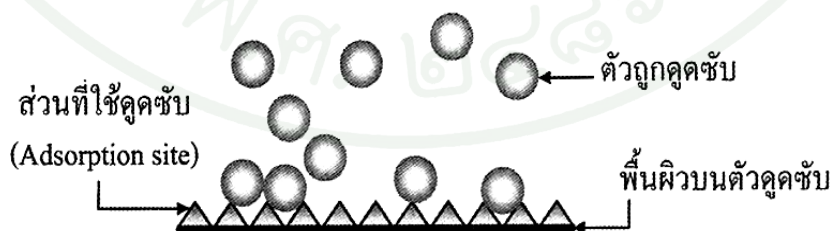
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (5) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

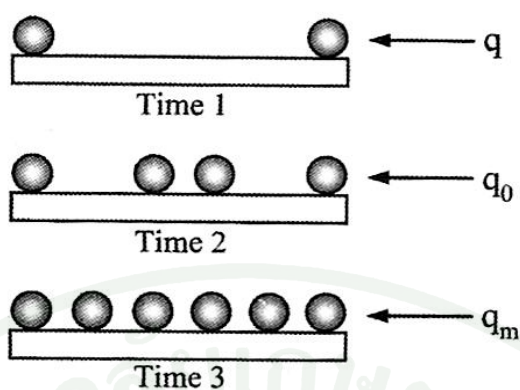
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 13 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และกณิดา (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

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

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

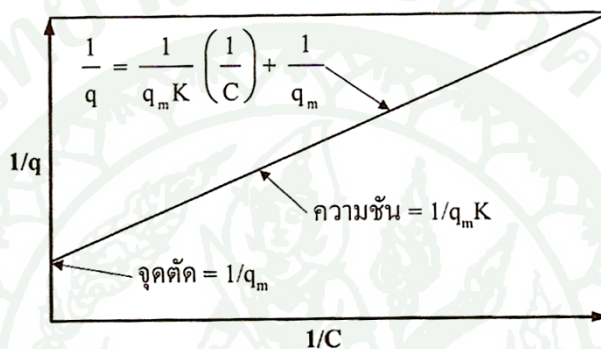
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.7.4 สมการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett Teller หรือ BET adsorption isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่าน ในปี ค.ศ. 1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

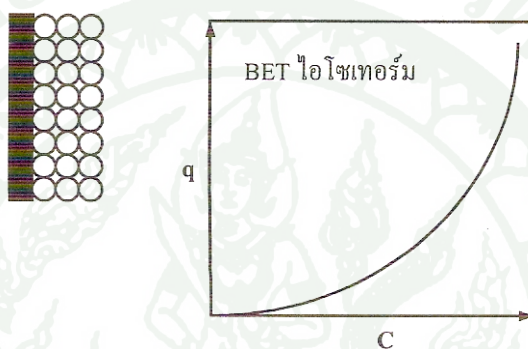
- (1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (multi-layer adsorption)
- (2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- (3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- (4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบแบดซ์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

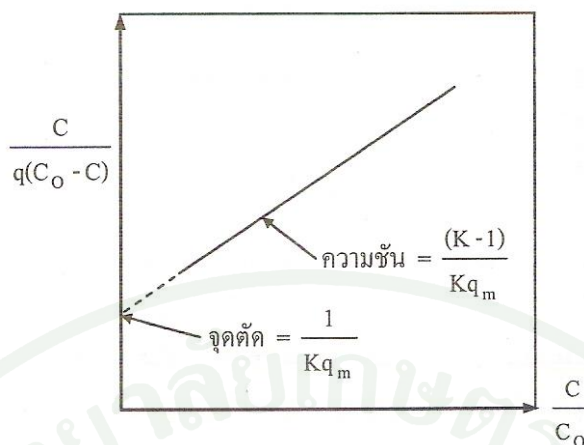
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

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

ความชันเท่ากับ $\frac{K - 1}{K q_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{K q_m}$



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

6.8.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอกติเวเตดซีลิกา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัมแต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

6.8.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตร/กรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ

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

6.8.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จี๊เลื้อย ไคโตซาน (chitosan) กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) ถั่วแกลบดำ เป็นต้น

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

7. วัสดุที่ใช้ทำการศึกษา

7.1 ถ้ำลอยลิกไนต์

ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะที่ซับซ้อนหลายชนิด โดยถ้ำลิกไนต์จะมี 2 สภาพ คือ

7.1.1 ถ้ำหนัก (bottom ash หรือ wet ash) เป็นถ้ำที่ได้จากการปะทะของอนุภาคถ้ำในบริเวณที่เกิดการสันดาป อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมถ้ำที่จะปะทะกันเป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา บางส่วนของถ้ำปะทะกับผนังเตาและหลอมติดรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อน้ำหนักรวมกันมากเข้าจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

7.1.2 ถ้ำลอย (fly ash ,pulverized fuel ash หรือ dry ash) เป็นถ้ำที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ถ้ำจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดไปสู่ปล่องควัน และถูกจับไว้ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า (electrostatic precipitator) แล้วถูกรวบรวมไว้ที่เก็บถ้ำปริมาณของถ้ำหนักและถ้ำลอยที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์จะมีประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักถ่านหินที่เผา (วิจิตอำจรรา และคณะ, 2536)

7.2 คุณสมบัติทางเคมีของถ้ำลอยลิกไนต์

จากการส่งตัวอย่างของถ้ำลอยลิกไนต์ไปตรวจสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พบว่าในถ้ำลอยลิกไนต์ ประกอบด้วยซิลิกอนออกไซด์ร้อยละ 40.89 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 14.54 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 13.33 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบอื่นๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยลิกไนต์ (ร้อยละ)
SiO ₂	40.89
CaO	14.54
Al ₂ O ₃	13.33
SO ₃	2.71
K ₂ O	2.25
MgO	2.08
MnO	0.39
Fe ₂ O ₃	19.79
P ₂ O ₅	0.57
TiO ₂	0.48
LOI	0.35

หมายเหตุ LOI (Loss On Lgnition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย

ที่มา: วรวิทย์ และคณะ (2553)

7.3 ดินเหนียว

เนื้อดินประกอบด้วยอนุภาคขนาดดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไป มีอนุภาคขนาดทรายร้อยละ 45 หรือน้อยกว่า และมีอนุภาคขนาดทรายแป้งน้อยกว่าร้อยละ 40 ดินเหนียวเป็นดินที่มีเนื้อละเอียด ในสภาพดินแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกน้ำแล้วจะมีความยึดหยุ่น สามารถปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ เหนียวเหนอะหนะติดมือ เป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศไม่ดี แต่สามารถอุ้มน้ำ ดูดซึบ และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ดี เหมาะที่จะใช้ทำนาเพราะเก็บน้ำได้นาน

7.4 ดินทราย

เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 85 ลักษณะโดยทั่วไปจะเกาะตัวกันหลวมๆ และมองเห็นเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ ถ้าสัมผัสดินที่อยู่ในสภาพแห้งจะรู้สึกสากมือ เมื่อลองกำดินที่แห่งนี้ไว้ในอุ้งมือแล้วคลายมือออกดินก็จะแตกออกจากกันได้ แต่ถ้ากำดินที่อยู่ในสภาพชื้นจะสามารถทำให้เป็นก้อนหลวมๆ ได้ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกันทันที ดินทรายเป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศดีมาก แต่มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เพราะความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารพืชมีน้อย พืชที่ขึ้นบนดินทรายจึงมักขาดทั้งธาตุอาหารและน้ำ

7.5 ระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

ระบบหญ้ากรองน้ำเสีย เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางธรรมชาติโดยวิธีทางชีววิทยาวิธีหนึ่ง โดยใช้ดินเป็นฐานให้เป็น ระบบที่มีการจัดการสิ่งแวดล้อมในลักษณะผสมผสานการบำบัดน้ำเสีย และการใช้ประโยชน์ในด้านการเลี้ยงสัตว์เข้าด้วยกัน นิยมใช้บำบัดน้ำเสียในประเทศออสเตรเลีย ในช่วงฤดูหนาวโดยใช้สลับกับระบบกรองด้วยดิน (land filtration) ในช่วงฤดูร้อนระบบนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบแถบพืชกรองน้ำ (Grass Filter Strips : GFS) ใช้เพื่อกำจัดตะกอนน้ำจากถนน ในประเทศอเมริกา (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2547)

ระบบหญ้ากรอง เป็นระบบที่มีความสมดุลของมวลสารภายในระบบ มีลักษณะคล้ายกับพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยมีการหมุนเวียนของธาตุอาหาร และสารเคมีต่าง ๆ อย่างสมดุล มีหลักการพื้นฐานคือเมื่อปล่อยน้ำเสียเข้าไปแปลงดินที่ปลูกหญ้า ดินจะทำหน้าที่กรองของเสียในน้ำเสีย โดยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการใช้ออกซิเจน (anaerobic) สารอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถันเป็นอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต รวมถึงการ แบ่งเซลล์ของตัว จุลินทรีย์เอง และเพื่อการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) โดยการนำ เอาสารคาร์โบไฮเดรต โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลูโคสไปเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งมีอยู่ในดิน เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนแก๊สออกซิเจน โดยกระบวนการหายใจนี้สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สารอินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของโปรตีนหรือสารคล้ายโปรตีนก็จะถูกจุลินทรีย์พวกนี้เปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นธาตุอาหารพืช คือ แอมโมเนียม ส่วน จุลินทรีย์ ที่สามารถเปลี่ยนอินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัสในรูปที่พืชใช้ได้ บางครั้งส่งโมโนฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4) รองรับจุลินทรีย์ฟอสฟอรัสซิส ซึ่งยังไม่มีหลักฐานชัดเจนว่าสามารถถูกเปลี่ยน ให้เป็นสารอนินทรีย์ได้

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุวิชา (2546) ศึกษาการบำบัดนิเกิลในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า การบำบัดนิเกิลจากการดูดซับผิวรวมกับการตกผลึกทางเคมี ปริมาณวัสดุเหลือใช้ถ่านกัมมันต์และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการบำบัดนิเกิลให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งกระทรวงวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ได้คือ 25 กรัมและ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ การปรับค่าพีเอชมีผลต่อการบำบัดน้อยมาก การตกตะกอนแขวนลอยในน้ำออกต้องใช้สารส้มในการช่วยจับตะกอนที่ความเข้มข้น 10,000 mg/l ส่วนการทดสอบการชะละลายนิเกิลโดยการสกัดสารพบว่านิเกิลคายออกมาในปริมาณที่น้อย

อดิศักดิ์ (2546) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยการกรองด้วยทรายแบบกรองช้าร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า ระบบบำบัดให้ประสิทธิภาพสูงโดยสามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ดีที่สุดที่อัตราน้ำสิ้นผิว 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. คือสามารถบำบัดความขุ่นของแข็งแขวนลอย 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 ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและของแข็งแขวนลอยเบื้องต้นได้สูง และเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของระบบบำบัด

จินตนา (2550) ศึกษาถึงการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีไครเรทท์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ซึ่งพบว่า ผักตบชวาสามารถกำจัดสีย้อมไครเรทท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นไปตามกลไกของสมการการดูดซับของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ โดยใช้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นผงและปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ ซึ่งทำการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของค่าพีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาการปั่นกววน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นสีย้อมไครเรทท์โดยทำการทดลองแบบเบดซ์

รุ่งนภา (2550) ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและการประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมและโลหะหนักในน้ำ โดยใช้ ถ่าน กะลามะพร้าว ขี้เถ้าไม่ย่างพาราและเปลือกยางพาราด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์พบว่า การคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แสงด้วยกรดฟอสฟอริก 50 องศาเซลเซียส จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนัมเบอร์เท่ากับ 385, 690, 689 และ 719 ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมของแต่ละชนิดไปทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมและโลหะหนัก พบว่าขี้เถ้าไม่ย่างพารามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมและโลหะหนักดีที่สุด

Leechart, P. *et al.* (2007) ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ถ้ำจากจีเลื้อยเพื่อใช้ในการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบอะโซ พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบที่ใช้คือ 150 รอบต่อนาที และความเข้มข้นสารละลายสีข้อมที่ใส่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้ำจากจีเลื้อยสามารถดูดซับสีริแอกทีฟได้

Santhy (2005) ศึกษาถึงการกำจัดสีข้อมออกจากน้ำทิ้งโดยใช้ถ้ำจากกามะพร้าว พบว่าระยะเวลาในการสัมผัสที่สามารถกำจัดสีข้อมออกจากน้ำทิ้งได้ดีที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาแต่จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่ดีที่สุดคือ ร้อยละ 90 และค่าพีเอชที่ดีที่สุดคือ 1 โดยปริมาณของคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 กรัมต่อลิตร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์










- 1.1 เครื่องยิวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
- 1.2 ตู้อบ รุ่น OF – 11E ยี่ห้อ JEIO TECH
- 1.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 1.4 ตู้ดูดความชื้น (desicater)
- 1.5 เครื่องวัด pH
- 1.6 เครื่องแก้ว
- 1.7 ชุดคอลัมน์แก้ว พร้อมแคมป์จับและขาตั้ง
- 1.8 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman
- 1.9 กระดาษปลอก

2. สารเคมี

2.1 สีย้อมมาตรฐาน

สีย้อมมาตรฐานได้จากโรงงานย้อมผ้า โครงการคอตตั้นทั้งหมด 9 ชนิด คือ Yellow LS-RN, Yellow LS-4G, Orange LSB, Red LS-BN, Blue LS-3R, Black G, Navy LS-G, Turquoise H-GH และ Br.Blue G และแต่ละชนิดมีค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้มากที่สุดที่ความยาวคลื่น (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 สีย้อม (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง 9 ชนิด

สัญลักษณ์	Dyes	λ Max (nm)
A	 Yellow LS-RN	400
B	 Yellow LS-4G	420
C	 Orange LSB	434
D	 Red LS-BN	546
E	 Blue LS-3R	588
F	 Black G	594
G	 Navy LS-G	616
H	 Turquoise H-GH	662
I	 Br.Blue G	666

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

2.3 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl)

3. วัสดุดูดซับและวัสดุปลูก

3.1 ถ้ำลอยลิกไนต์จากบริษัทน้ำมันพีชปทุมธานี จำกัด

3.2 ดินผสมทราย จากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมภาคแม่เปิน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

4. พืชที่ใช้ปลูก

4.1 ต้นรูปถาพี

4.2 หญ้าแฝก

5. น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการย้อมผ้าออยตุง

วิธีการ

1. การเตรียมตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์

นำถ้ำลอยลิกไนต์ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอนและอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น เก็บถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้ในที่แห้งและมีฝาปิดมิดชิดไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

2. การเตรียมสารละลาย

2.1 สารละลายมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด แต่ละชนิดเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งสีย้อม Yellow LS-RN 10.00 มิลลิกรัม ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 1.0 ลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่น นำสีย้อมอีก 8 ชนิด มาเตรียมเป็นสารละลายเช่นเดียวกับสีย้อม Yellow LS-RN

2.2 สารละลายมาตรฐานสีย้อม ความเข้มข้น 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 และ 50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

เปิดสารละลายสีย้อม Yellow LS-RN ที่เตรียมจากข้อ 2.1 มา 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 และ 50.0 มิลลิกรัมมาใส่ขวดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นแต่ละขวดให้เป็น 100.0 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานสีย้อม ความเข้มข้น 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 และ 50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และนำสารละลายสีย้อมอีก 8 ชนิด มาเตรียมเป็นสารละลายเช่นเดียวกับสารละลายสีย้อม Yellow LS-R

2.3 สารละลายมาตรฐานสีย้อมผสมที่มีความเข้มข้นของสีย้อมแต่ละชนิด 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งสีย้อมมาตรฐาน 9 ชนิด ชนิดละ 0.01 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานสี่ย้อม 9 ชนิด

นำสารละลายมาตรฐานสี่ย้อมแต่ละชนิดและแต่ละความเข้มข้น มาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) ที่ค่าความยาวคลื่นที่สี่ย้อมแต่ละชนิดดูดกลืนได้มากที่สุด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกน X) กับความเข้มข้นของสารละลายสี่ย้อมแต่ละชนิด (แกน Y) จะได้กราฟมาตรฐานสี่ย้อมทั้ง 9 ชนิด จากนั้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกน X) กับความเข้มข้นของสารละลายสี่ย้อม (แกน Y) จะได้กราฟมาตรฐานสี่ย้อมทั้ง 9 ชนิด

4. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสี่ย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์(สารละลายสี่ย้อมมาตรฐานผสม) โดยวิธีแบบแบตช์

4.1 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสี่ย้อมกับถ้ำลอยลิกไนต์

4.1.1 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์เบื้องต้น ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์ที่เตรียมจากข้อ 1.1 ปริมาณ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 60 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสี่ย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4.1.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์ ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับพีเอชเป็น 5, 6, 7, 8 และ 9 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ตามลำดับ เขย่าตั้งทิ้งไว้ 60 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสี่ย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4.1.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์ ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้โดยแปรผันเวลาเป็นชั่วโมงคือ 1, 2, 3, 4, 5, 6 ชั่วโมง และแปรผันเวลาเป็นวันคือ 1, 2, 3, 4, 5 วัน กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสี่ย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4.1.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมและไอโซเทอร์ม โดยการทดลองแบบเบตซ์

(1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์ ปริมาณ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กรัม ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ต่อสารละลายมาตรฐานเข้มข้นเท่ากับที่ได้จากการทดลอง 2.3 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับที่ได้จากการทดลอง 4.1.2 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้โดยเก็บตัวอย่างตามเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.3 กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม ทำการทดลอง 3 ครั้ง

(2) ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 4.1.4 มาเขียน ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมของดิน

ซึ่งดินปริมาณ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0 และ 14.0 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 60 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4.3 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน

4.3.1 ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์: ดิน ในอัตราส่วน 1: 5, 1: 10, 1: 15, 1: 20 และ 1: 25 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เท่ากับการทดลองในข้อ 4.1.2 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 60 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4.3.2 ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้โดยแปรผันเวลาเป็นชั่วโมง คือ 1, 2, 3, 4, 5, 6 ชั่วโมง และ

แปรผันเวลาเป็นวันคือ 1, 2, 3, 4, 5 วัน กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4.3.3 ชั่งถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 เติมน้ำเสียดังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ระยะเวลาชั่วโมงที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 5.3.2 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมส่วนตัวดูดซับนำมาทำการทดลองซ้ำต่อเนื่องจนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

ชั่งถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่แปรผันเวลาเป็นวันคือ 5 วัน

4.4 ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าของโครงการพัฒนาออยดุง

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง หลังผ่านการกำจัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยทำความสะอาดภาชนะเก็บตัวอย่างน้ำขนาด 20 ลิตร ด้วยตัวอย่างน้ำทิ้ง 1-2 ครั้ง ก่อนจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำใส่ภาชนะเก็บน้ำ นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมและดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ (temperature), ของแข็งทั้งหมด (total solids), ของแข็งแขวนลอย (total suspended solid), ของแข็งละลายน้ำ (total dissolved solids), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity), ค่าความเค็ม (salinity), ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO) และ ค่าความสกปรกของน้ำ (biochemical oxygen demand, BOD)

4.5 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน

4.5.1 นำน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง 50 มิลลิลิตร มาทดลองใช้ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ของถ้ำลอยลิกไนต์ โดยชั่งถ้ำลอยลิกไนต์ในปริมาณเท่ากับที่ให้ร้อยละการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 และระยะเวลาที่ให้ร้อยละการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลอง 4.1.3 โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำน้ำทิ้งที่ผ่านการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ มาวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำหลังการดูดซับ

4.5.2 สำหรับอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน ซึ่งตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์:ดิน ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.1 และระยะเวลาที่ให้ ร้อยละการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลอง 4.3.2 โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ดัชนี คุณภาพน้ำหลังการดูดซับ

5. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับ ดินโดยวิธีการไหลต่อเนื่อง

5.1 นำคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.8 เซนติเมตร สูง 37 เซนติเมตร โดยบรรจุกรวด 9.6 เซนติเมตร ทราบหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราบละเอียด 2.8 เซนติเมตร และอัตราส่วนของถ้ำลอย ลิกไนต์ผสมดิน จากข้อ 4.3.1 ซึ่งการบรรจุดังกล่าวเป็นการจำลองระบบหน่วยกรองน้ำเสียของโครงการ แหลมผักเปื้อน

5.2 บรรจุใส่คอลัมน์ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ 450 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ลงใน คอลัมน์ สูงเหนือตัวดูดซับ 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 17 เก็บตัวอย่างน้ำจากคอลัมน์ทุกๆ 3 ชั่วโมง ปริมาณ 50 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสีข้อมที่เหลือหลังการดูดซับและคำนวณ ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม

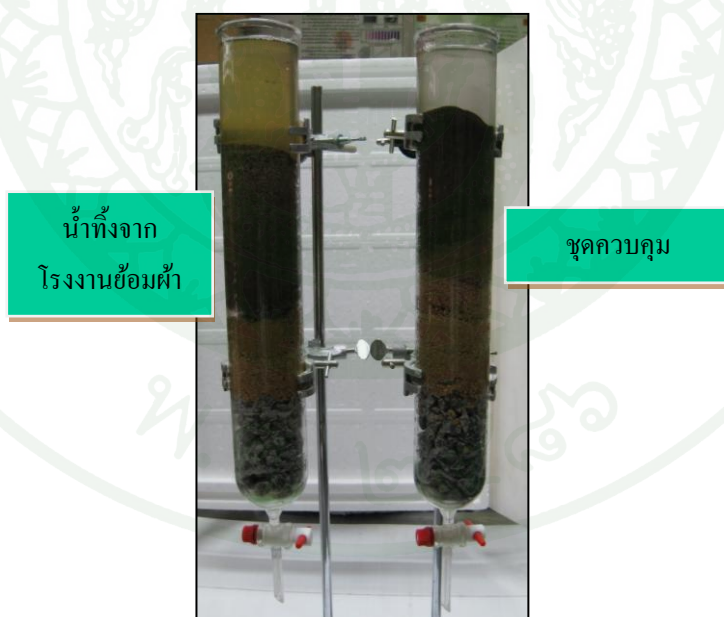


ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์จากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน โดย การซ่งแซ่ 3 ชั่วโมงโดยวิธีการไหลต่อเนื่อง

5.3 ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาณ 450 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ทดลองได้จากข้อ 4.1.2 บรรจุตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์และดิน ปริมาณ 26.66 : 400 กรัม ลงในคอลัมน์ จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์แช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยให้แห้ง 2 วัน แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม และคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

6. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินโดยวิธีการไหลต่อเนื่อง

ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า ปริมาณ 450 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ทดลองได้จากข้อ 4.1.2 บรรจุตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์และดิน ปริมาณ 26.66: 400 กรัม ลงในคอลัมน์ จากนั้นเติมน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าแช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยให้แห้ง 2 วัน แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม และคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมของถ้ำลอยลิกไนต์และดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

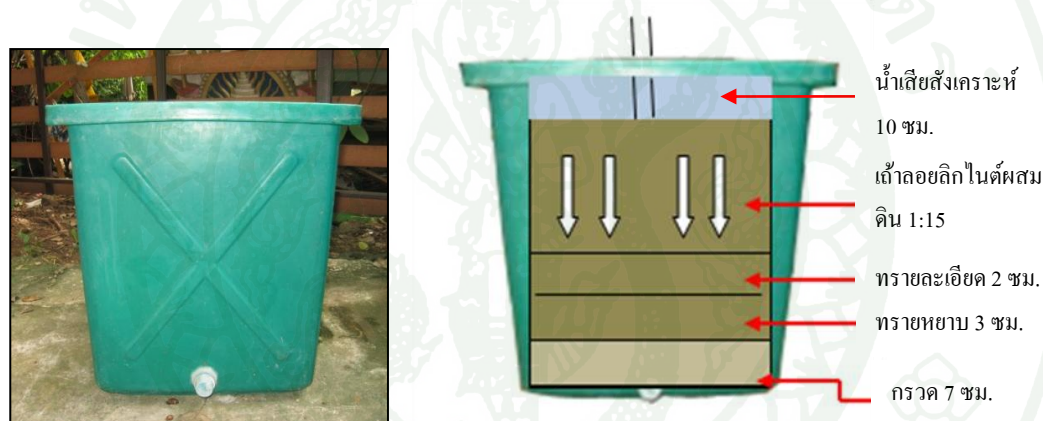


ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมโดยถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

7. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็บบำบัดเสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูกในกระเบปลูกรูปถาพและหล้าแฝก

7.1 ชุดควบคุม (controls) นำกระเบปลูกขนาด 51×51×54 ซม. บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ทราขหยาบ 3 เซนติเมตร ทราขละเอียด 2 เซนติเมตร และดิน 90 กิโลกรัม โดยมีการปลูกรูปถาพและหล้าแฝกลงในกระเบปลูก จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 20 ลิตร แซ่ทิ้งไว้ 5 วัน ปลอ่ยแห้ง 2 วัน แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับเสีย้อม ทำการทดลอง 3 แซ่

7.2 นำถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 4.3.1 ทำการทดลอง แซ่เดียวกับข้อ 7.1 ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 กระเบปลูกและชั้นของกรวด, ทราขหยาบ, ทราขละเอียด และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน

8. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ.2554 ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ.2555

ผลและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โดยใช้อัตราดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์และดินใช้เป็นวัสดุปลูก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้กับระบบหญากรองน้ำเสีย การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองแบบแบดซ์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัด ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ พีเอช ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับและไอโซเทอร์มของการดูดซับ ส่วนที่สอง เป็นการทดลองการบำบัดแบบคอลัมน์ไหลต่อเนื่อง โดยใช้อัตราดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกลงในคอลัมน์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโดยดุงในการทดลอง และส่วนที่สาม เป็นการทดลองการบำบัดแบบประยุกต์ใช้งานจริง โดยบรรจุตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินที่ใช้เป็นวัสดุปลูกโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง แล้วทำการปล่อยน้ำตามระบบหญากรองน้ำเสีย ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังนี้

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

1.1 การเตรียมตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์

จากข้อ 4.1.1 ถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด แห้ง และมีสีดำ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม

นำสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) ที่ค่าความยาวคลื่น 400, 420, 434, 546, 588, 594, 616, 662 และ 666 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสม (แกนนอน) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (square) ของสารละลายสีย้อมผสมมีค่าเท่ากับ 0.9951, 0.9945, 0.9951, 0.9970, 0.9945, 0.9958, 0.9974, 0.9873 และ 0.9968 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมการเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) กราฟมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด

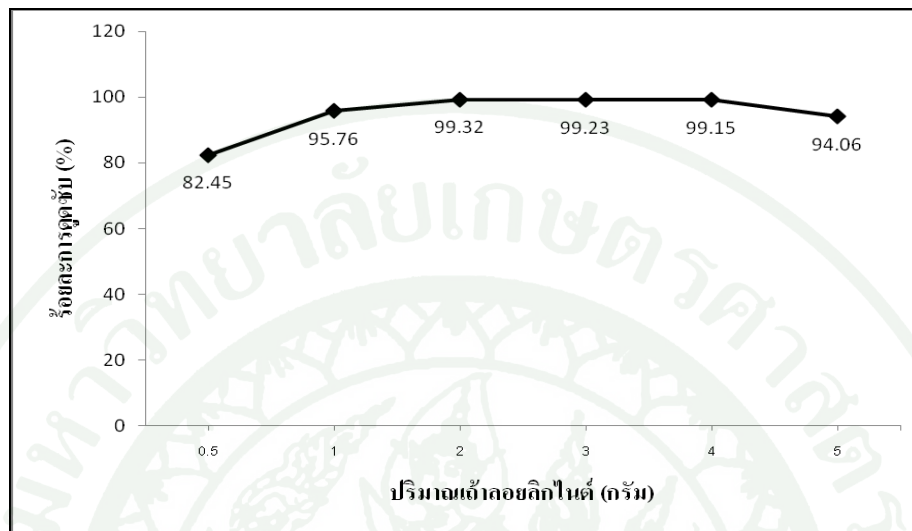
ชนิดสีย้อม	สมการเชิงเส้น	R^2
Yellow LS-RN	$y = 0.0841x + 0.1017$	0.9951
Yellow LS-4G	$y = 0.0771x + 0.2532$	0.9945
Orange LSB	$y = 0.0823x + 0.0737$	0.9951
Red LS-BN	$y = 0.0697x + 0.0252$	0.997
Blue LS-3R	$y = 0.0708x + 0.1622$	0.9948
Black G	$y = 0.0803x + 0.0557$	0.9958
Navy LS-G	$y = 0.0776x + 0.0901$	0.9974
Turquoise H-GH	$y = 0.0372x + 0.219$	0.9873
Br.Blue G	$y = 0.0344x + 0.2058$	0.9968

3. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมโดยวิธีแบบเบตซ์

3.1 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์เบื้องต้น

จากการทดลอง 4.1.1 โดยแปรผันปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เป็น 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 50 มิลลิตร ถ้ำลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมได้ทั้ง 9 ชนิด (Yellow LS-RN, Yellow LS-4G, Orange LSB, Red LS-BN, Blue LS-3R, Black G, Navy LS-G, Turquoise H-GH และ Br. Blue G) พบว่าถ้ำลอยลิกไนต์ปริมาณ 2.0 กรัม

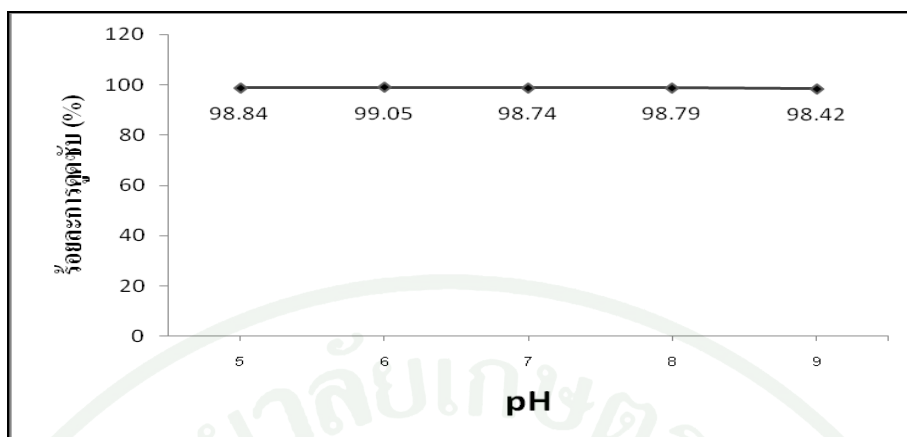
ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผสมสูงสุดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 99.32 ดังภาพที่ 21 ดังนั้นจึงเลือกใช้
 เถ้าลอยลิกไนต์ที่ปริมาณ 2 กรัม มาใช้ในการศึกษาและทดลองปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



ภาพที่ 21 ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เริ่มต้นกับร้อยละการดูดซับสีย้อม

3.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

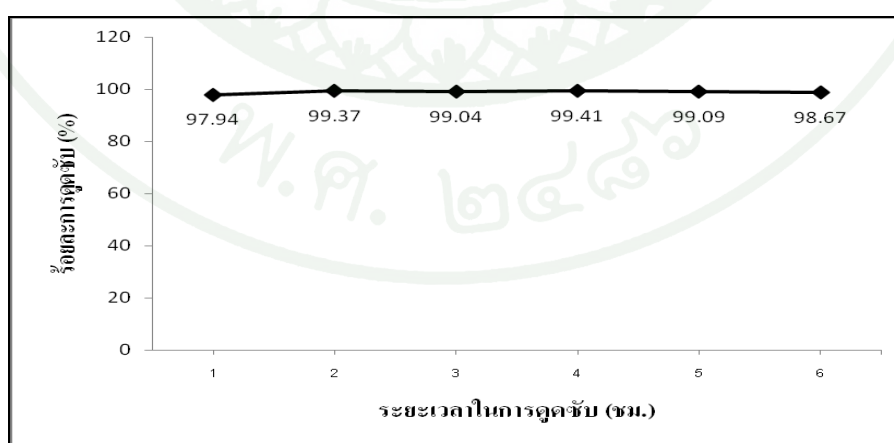
จากการทดลองในข้อ 4.1.1 พบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ 2 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมใน
 น้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตรที่มีการปรับพีเอชเป็น 5, 6, 7, 8 และ 9
 ได้ร้อยละ 98.48, 99.05, 98.74, 98.79 และ 98.42 ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 จากการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็น
 เห็นว่าที่พีเอชต่างกันให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมใกล้เคียงกันหรือกล่าวได้ว่าพีเอชไม่มีอิทธิพล
 ต่อการดูดซับ เนื่องจากโครงสร้างของเถ้าลอยลิกไนต์มีความเป็นรูพรุนอยู่มากทำให้กลไกการดูดซับสี
 ย้อมของเถ้าลอยลิกไนต์จึงเป็นการดูดซับแบบกายภาพ คือ โมเลกุลสีย้อมถูกจับไว้ในรูพรุน ดังนั้นผู้วิจัย
 จึงเลือกใช้สภาวะที่เป็นกลาง pH 7 ในการทำการทดลองขั้นต่อไป เพื่อลดปัญหาความเป็นกรด-เบสของ
 น้ำทิ้ง



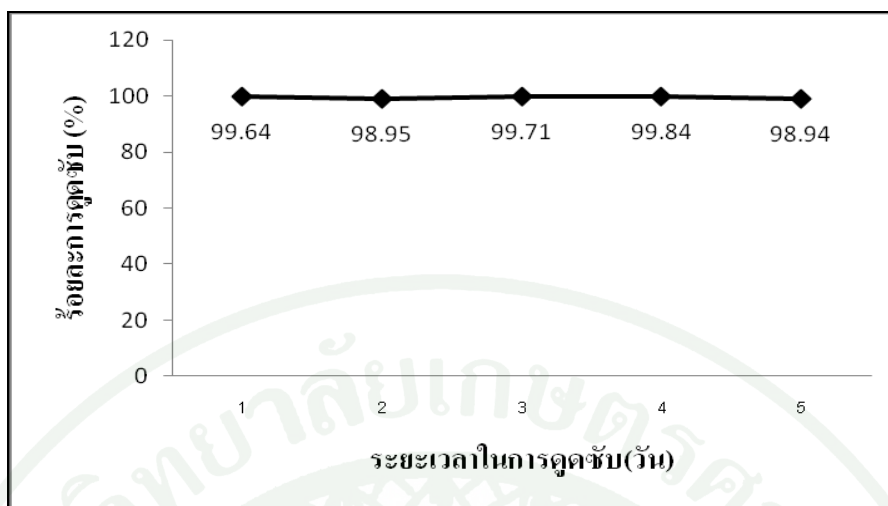
ภาพที่ 22 พีเอชกับร้อยละการดัดซั้มสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์

3.3 ศึกษาอิทธิพลระยะเวลา ที่เหมาะสมในการดัดซั้มสี่ข้อมของถ้ำลอยลิกไนต์

จากการทดลองข้อ 4.1.1 ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ 2 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอชเท่ากับ 7 เขย่า แล้วตั้งทิ้งไว้ในระยะเวลาบำบัดต่างกันเป็นชั่วโมง คือ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ที่ระยะเวลาเป็นชั่วโมงให้ร้อยละการบำบัดใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 97-99% ดังแสดงในภาพที่ 33 และ ตารางในภาคผนวกที่ 4 และให้ร้อยละการบำบัดสูงที่สุดที่ 4 ชั่วโมง คือเท่ากับ 99.41% และเมื่อในระยะเวลาบำบัดเป็นวันคือ 1, 2, 3, 4 และ 5 วัน พบว่า ประสิทธิภาพการดัดซั้มไม่ลดลงหรือไม่มีการคายซั้มเกิดขึ้น ประสิทธิภาพการดัดซั้มคงอยู่ที่ 98.99% ดังแสดงในภาพที่ 23 และ ตารางผนวกที่ 5



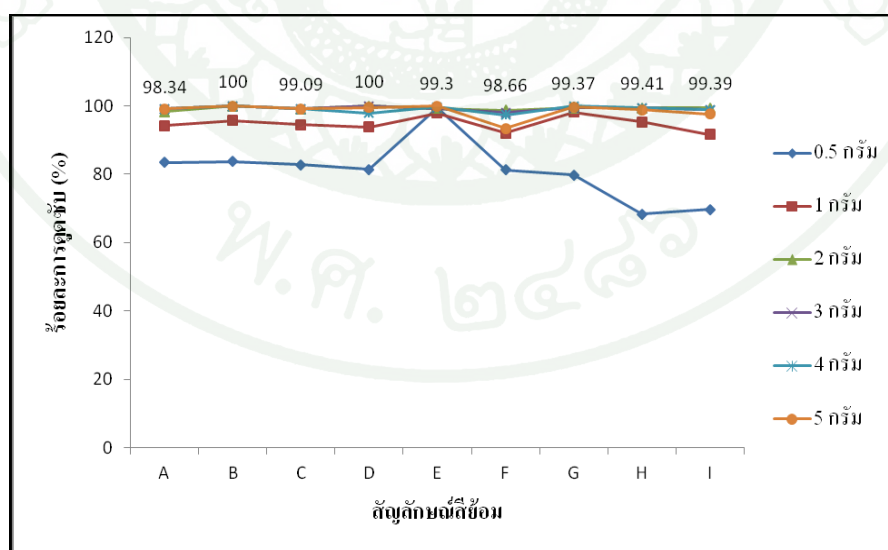
ภาพที่ 23 ระยะเวลาชั่วโมงกับร้อยละการดัดซั้มสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์



ภาพที่ 24 ระยะเวลาวันกับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์

3.4 ไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อม

จากการทดลองในข้อที่ 4.1.1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับพีเอชเท่ากับ 7 ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กรัม ดังตารางที่ 6 ผลการทดลองดังนี้ ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ 2 กรัม สามารถดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 99.32 ดังภาพที่ 25

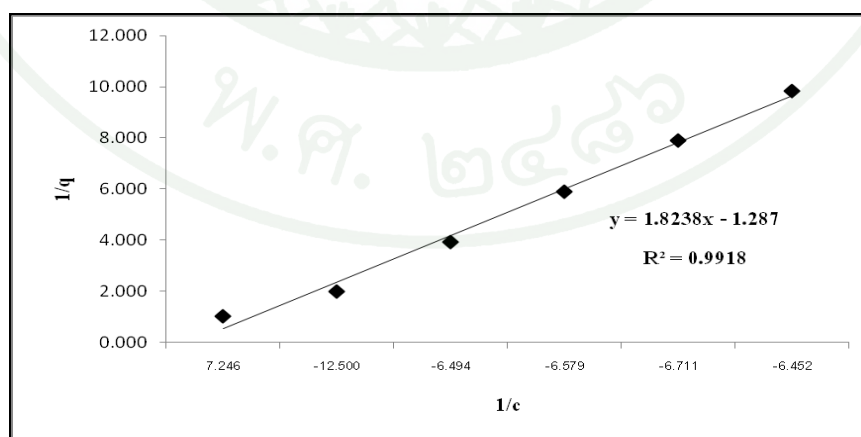


ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมของถ้ำลอยลิกไนต์กับปริมาณตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์

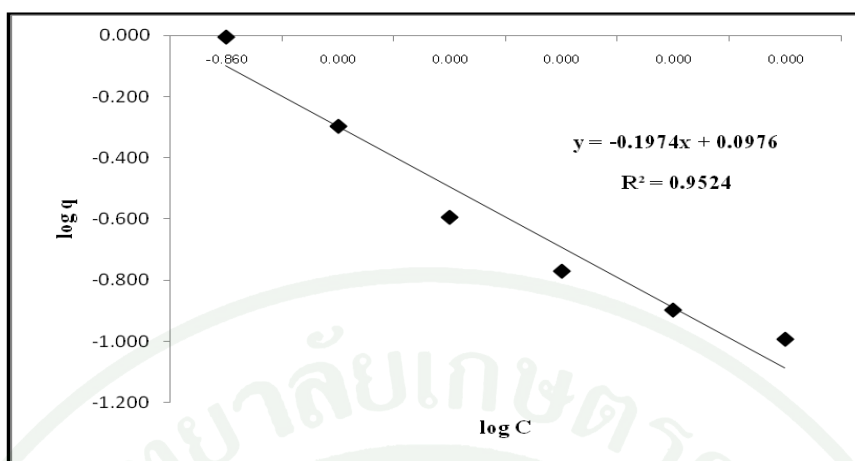
ตารางที่ 6 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์ต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสี่ข้อมจากถ้ำลอยลิกไนต์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสี่ข้อมของตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์
0.5	82.45
1	95.76
2	99.32
3	99.23
4	99.15
5	94.06

เมื่อนำผลที่ได้มาเขียน ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้ไอโซเทอร์มดังกล่าวที่ 42 และ 43 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r-square) ในการดูดซับสี่ข้อมของแลงเมียร์และฟรุนดลิชคือ 0.9918 และ 0.9524 แสดงว่ากลไกการดูดซับของตัวดูดซับจากถ้ำลอยลิกไนต์เป็นไปทั้งการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญซึ่งกลไกของแลงเมียร์คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (homogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ ส่วนกลไกของฟรุนดลิช คือ พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์หรือพื้นผิวบนตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด



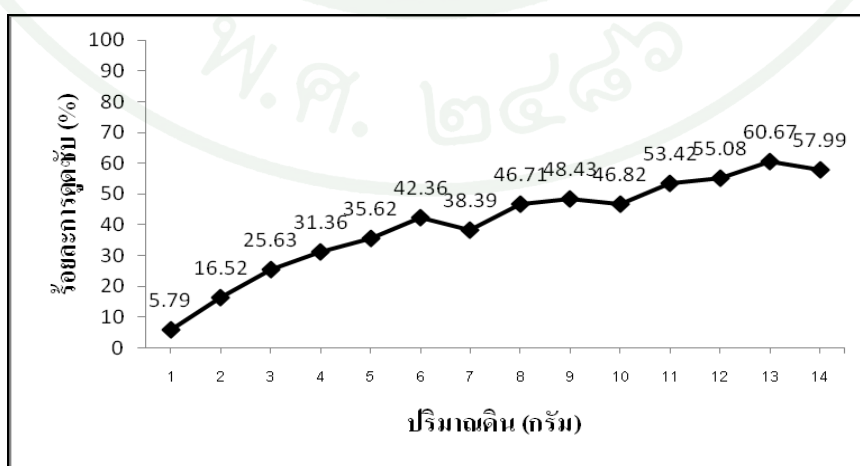
ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมของแลงเมียร์ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์



ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมของฟรอนดิซด้วยถ้ำลอยติกไนต์

3.5 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณดินที่เหมาะสม

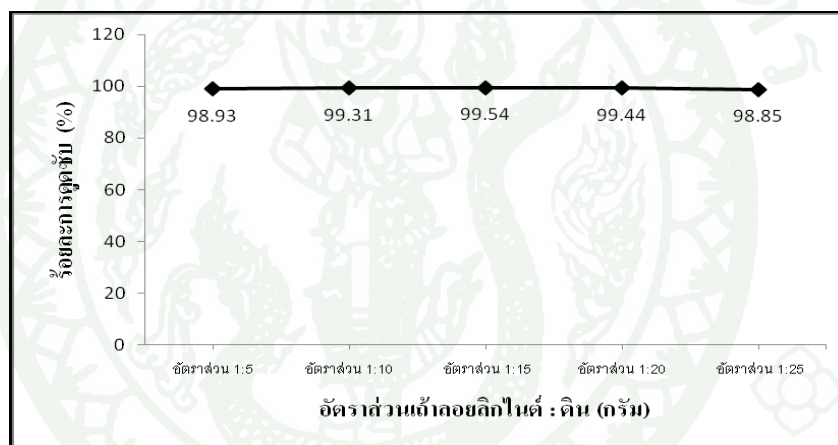
จากการทดลองในข้อ 5.3 โดยใช้ปริมาณดินต่างๆ กันดังนี้ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0 และ 14.0 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ แต่ละใบ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแปร โดยตรงกับปริมาณดิน เมื่อปริมาณดินเพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 28 ทั้งนี้เนื่องจากดินที่ใช้ในการศึกษานั้นเป็นดินนาผสมทรายในอัตราส่วน ดิน 3 ส่วน ทราย 1 ส่วน ซึ่งโมเลกุลของดินที่ใช้มีการเกาะตัวกันหลวมๆ ทำให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถแทรกไปอยู่ระหว่างดินได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผสมเช่นกัน มีผลดังนี้



ภาพที่ 28 การดูดซับสีย้อมของดินกับปริมาณดิน

3.6 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยลิกไนต์:ดิน

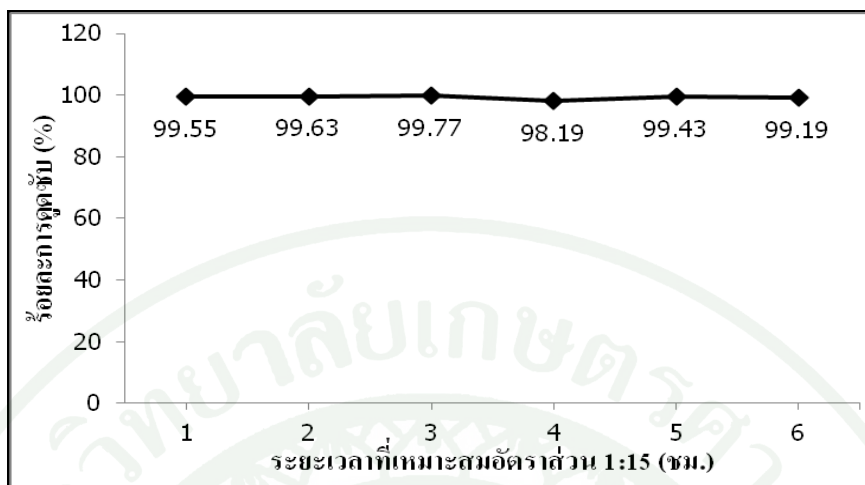
จากการทดลองข้อที่ 4.3.1 ได้มีการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน เป็น 1: 5, 1: 10, 1: 15, 1: 20 และ 1: 25 ค่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ปรับพีเอช 7 พบว่า อัตราส่วนของเถ้าลอยลิกไนต์และดิน ให้ร้อยละการดูดซับสีข้อมใกล้เคียงกันมากคือ ประมาณ 99% ซึ่งร้อยละการดูดซับสีข้อมมีร้อยละการดูดซับแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้วิจัยเลือกอัตราส่วนเท่ากับ 1: 15 เนื่องจากให้ประสิทธิภาพกำจัดสีข้อมดีที่สุดร้อยละ 99.54 และในอัตราส่วน 1:15 ยังทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ ดังภาพที่ 29 ดังนั้นเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินมีศักยภาพสูงพอที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุปลูกในการกำจัดสีข้อมด้วยระบบบำบัดน้ำเสียด้วยหญ้ากรองน้ำเสีย มีผลดังนี้



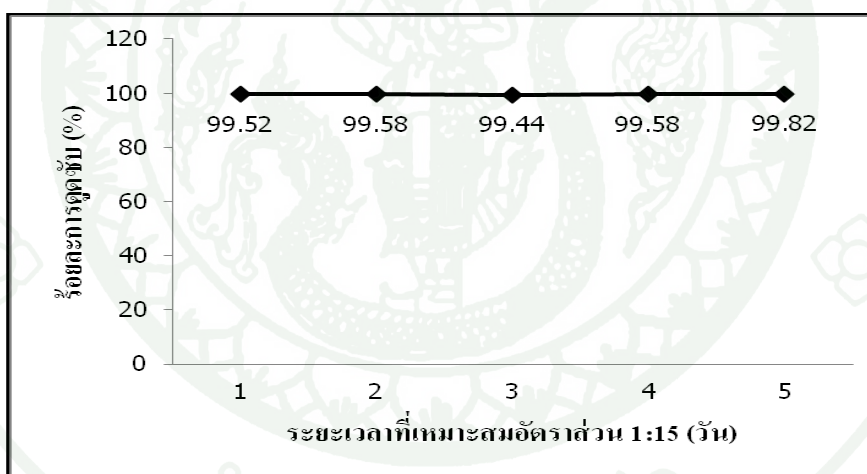
ภาพที่ 29 อัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์:ดิน กับร้อยละการดูดซับสีข้อม

3.7 ศึกษาอิทธิพลระยะเวลาที่เหมาะสมอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์:ดิน

จากการทดลองในข้อ 4.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ โดยแปรผันเวลาเป็นชั่วโมงคือ 1, 2, 3, 4, 5, 6 ชั่วโมง และแปรผันเวลาเป็นวันคือ 1, 2, 3, 4, 5 วัน พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมที่เวลาต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 99% แสดงว่าระยะเวลาการดูดซับไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม



ภาพที่ 30 ระยะเวลาชั่วโมงกับร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์: ดิน (อัตราส่วน 1: 15)



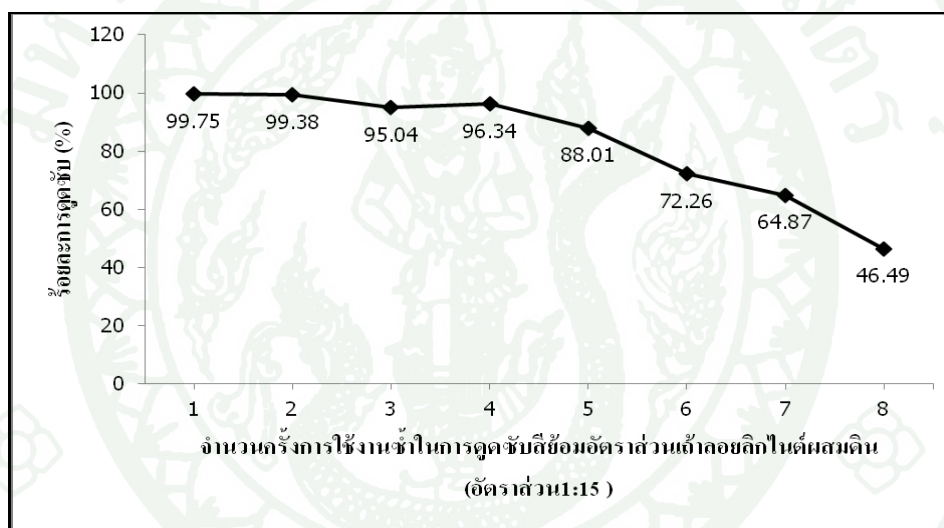
ภาพที่ 31 ระยะเวลาวันกับร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์: ดิน (อัตราส่วน 1: 15)

3.8 ศึกษาอายุการใช้งานซ้ำของตัวดูดซับเถ้าลอยลิกไนต์: ดิน

จากการทดลองในข้อ 5.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ระยะเวลาที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 5.3.2 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 3 ชั่วโมงและตั้งทิ้งไว้ 5 วัน กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน

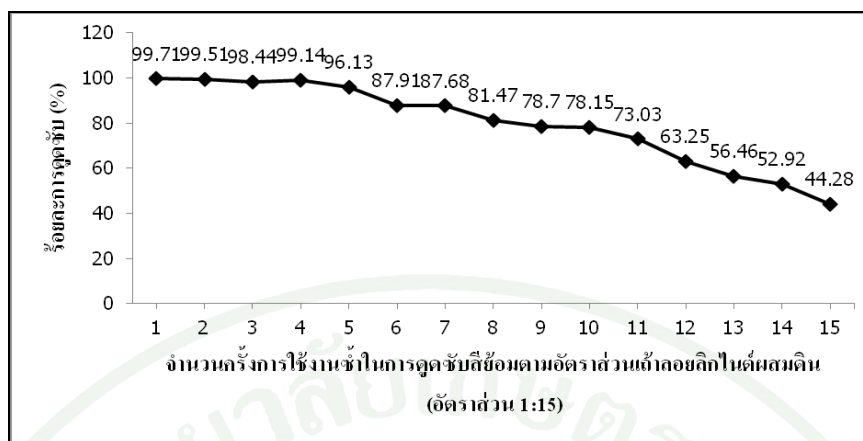
ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม ทำการทดลองซ้ำต่อเนื่อง จนกว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมผสมลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ มีผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมได้ทั้ง 9 ชนิด (Yellow LS-RN, Yellow LS-4G, Orange LSB, Red LS-BN, Blue LS-3R, Black G, Navy LS-G, Turquoise H-GH และ Br.Blue G) ที่ผ่านการใช้งาน พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมผสมลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานครั้งแรก โดยพบว่าการใช้งานครั้งแรกอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์และผสมดินมี ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีข้อมผสมในครั้งที่ 1 ร้อยละ 99.75 และประสิทธิภาพการดูดซับลดลง 50%เมื่อใช้จนครั้งที่ 8 ลดลงเหลือร้อยละ 46.49 ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 จำนวนครั้งการใช้งานซ้ำกับร้อยละที่ใช้ในการดูดซับสีข้อมของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน

จากการทดลองพบว่า จำนวนครั้งที่ใช้ในการดูดซับสีข้อมด้วยอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมได้ทั้ง 9 ชนิด ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 5 วัน พบว่า อัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งครั้งที่ 15 เป็นเวลา 75 วัน ดังภาพที่ 33 ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ คือเท่ากับร้อยละ 44.28 ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ในระบบบำบัดห้วยการองน้ำเสีย ควรมีการเปลี่ยนตัวดูดซับเมื่ออายุการใช้งานทุกๆ 15 ครั้ง



ภาพที่ 33 จำนวนครั้งการใช้งานซ้ำกับร้อยละที่ใช้ในการตรวจวัดสี่ข้อมของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน

4. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ และวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ในวันที่ 14 กันยายน พ.ศ.2555 ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

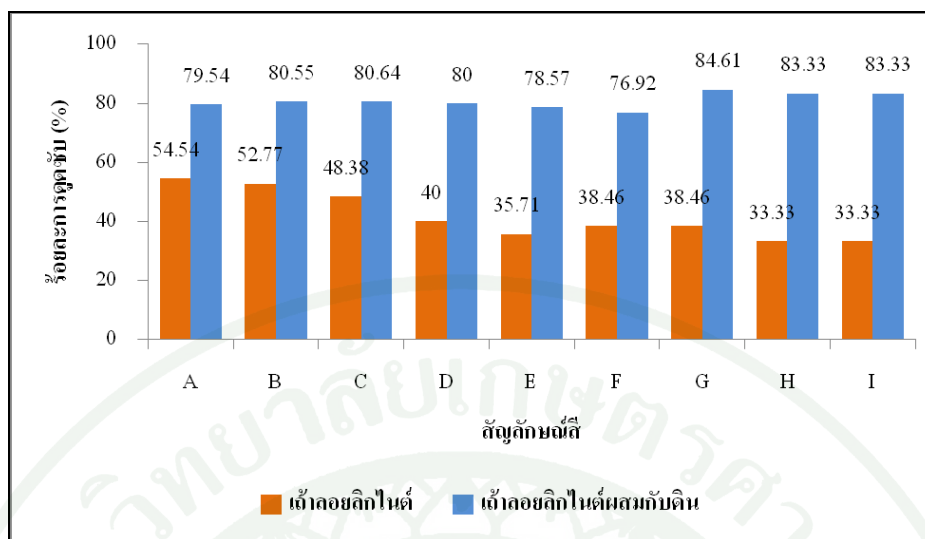
พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า
พีเอช	5.5-9.0	9.3
ความขุ่น (NTU)	-	46.3
EC (ms/cm)	-	108
ความเค็ม	-	1.9
TDS (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	165,480
TS (mg/l)	ไม่เกิน 300	166,000
TSS (mg/l)	ไม่เกิน 50	520
ซีโอดี (mg/l)	ไม่เกิน 120	809.6
บีโอดี (mg/l)	ไม่เกิน 20	40.43
ไขมันและน้ำมัน(mg/l)	ไม่เกิน 5	0.022

ตารางที่ 8 ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

ชนิดสีย้อม	ความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Yellow LS-RN	3.202
Yellow LS-4G	0.032
Orange LSB	3.345
Red LS-BN	0.093
Blue LS-3R	0.194
Black G	1.448
Navy LS-G	1.106
Turquoise H-GH	-0.086
Br.Blue G	-1.127

5. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง หลังผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก โดยการทดลองแบบแบตช์

จากการทดลองเมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมแล้ว นำสภาวะที่ได้มาทดลองกับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง พบว่า ถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกสามารถดูดซับสีย้อมได้ทั้ง 9 ชนิด ดังภาพที่ 34 และให้ร้อยละการดูดซับดังนี้ 54.54และ79.54 (Yellow LS-RN), 52.77และ80.55 (Yellow LS-4G), 48.38และ80.64 (Orange LSB), 40.00และ80.00 (Red LS-BN), 35.71และ78.57 (Blue LS-3R), 38.46และ76.92(Black G), 38.46และ84.61 (Navy LS-G), 33.33และ83.33 (Turquoise H-GH) และ 33.33และ83.33 (Br.Blue G)ตามลำดับ และพบว่าถ้ำลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้น้อยกว่าถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน อาจเนื่องมาจากสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในน้ำเสียไปรบกวนการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อการดูดซับสีย้อมซึ่งมีค่าการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าออยตุง คิดเป็นร้อยละ 45.84 ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่ลดลงจากการศึกษาด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากในน้ำทิ้งมีมลสารอื่นที่ถูกดูดซับได้ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ และเมื่อนำถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินร้อยละการดูดซับสีย้อมลดลงเพียงเล็กน้อยเป็นร้อยละ 80.83 เนื่องจากดินมีความสามารถดูดซับสีย้อมได้ด้วย ดังตารางที่ 9



ภาพที่ 34 เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง โดยใช้เม็ดลอยลิกไนต์และเม็ดลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมน้ำเสียดังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าออยตุง

ประเภทน้ำ	เม็ดลอยลิกไนต์	เม็ดลอยลิกไนต์ผสมดิน
น้ำเสียดังเคราะห์	99.41	98.19
น้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าออยตุง	45.84	80.83

จากตารางที่ 10 พบว่าน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง หลังผ่านการดูดซับด้วยเม็ดลอยลิกไนต์สามารถบำบัดมลสารอื่นได้ดังนี้ ความขุ่น 24%, ของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TDS) 57.11%, ของแข็งทั้งหมด (TS) 55.42%, COD 61.40% และ BOD 23.69% ส่วนตัวดูดซับเม็ดลอยลิกไนต์ผสมดินสามารถบำบัดมลสารอื่นได้ดังนี้ ความขุ่น 23.4%, ของแวนลอยทั้งหมด (TSS) 19.23%, COD 67.21% และ BOD 22.45% แต่ไม่สามารถบำบัดของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TDS) และของแข็งทั้งหมดได้ (TS) เนื่องจากดินทำให้เกิดความขุ่น

ตารางที่ 10 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตง หลังการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน เพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำที่งก่อนดูดซับ	ถ้ำลอยลิกไนต์		ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน	
		คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ
		หลังการดูดซับ	การดูดซับ (ร้อยละ)	หลังการดูดซับ	การดูดซับ (ร้อยละ)
พีเอช	9.3	9.3	-	9.3	-
ความขุ่น (NTU)	46.3	24.0	-	23.4	-
EC (ms/cm)	108	4.3	96.01	4.6	95.74
ความเค็ม	1.9	2.2	-	2.4	-
TDS (mg/l)	165,480	70,960	57.11	319,580	-
TS (mg/l)	166,000	74,000	55.42	320,000	-
TSS (mg/l)	520	30,400	-	420	19.23
COD (mg/l)	809.6	312.48	61.40	265.44	67.21
BOD (mg/l)	40.43	30.85	23.69	31.35	22.45
ไขมันและน้ำมัน (mg/l)	0.022	2.1	-	0.31	-

6. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้ซ้ำในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียดังเคราะห์โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน โดยวิธีการไหลต่อเนื่อง

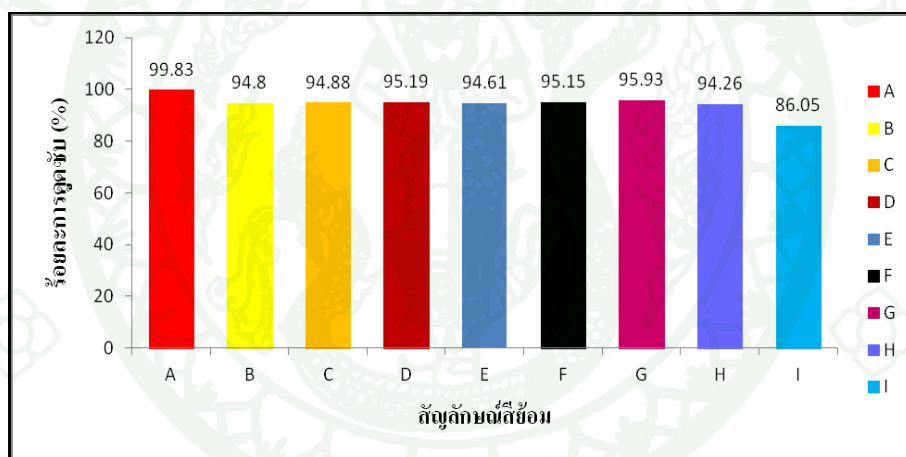
6.1 ศึกษาการเก็บตัวอย่างหลังผ่านคอลัมน์ทุก 3 ชั่วโมง

จากการทดลองในข้อ 5.2 ได้ผ่านน้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 450 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุกรวด 9.6 เซนติเมตร, ทราฮายาบ 4.2 เซนติเมตร, ทราฮะเอียด 2.8 เซนติเมตร และชั้นของถ้ำลอยลิกไนต์กับดิน อัตราส่วน 1: 15 การทดลองในข้อ 6.1 ได้ผ่านน้ำเสียดังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 450 มิลลิลิตร

จากการทดลองพบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ทั้ง 9 ชนิด มีการเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ทุกๆ 3 ชั่วโมง พบว่าอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดิน มีประสิทธิภาพในการใช้งานซ้ำประมาณ 40 ครั้ง ซึ่งทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือหลังการดูดซับเหลือเพียง 0.025 มิลลิกรัม/ลิตร หรือประสิทธิภาพการดูดซับลดลง 80%

6.2 ศึกษาการเก็บตัวอย่างหลังผ่านคอลัมน์ โดยการแช่ขัง 5 วัน

จากการทดลองในข้อ 5.3 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 450 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 7 บรรจุตัวดูดซับเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินในอัตราส่วน 1: 15 ใสในคอลัมน์ จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ลงในคอลัมน์ แช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยแห้ง 2 วัน เพื่อเป็นการจำลองระบบบำบัดแบบหมุนำกรองน้ำเสียแล้วเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 35

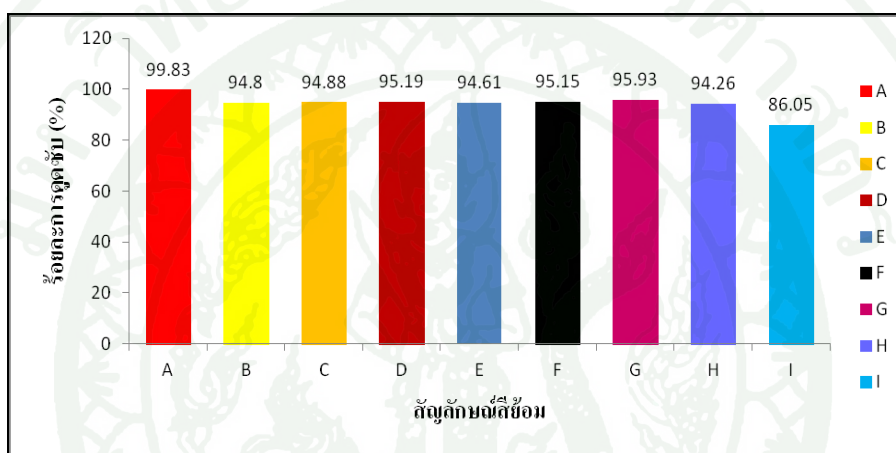


ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมจากเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการไหลต่อเนื่อง

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยตัวดูดซับเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกจะมีค่าการดูดซับสีย้อมแต่ละสี ดังนี้ Yellow LS-RN 93.83%, Yellow LS-4G 94.80%, Orange LSB 94.88%, Red LS-BN 95.19%, Blue LS-3R 94.61%, Black G 95.15%, Navy LS-G 95.93%, Turquoise H-GH 94.26% และ Br.Blue G 86.05% และคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 93.85

7. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน โดยวิธีการไหลต่อเนื่อง

จากการทดลองข้อ 6 ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าปริมาตร 450 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 7 บรรจุตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินในอัตราส่วน 1: 15 ใส่น้ำในคอลัมน์ จากนั้นเติมน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าลงในคอลัมน์ แช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยแห้ง 2 วัน เพื่อจำลองระบบบำบัดแบบหมุนเวียนน้ำเสียแล้วเก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 36



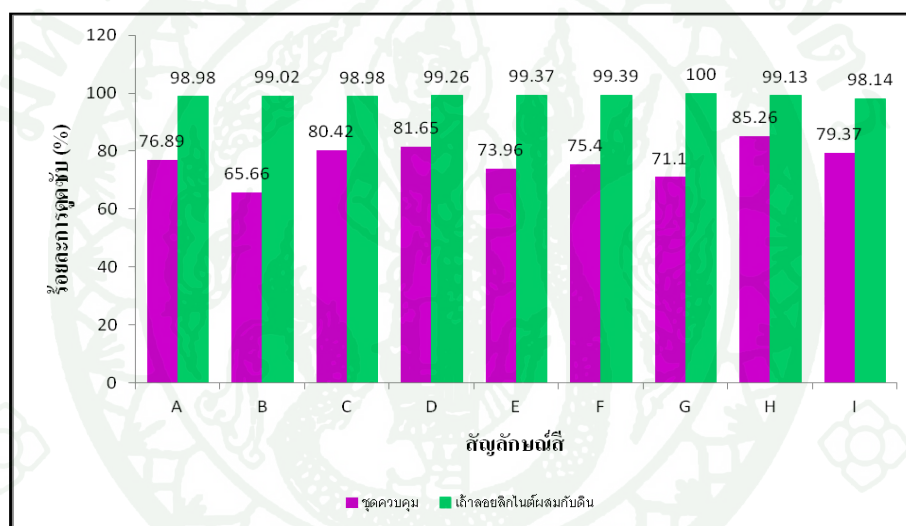
ภาพที่ 36 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมจากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน ในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โดยวิธีการไหลต่อเนื่อง

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินแบบไหลต่อเนื่องสามารถบำบัดสีย้อมแต่ละสี ดังนี้ Yellow LS-RN 98.83%, Yellow LS-4G 98.24%, Orange LSB 99.01%, Red LS-BN 94.44%, Blue LS-3R 96.58%, Black G 97.77%, Navy LS-G 97.61%, Turquoise H-GH 97.43% และ Br.Blue G 97.43% และคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 97.48

8. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูก

8.1 ภาวะปลูกรูปถ่าย

จากการทดลองในข้อ 7 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 20 ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 7 บรรจุน้ำเพียงอย่างเดียว (Controls) และตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินในอัตราส่วน 1: 15 ใส่ในกระบะปลูกที่ปลูกรูปถ่าย จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ลงในกระบะปลูก แช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยให้แห้ง 2 วัน แล้วเก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 37

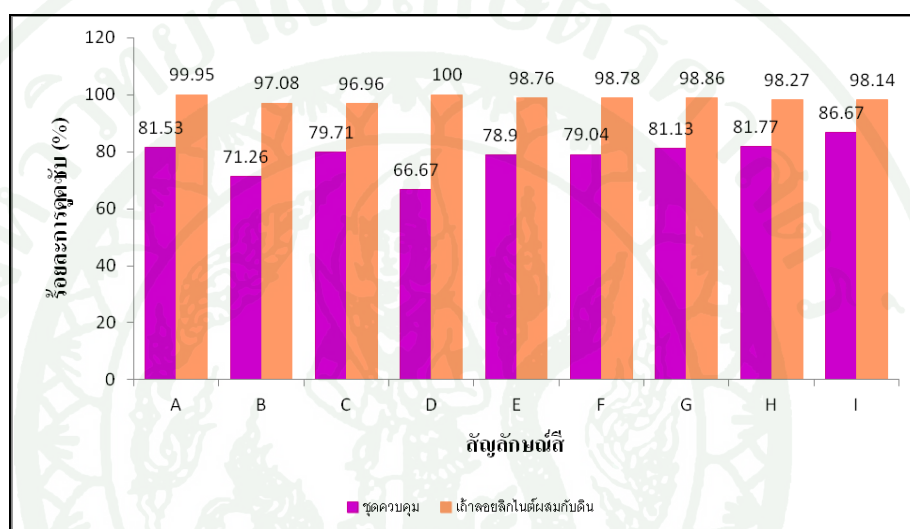


ภาพที่ 37 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กบำบัดสีย้อมในกระบะปลูกรูปถ่าย โดยใช้ชุดควบคุมและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยชุดควบคุมและตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูกในกระบะปลูกรูปถ่ายสามารถบำบัดสีย้อม ได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 76.89% และ 93.98% (Yellow LS-RN), 65.66% และ 99.02% (Yellow LS-4G), 80.42% และ 98.98% (Orange LSB), 81.65% และ 99.26% (Red LS-BN), 73.96% และ 99.37% (Blue LS-3R), 75.40% และ 100.00% (Black G), 71.10% และ 99.31% (Navy LS-G), 85.26% และ 99.14% (Turquoise H-GH) และ 79.37% และ 86.05% (Br.Blue G) ตามลำดับ และคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 76.63 และ 99.14

8.2 กระบะปลูกหญ้าแฝก

จากการทดลองในข้อ 7 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 20 ลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 7 บรรจุนดินเพียงอย่างเดียว (Controls) และตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินในอัตราส่วน 1: 15 ใส่ในกระบะปลูกที่ปลูกหญ้าแฝก จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ลงในกระบะปลูก แช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยให้แห้ง 2 วัน แล้วเก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กบำบัดสีข้อมในกระบะปลูกหญ้าแฝก โดยใช้ชุดควบคุมและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยชุดควบคุมและตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูกในกระบะปลูกหญ้าแฝก สามารถบำบัดสีข้อม ได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 81.53% และ 95.95 % (Yellow LS-RN), 71.26% และ 97.08% (Yellow LS-4G), 79.71% และ 96.96% (Orange LSB), 66.67% และ 100.00% (Red LS-BN), 78.90% และ 98.76% (Blue LS-3R), 79.04% และ 98.78% (Black G), 81.13% และ 98.86% (Navy LS-G), 81.77% และ 98.27% (Turquoise H-GH) และ 86.67% และ 98.14% (Br.Blue G) ตามลำดับ และคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 69.50 และ 98.08

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์(สารละลายมาตรฐานสี ย้อมผสมเข้มข้นสีละ 10 มิลลิกรัม/ลิตร)และน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดอง ด้วยตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ อัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์กับดิน และไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยทำการทดลองแบบเบดซ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อม 9 ชนิด(Yellow LS-RN, Yellow LS-4G, Orange LSB, Red LS-BN, Blue LS-3R, Black G, Navy LS-G, Turquoise H-GH และ Br.Blue G) แต่ละชนิดเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พบว่าถ้ำลอยลิกไนต์ 2 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่สภาวะ พีเอช 7 และระยะเวลาการดูดซับ 4 ชั่วโมง ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยของสีย้อม 9 ชนิดเท่ากับ 91.56 และให้ร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดดังนี้ Yellow LS-RN 94.21%, Yellow LS-4G 95.72%, Orange LSB 94.54%, Red LS-BN 93.81%, Blue LS-3R 97.91%, Black G 92.00%, Navy LS-G 98.31%, Turquoise H-GH 95.34%และBr.Blue G 91.56% และพบว่าไม่เกิดการคายซับหลังจากเวลาผ่านไป 5 วัน

อัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์และดินที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาแบบเบดซ์ เท่ากับ 1:15 ให้ประสิทธิภาพกำจัดสีที่ดีที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 99.54 โดยแต่ละสีมีร้อยละการดูดซับดังนี้ Yellow LS-RN 99.49%, Yellow LS-4G 99.00%, Orange LSB 98.94%, Red LS-BN 100.00%, Blue LS-3R 100.00%, Black G 99.46%, Navy LS-G 100.00%, Turquoise H-GH 100.00%และBr.Blue G 99.05% ภายใต้สภาวะพีเอช 7 และระยะเวลาดูดซับ 3 ชั่วโมง และไม่มีการคายซับหลังจากเวลาผ่านไป 5 วัน

เมื่อทดลองบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดอง ด้วยวิธีแบบเบดซ์ พบว่า ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ สามารถบำบัดสีย้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 45.84 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง เนื่องจากในน้ำทิ้งมีมลสารอื่นที่ถูกดูดซับได้ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ และสามารถบำบัดมลสารอื่นได้ดังนี้ ความขุ่น 24.0%, ของแข็งที่ละลายน้ำได้(TDS) 57.11%, ของแข็งทั้งหมด(TS) 55.42%, COD 61.40% และ BOD 23.69% ส่วนตัวดูดซับอัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์และดิน สามารถบำบัดสีย้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 80.83 และสามารถบำบัดมลสารอื่นได้ดังนี้ ความขุ่น 23.4%, ของแขวนลอยทั้งหมด(TSS)

19.23%, COD 67.21% และ BOD 22.45 แต่ไม่สามารถบำบัดของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TDS) และของแข็งทั้งหมดได้ (TS) เนื่องจากดินทำให้เกิดความขุ่น

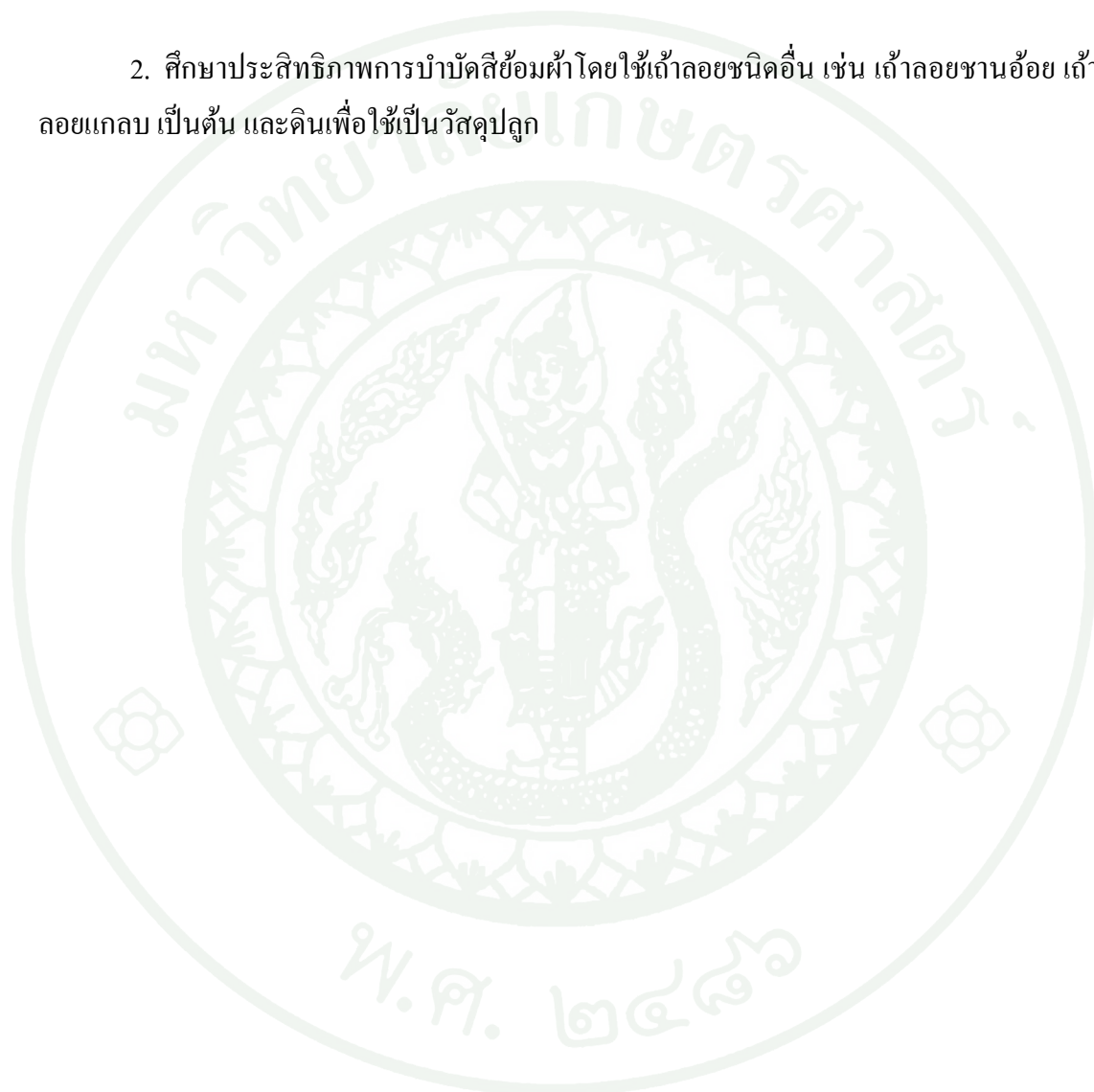
จากการทดลองแบบคอลัมน์ในการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน สามารถบำบัดสีข้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 93.85 และให้ร้อยละการดูดซับสีข้อมแต่ละสี ดังนี้ Yellow LS-RN 93.83%, Yellow LS-4G 94.80%, Orange LSB 94.88%, Red LS-BN 95.19%, Blue LS-3R 94.61%, Black G 95.15%, Navy LS-G 95.93%, Turquoise H-GH 94.26% และ Br.Blue G 86.05% ส่วนการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าสามารถบำบัดสีข้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 97.48 และให้ร้อยละการบำบัดสีข้อมแต่ละสี ดังนี้ Yellow LS-RN 98.83%, Yellow LS-4G 98.24%, Orange LSB 99.01%, Red LS-BN 94.44%, Blue LS-3R 96.58%, Black G 97.77%, Navy LS-G 97.61%, Turquoise H-GH 97.43% และ Br.Blue G 97.43%

การทดลองจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบหมุนเวียนน้ำเสียโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ทำการทดลองในกระบอกปลุกขนาด 51×51×54 ซม. ที่บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ทราฮายาบ 3 เซนติเมตร ทราลอะเยียด 2 เซนติเมตร ด้วยชุดควบคุมและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วน 1: 15 ในกระบอกปลุกรูปทรงแฉวย แบบจำลองระบบหมุนเวียนน้ำเสีย สามารถบำบัดสีข้อมได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 76.89% และ 93.98% (Yellow LS-RN), 65.66% และ 99.02% (Yellow LS-4G), 80.42% และ 98.98% (Orange LSB), 81.65% และ 99.26% (Red LS-BN), 73.96% และ 99.37% (Blue LS-3R), 75.40% และ 100.00% (Black G), 71.10% และ 99.31% (Navy LS-G), 85.26% และ 99.14% (Turquoise H-GH) และ 79.37% และ 86.05% (Br.Blue G) ตามลำดับ และคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 76.63 และ 99.14 ในกระบอกปลุกหญาแฝกสามารถบำบัดสีข้อมได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 76.89% และ 93.98% (Yellow LS-RN), 65.66% และ 99.02% (Yellow LS-4G), 80.42% และ 98.98% (Orange LSB), 81.65% และ 99.26% (Red LS-BN), 73.96% และ 99.37% (Blue LS-3R), 75.40% และ 100.00% (Black G), 71.10% และ 99.31% (Navy LS-G), 85.26% และ 99.14% (Turquoise H-GH) และ 79.37% และ 86.05% (Br.Blue G) ตามลำดับ และคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 76.63 และ 99.14

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ถ้ำลอยลิกไนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุปลูกสามารถบำบัดสีข้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถประยุกต์ใช้กับน้ำเสียประเภทอื่นได้

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าลอยลิกไนต์ในการบำบัดค่าพารามิเตอร์ เช่น ค่าซีโอดี และค่าบีโอดี เป็นต้น
2. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าโดยใช้เถ้าลอยชนิดอื่น เช่น เถ้าลอยชานอ้อย เถ้าลอยแกลบ เป็นต้น และดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2545. **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ**. กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

จินตนา จุลอุล. 2550. การเตรียมตัวดูซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีข้อมไ้ไ้เร็กท์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกข้อมสิ่งทอ **วารสารสิ่งแวดล้อม** 49 (11): 18-20

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. **นำ้หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2536. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกข้อม **วารสาร TTIS Textile Digest** 45 (1) : 20-21.

นันทยา ยานูเมศ. 2537. ความเป็นพิษและมลพิษของสีข้อมและสารเคมีที่ใช้อุตสาหกรรมสิ่งทอ. **วารสารคัลเลอร์เวอร์** 1(6): 27-41.

ม.ล. วิจิตต์ อัจฉรา สรรพกิจจานง, ธนศักดิ์ ใ้ไฟกระโทก และบุญเลิศ พัดฉวี. 2536. **เฝ้าอยู่ในงานทางรายงานฉบับที่ วพ.131**, ศูนย์วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

รุ่งนภา สุขสว่าง. 2550.. **การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและการประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีข้อมและโลหะหนักในน้ำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วรวิมล มัชฌันต์, โสภกา วิศิษฐ์ศักดิ์ และ โจเซฟ เคดารี . ม.ป.ป. **การเพิ่มประสิทธิภาพบดสีดินดิบด้านการรับแรงด้วยปูนขาวและเถ้าปาล์มน้ำมัน**. แหล่งที่มา:

http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupEconomic/43-Worawut_mat/template.html,
18 ตุลาคม 2554.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2547. ระบบหลุมกรองน้ำเสีย. การประชุม
วิชาการ ครั้งที่14. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

อดิศักดิ์ อัญชลิสังกาศ. 2546. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทราย
แบบกรองซ้ำร่วมกับการดูดซับด้วยเถ้าแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัจฉราพร ไกตะสูต. 2527. คู่มือการย้อมสี. เทคนิค 19 การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

APHA, AWWA and WPCR. 1992. **Standard Methods for the Examination of Water
and Wastewater**. 18th ed., American Public Health Assoc., Wash. D. E., United State
America.

Leechart, P., W. Nakbanpote and P. Thinavetyan . 2009. **Application of ‘waste’ wood-shaving
bottom ash for adsorption of azo reactive**

Santhy and Selvapathy. 2006. Removal of reactive Dyesss from wastewater by adsorption on
coir pith activated carbon. **Bioresource Technology** 97: 1329-1336.

Sunstorm, D. W. and H. B. Klei. 1979. **Wastewater Treatment**. Department of chemical
engineering the university of Connecticut. Prince-Hall, America.



ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมของถ้ำลอยลิกไนต์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	C_0	C	V(L)	q	1/q	1/C	log q	log C
0.5	10	0.138	0.005	0.99	1.014	7.246	-0.006	-0.860
1	10	-0.008	0.005	0.50	1.984	-12.50	-0.298	0.00
2	10	-0.154	0.005	0.25	3.939	-6.494	-0.595	0.00
3	10	-0.152	0.005	0.17	5.910	-6.579	-0.772	0.00
4	10	-0.149	0.005	0.13	7.883	-6.711	-0.897	0.00
5	10	-0.155	0.005	0.13	9.847	-6.452	-0.993	0.00

ตารางผนวกที่ 2 อิทธิพลของปริมาณเริ่มต้นต่อร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วย

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์
0.5	82.45
1	95.76
2	99.32
3	99.23
4	99.15
5	94.06

ตารางผนวกที่ 3 อิทธิพลพีเอชกับร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์

พีเอช	ร้อยละการดูดซับสี่ข้อมด้วยถ้ำลอยลิกไนต์
5	98.48
6	99.05
7	98.74
8	98.79
9	98.42

ตารางผนวกที่ 4 อิทธิพลระยะเวลาชั่วโมงกับร้อยละการดูดซับสีด้วยถ้ำลอยลิกไนต์

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการดูดซับสีด้วยถ้ำลอยลิกไนต์
1	97.94
2	99.37
3	99.04
4	99.41
5	99.09
6	98.67

ตารางผนวกที่ 5 อิทธิพลระยะเวลาดำเนินการกับร้อยละการดูดซับสีด้วยถ้ำลอยลิกไนต์

ระยะเวลา (วัน)	ร้อยละการดูดซับสีด้วยถ้ำลอยลิกไนต์
1	99.64
2	98.95
3	99.71
4	99.84
5	98.94

ตารางผนวกที่ 6 อิทธิพลปริมาณดินกับร้อยละการดูดซับสีย้อม

ปริมาณดิน (กรัม)	ร้อยละการดูดซับสีย้อม
1	5.79
2	16.52
3	25.63
4	31.36
5	35.62
6	42.36
7	38.39
8	46.71
9	48.43
10	46.82
11	53.42
12	55.08
13	60.67
14	57.99

ตารางผนวกที่ 7 อิทธิพลอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน

อัตราส่วน	ร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์: ดิน
1:5	98.93
1:10	99.31
1:15	99.54
1:20	99.44
1:25	98.85

ตารางผนวกที่ 8 อิทธิพลระยะเวลาชั่วโมง ที่เหมาะสมอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการดูดซับสี้อมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน
1	99.55
2	99.63
3	99.77
4	98.19
5	99.43
6	99.19

ตารางผนวกที่ 9 อิทธิพลระยะเวลาวัน ที่เหมาะสมอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน

ระยะเวลา (วัน)	ร้อยละการดูดซับสี้อมด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน
1	99.52
2	99.58
3	99.44
4	99.58
5	99.82

ตารางผนวกที่ 10 ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในการดูดซับของตัวดูดซับเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน

จำนวนครั้งที่ใช้ในการดูดซับของตัวดูดซับ เถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน (ชั่วโมง)	ร้อยละการดูดซับสี้อมด้วย เถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน
1	97.75
2	99.38
3	95.04
4	96.34
5	88.01
6	72.26
7	64.87
8	46.49

ตารางผนวกที่ 11 อิทธิพลการใช้งานซ้ำในการดูซ้ำของตัวดูซ้ำแต่ละรายที่ได้ออกมาในครั้ง: ดิน

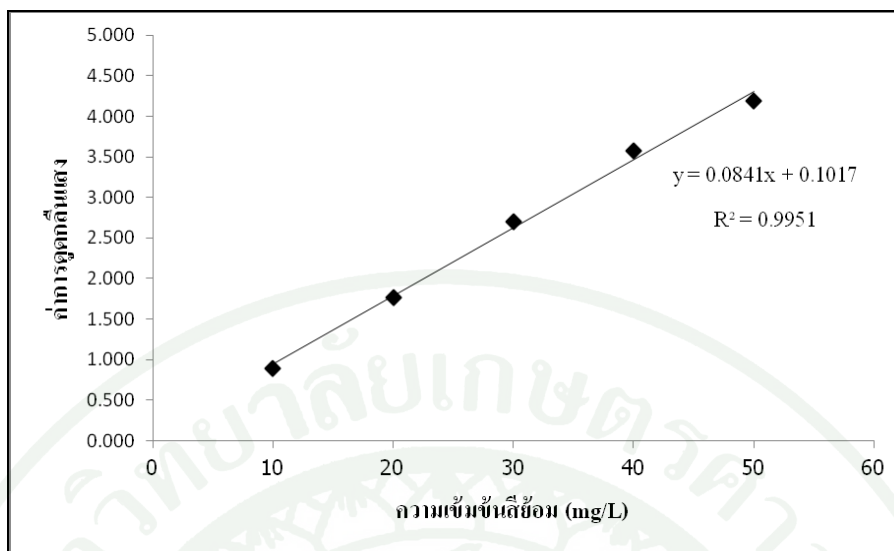
จำนวนครั้งที่ใช้ในการดูซ้ำของตัวดูซ้ำ แต่ละรายที่ได้ออกมาในครั้ง: ดิน (วัน)	ร้อยละการดูซ้ำที่ย้อมด้วย แต่ละรายที่ได้ออกมาในครั้ง: ดิน
1	99.71
2	99.51
3	98.44
4	99.14
5	96.13
6	87.91
7	87.68
8	81.47
9	78.70
10	78.15
11	78.70
12	63.25
13	56.46
14	52.96
15	44.28

ตารางผนวกที่ 12 อิทธิพลการใช้ซ้ำในการดูดซับสีข้อม โดยบรรจุคอลัมน์ด้วยตัวดูดซับเก่าลอย
 ลิกไนต์และดินเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก เก็บตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ทุก 3 ชั่วโมง

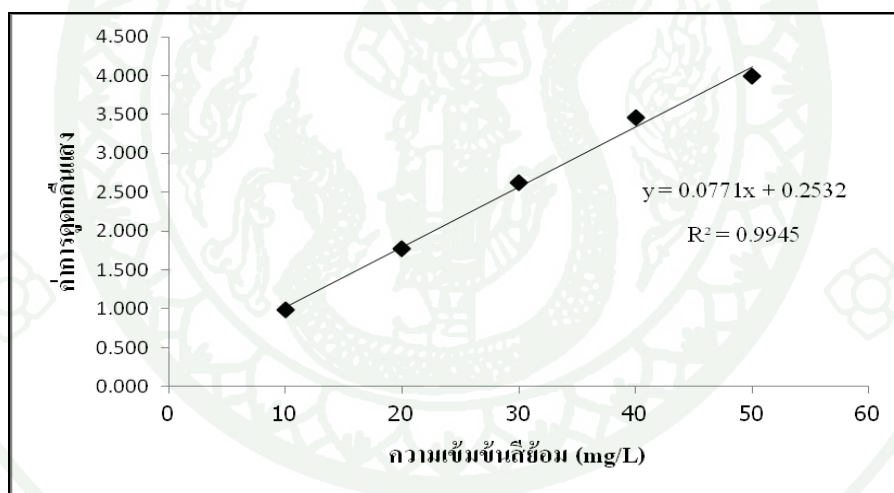
จำนวนครั้งที่ใช้ในการดูดซับสีข้อมทุก 3 ชั่วโมง	ปริมาณความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ (ppm.)
1	0.0083
2	0.002
3	0.0016
4	0.002
5	0.0025
6	0.0045
7	0.005
8	0.0058
9	0.0063
10	0.0077
11	0.0088
12	0.0095
13	0.0103
14	0.0126
5	0.0172
16	0.0194
17	0.0208
18	0.0215
19	0.0218
20	0.0222
21	0.0231
22	0.0235
23	0.0238
24	0.0241
25	0.0241
26	0.0245
27	0.025

ตารางผนวกที่ 12 (ต่อ)

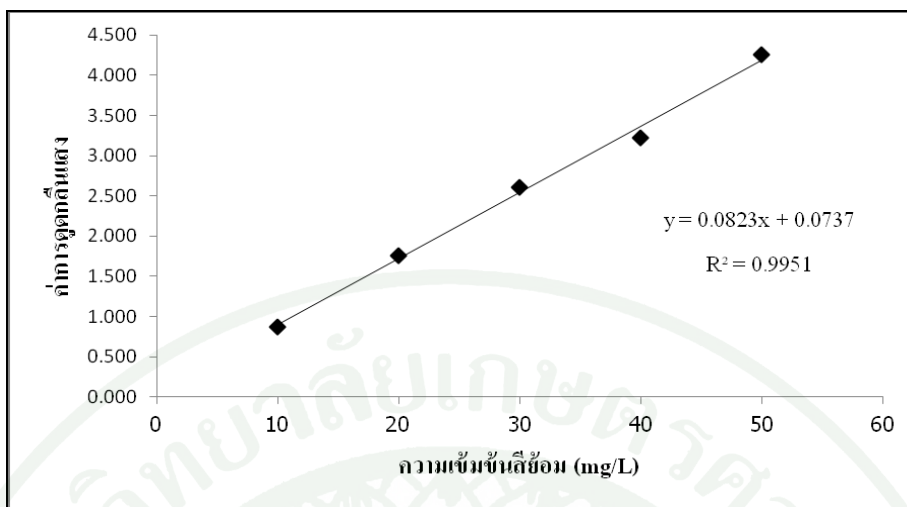
จำนวนครั้งที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมทุก 3 ชั่วโมง	ปริมาณความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับ (ppm.)
28	0.0255
29	0.0258
30	0.026
31	0.0265
32	0.0268
33	0.0267
34	0.0266
35	0.0266
37	0.0256
38	0.0258
39	0.0255
40	0.025



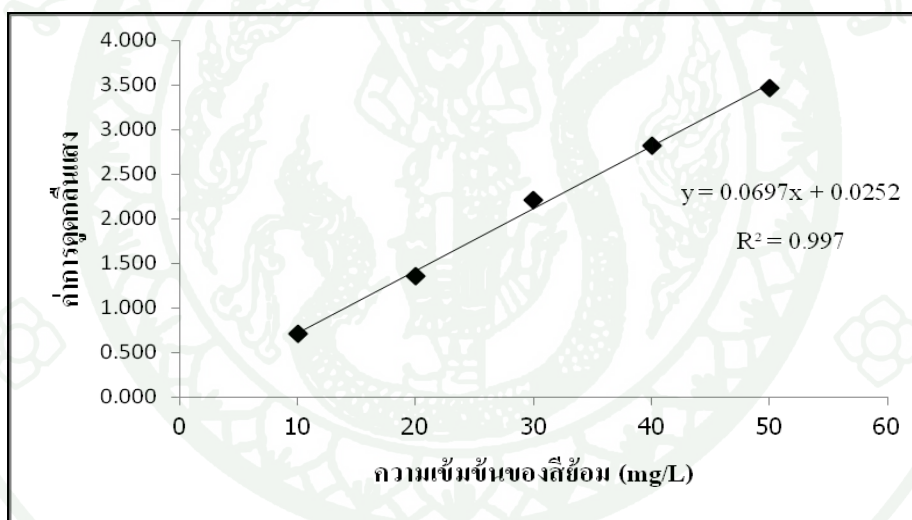
ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



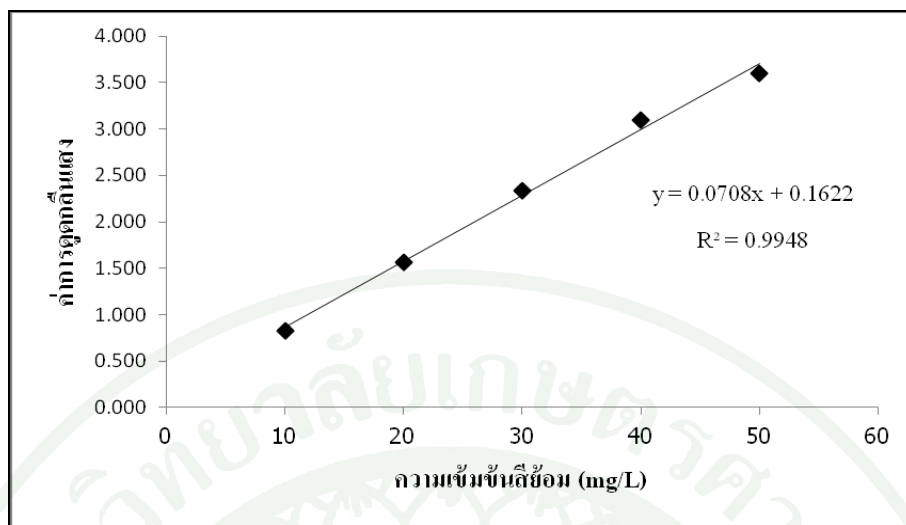
ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร



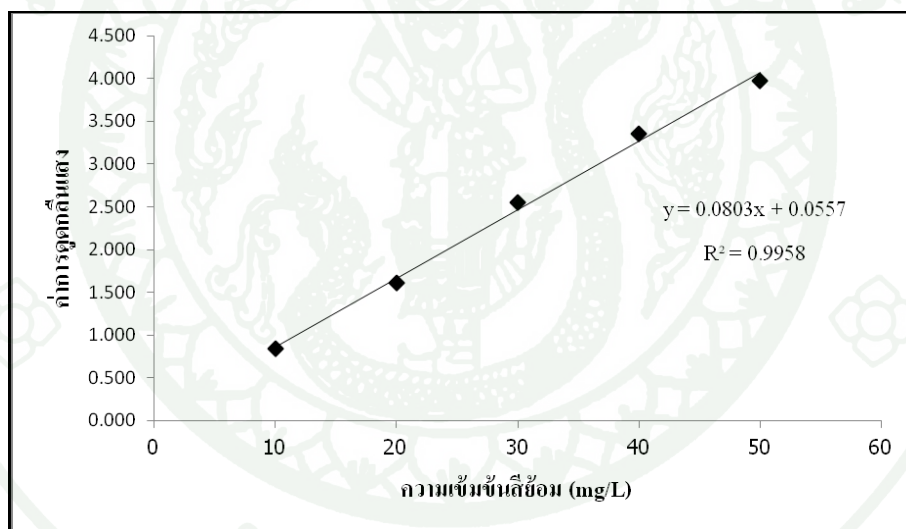
ภาพผนวกที่ 3 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร



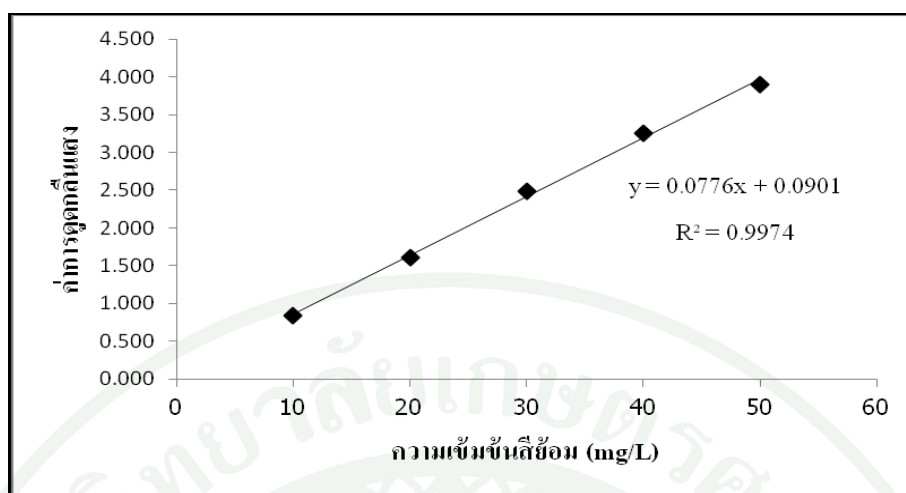
ภาพผนวกที่ 4 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร



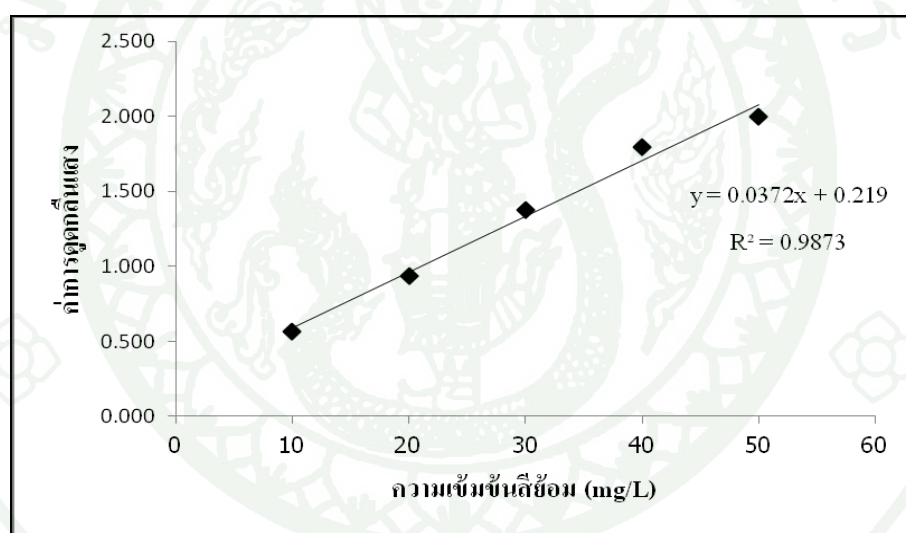
ภาพผนวกที่ 5 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร



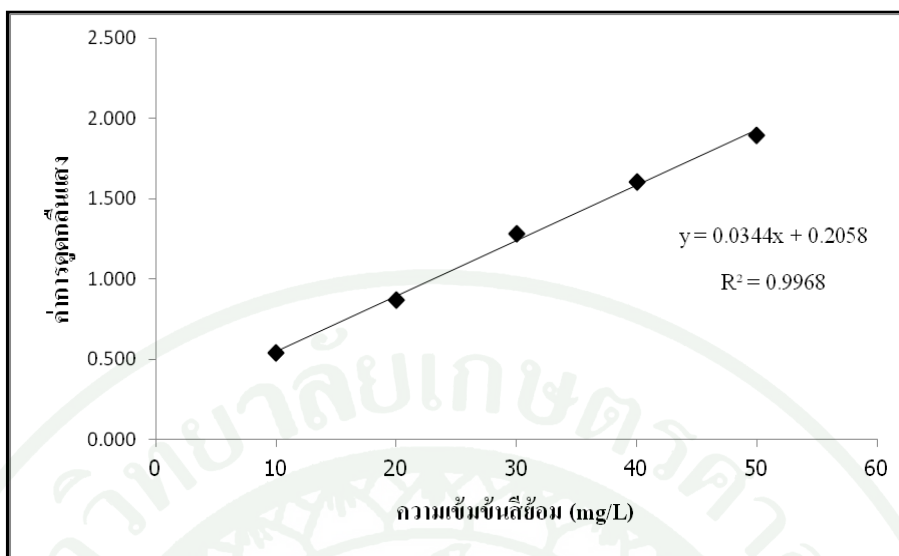
ภาพผนวกที่ 6 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 7 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 8 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 662 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 9 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวเสาวภาคย์ ผลเจริญ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	8 ตุลาคม 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ชีววิทยา) มหาวิทยาลัยนเรศวร พ.ศ. 2553
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-