



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....
วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย
 อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์
 และการประยุกต์ใช้ผงเมล็ดมะรุมในกระบวนการ โคแอกกูเลชัน

Comparision of Dyes Removal from Textile Wastewater from Doi Tung Development
Project between Moringa Seed Powder and Commercial Granular Activated Bituminous
Coal Based Carbon and The Application of Moringa Seed Powder on Coagulation

นามผู้วิจัย นางสาวฐิติรัตน์ ปิยะภาณุวัฒน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
(รองศาสตราจารย์กนิดา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

.....
(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ **เดือน** **พ.ศ.**

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิทูมินัสเชิงพาณิชย์
และการประยุกต์ใช้ผงเมล็ดมะรุมในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

Comparision of Dyes Removal from Textile Wastewater from Doi Tung Development Project
between Moringa Seed Powder and Commercial Granular Activated Bituminous Coal Based
Carbon and The Application of Moringa Seed Powder on Coagulation

โดย

นางสาวฐิติรัตน์ ปิยะภาณุวัฒน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

จิตรีรัตน์ ปิยะภาณุวัฒน์ 2555: การเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงาน
ย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วยผงเมล็ดมะรุมและ
ถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ และการประยุกต์ใช้ผงเมล็ดมะรุมในกระบวนการโคแอกกูเลชัน
ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม
วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณานุรักษ์,
วท.ม. 147 หน้า

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด
ในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง ด้วยผงจากเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์
โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งได้แก่ พีเอช (4.0-8.0) ความเร็วรอบการเขย่า (0-200 รอบ/นาที)
ระยะเวลาการเขย่า (15-120 นาที) ระยะเวลาสัมผัส (0-120 นาที) ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสม
(50 มิลลิกรัม/ลิตร) และปริมาณของตัวดูดซับ (1-7 กรัม) ผลการทดลองพบว่าผงจากเมล็ดมะรุมมี
ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 94.74 ภายใต้สภาวะที่พีเอช 7 ความเร็ว
รอบการเขย่า 100 รอบ/นาที ระยะเวลาการเขย่า 30 รอบ/นาที ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสม 30
มิลลิกรัม/ลิตร และปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ในขณะที่ถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพในการดูด
ซับสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด สูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 73.99 ภายใต้สภาวะที่ พีเอช 7 ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบ/
นาที ระยะเวลาการเขย่า 120 รอบ/นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสม
30 มิลลิกรัม/ลิตร และปริมาณตัวดูดซับ 7 กรัม กลไกการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดสอดคล้องกับ
สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าคอยตุง
ด้วยผงจากเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 46.49 และ 61.03 ตามลำดับ

การศึกษาระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้ผงเมล็ดมะรุมจำนวน 2 กรัม และ 5 กรัม ในการ
กำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสม และในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน
เนื่องมาจากพระราชดำริ พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมคิดเป็นร้อยละ 97.12 และ 56.51
ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อใช้ผงเมล็ดมะรุมจำนวน 20 กรัม และ 70 กรัม กำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อม
ผสมปริมาตร 20 ลิตร และในน้ำทิ้งปริมาตร 20 ลิตร จากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน
เนื่องมาจากพระราชดำริ ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสม คิด
เป็นร้อยละ 80.47 และพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการ
พัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ คิดเป็นร้อยละ 23.53 ตามลำดับ

Titirat Piyapanuwat 2012: Comparision of Dyes Removal from Textile Wastewater from Doi Tung Development Project between Moringa Seed Powder and Commercial Granular Activated Bituminous Coal Based Carbon and The Application of Moringa Seed Powder on Coagulation. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 147 pages.

The purpose of this research was the comparison in ability of wastewater treatment of nine dyes (6% Super Black G, 2% Turquoise H-GN, 2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 2% Orange LS-BR, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R and 2% Br.Blue LS-G). In textile wastewater from Doi Tung Development Project with the ingredient of Moringa seed powder and commercial granular activated bituminous coal based carbon by studying adsorption factors such as pH (4.0 – 8.0), shaking speed (0–200 rpm), shaking time (15–120 minutes), contact time (0–120 minutes), concentration of mixed standard dyes solution (50 mg/l) and adsorbent weight (1-7 g). The results demonstrated that the average highest efficiency of nine dyes in the mixture standard solution by at 94.74% under conditions pH 7, shaking speed 100 rpm, shaking time 30 minutes, and concentration of mixed standard dyes solution 30 mg/l and adsorbent weight 1 g, whereas at 73.99% adsorption by using commercial granular activated bituminous coal based carbon under conditions pH 7, shaking speed 50 rpm, shaking time 120 minutes, contact time 30 minutes and concentration of mixed standard dyes solution 30 mg/l and adsorbent weight 7 g. The adsorption mechanism of both adsorbents was conformed to the Langmuir isotherm equation. The removal performance of nine dyes in textile wastewater from Doi Tung by Moringa seed powder and commercial granular activated bituminous coal based carbon were 46.49% and 61.03%, respectively.

The coagulation process studies by using Moringa seed powder 2 g. and 5 g. for mixed stand dyes solution and textile wastewater from Doi Tung Development Project, respectively. The adsorption efficiency were 97.12% and 56.51 % respectively. In addition, in each of 20 L of mixed stand dyes solution and textile wastewater from Doi Tung Development Project have been removed 80.47% and 23.53% of dyes by using 20 g. and 70 g. of Moringa seed powder, respectively

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์คณิดา ตังคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ กรรมการร่วมที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการศึกษา วิจัย และทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ วาระรัมย์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ และ ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างสีย้อมผ้าสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อวีระพัฒน์ ปิยะพานูวัฒน์และคุณแม่พจนา ปิยะพานูวัฒน์ ที่ได้อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจเสมอมา รวมถึงขอขอบคุณพี่ๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 32 เพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 33 และตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ฐิติรัตน์ ปิยะพานูวัฒน์

ตุลาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	97
สรุป	97
ข้อเสนอแนะ	99
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	100
ภาคผนวก	102
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	147

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณค่าทางโภชนาการของส่วนต่างๆของมะรุม : 100 กรัม	4
2	ลักษณะจำเพาะของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	7
3	สีย้อม (Reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอตง 9 ชนิด และค่าความยาวคลื่นที่แต่ละสีดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด	50
4	อิทธิพลของปริมาณเริ่มต้นต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	66
5	อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	68
6	อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและ ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	69
7	อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและ ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	71
8	อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	73
9	อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีย้อมผสมต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	74
10	อิทธิพลของปริมาณต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	76
11	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดที่ 2 ที่เตรียมได้จากสารละลายสีย้อมผสม	81
12	สภาวะที่เหมาะสมของการการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ โดยการทดลองแบบเบตซ์	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
13	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ	83
14	ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอย ตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ	84
15	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิง พาณิชย์ในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ	85
16	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ ก่อนและหลังการดูดซับด้วยผงเมล็ดมะรุมและ ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	86
17	ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสี ย้อมในสารละลายสีย้อมผสม	88
18	ผลการศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมในสารละลายสี ย้อมผสม	89
19	ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสี ย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ	90
20	ผลการศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจาก โรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ	91
21	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ หลังการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการ โคแอก กูเลชัน โดยใช้วิธีจาร์เทสต์	92
22	ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสี ย้อมในสารละลายสีย้อมผสม โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสี ย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง	95
24	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ หลังการกำจัดสีย้อมโดยวิธีการประยุกต์ใช้ งานจริง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ	96
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (4, 5) กับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผง เมล็ดมะรุม	103
2	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผง เมล็ดมะรุม	104
3	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (4, 5) กับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่าน บิหมินัสเชิงพาณิชย์	105
4	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่าน บิหมินัสเชิงพาณิชย์	106
5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (0, 50) กับร้อยละการดูด ซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุม	107
6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (100, 150) กับร้อยละ การดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุม	108
7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (200) กับร้อยละการดูด ซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุม	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (0, 50) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	110
9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (100, 150) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	111
10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (200) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	112
11	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (15,30) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม	113
12	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (45,60) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม	114
13	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (75,90) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม	115
14	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (105,120) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม	116
15	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (15,30) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	117
16	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (45,60) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	118
17	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (75,90) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	119
18	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (105,120) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	120
19	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (0, 30) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (60, 90) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยผงเมล็ดมะรุม	122
21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (120) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยผงเมล็ดมะรุม	123
22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (0, 30) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	124
23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (60, 90) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	125
24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (120) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	126
25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสี่เหลี่ยมผสม (10, 20) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยผงเมล็ดมะรุม	127
26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสี่เหลี่ยมผสม (30,40) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยผงเมล็ดมะรุม	128
27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสี่เหลี่ยมผสม (50) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยผงเมล็ดมะรุม	129
28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสี่เหลี่ยมผสม (10, 20) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	130
29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสี่เหลี่ยมผสม (30, 40) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	131
30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสี่เหลี่ยมผสม (50) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	132
31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (1, 2) กับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยผงเมล็ดมะรุม	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (3, 4) กับร้อยละการดูดซับสีด้วย ผงเมล็ดมะรุม	134
33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (5, 6) กับร้อยละการดูดซับสีด้วย ผงเมล็ดมะรุม	135
34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีด้วย ผงเมล็ดมะรุม	136
35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (1, 2) กับร้อยละการดูดซับสีด้วย ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	137
36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (3, 4) กับร้อยละการดูดซับสีด้วย ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	138
37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (5, 6) กับร้อยละการดูดซับสีด้วย ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	139
38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีด้วย ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	140
39 ไอโซเทอร์มการดูดซับของผงเมล็ดมะรุม	141
40 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	142
41 ประสิทธิภาพของผงเมล็ดมะรุมในการดูดซับสีข้อมผ้าในน้ำเสีย สังเคราะห์ (7 ชั่วโมง)	143
42 ประสิทธิภาพของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีข้อมผ้าในน้ำ เสียสังเคราะห์ (7 ชั่วโมง)	144
43 ประสิทธิภาพของผงจากเมล็ดมะรุมในการดูดซับสีข้อมผ้าในน้ำทิ้งจาก โรงงานย้อมผ้า (7 ชั่วโมง)	145
44 ประสิทธิภาพของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีข้อมผ้าในน้ำ ทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า (7 ชั่วโมง)	146
45 ประสิทธิภาพของผงมะรุมในการประยุกต์ใช้จริงในการดูดซับสีข้อมใน น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยคอง อันเนื่องมาจาก พระราชดำริ	147

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	มะรุม (Moringa oleifera)	3
2	การจำแนกถ่านหินแต่ละประเภท	6
3	สูตรโครงสร้างของโครโมฟอร์และออกโซโครมของสีย้อม	9
4	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแอซิด	10
5	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิก	11
6	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีไคเร็กซ์	11
7	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอทีฟ	12
8	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีดิสเพิร์ส	12
9	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีอะโซอิก	13
10	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแว็ต	13
11	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีมอร์แดนท์	14
12	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีซัลเฟอร์	14
13	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	21
14	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	23
15	แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	23
16	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	24
17	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	25
18	ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ	26
19	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	29
20	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	32
21	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรูนดิช	33
22	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรูนดิช	34
23	กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียวเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m	35
25	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	37
26	สารเคมีช่วยตกตะกอนช่วยลดแรงผลักดันระหว่างอนุภาค	37
27	ลักษณะของโพลีอิเล็กโทรไลต์ช่วยจับอนุภาค และลักษณะการจับ ตัวการรวมตัวเมื่อใส่โพลีเมอร์	41
28	สูตรโครงสร้างของโพลีอิเล็กโทรไลต์และการปรากฏประจุไฟฟ้าของ โพลีอิเล็กโทรไลต์	42
29	สารละลายสี่ข้อมมาตรฐานแต่ละสี่ที่เตรียมได้	48
30	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสี่ข้อมในสารละลายสี่ข้อมผสมด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยวิธีจาร์เทสต์	54
31	อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดสี่ข้อมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง	56
32	ผงเมล็ดมะรุม	58
33	ถ่านบิทูมินัสเชิงพาณิชย์	59
34	กราฟมาตรฐานของสารละลายสี่ข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร	60
35	กราฟมาตรฐานของสารละลายสี่ข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร	60
36	กราฟมาตรฐานของสารละลายสี่ข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร	61
37	กราฟมาตรฐานของสารละลายสี่ข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร	61
38	กราฟมาตรฐานของสารละลายสี่ข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร	62
39	กราฟมาตรฐานของสารละลายสี่ข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร	63
41	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 662 นาโนเมตร	63
42	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร	64
43	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเริ่มต้นต่อร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	66
44	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	68
45	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	69
46	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	71
47	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุลกับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	72
48	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสมกับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	74
49	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	76
50	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีข้อมของแลงเมียร์ด้วยผงเมล็ดมะรุม	78
51	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีข้อมของฟรุณดิชด้วยผงเมล็ดมะรุม	78
52	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีข้อมของแลงเมียร์ด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	79
53	ไอโซเทอร์มการดูดซับสีข้อมของฟรุณดิชด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
54	เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับสีย้อม 9 ชนิด จากสารละลายสีย้อมผสมโดยใช้ผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์	80
55	เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริโดยใช้ผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์	85
56	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดโดยวิธีจาร์เทสต์	87 88
57	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการกำจัดโดยวิธีจาร์เทสต์	
58	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีจาร์เทสต์	89
59	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีจาร์เทสต์	90
60	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดสีย้อมในสารละลาย สีย้อมมาตรฐานผสม โดยวิธีการประยุกต์ใช้งาน	93
61	จริงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง	94

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)

การเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิทูมินัสเชิงพาณิชย์
และการประยุกต์ใช้ผงเมล็ดมะรุมในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

**Comparision of Dyes Removal from Textile Wastewater from Doi Tung
Development Project between Moringa Seed Powder and Commercial Granular
Activated Bituminous Coal Based Carbon and The Application
of Moringa Seed Powder on Coagulation**

คำนำ

น้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้า ก่อให้เกิดน้ำทิ้งปริมาณมากและบำบัดได้ยาก เนื่องจากเป็นน้ำทิ้งที่มี
ความเข้มข้นของสีย้อมสูง รวมทั้งมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เจือปนอยู่ในปริมาณมาก หาก
ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่มีการกำจัดความเข้มข้นของสีย้อมก่อน จะมีผลต่อการผ่านของ
แสงอาทิตย์ลงสู่ได้ผิวน้ำ ซึ่งจะขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นการ
ทำลายทัศนียภาพ ทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย แล้วยังอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ
ทั้งโดยตรงหรือโดยอ้อม อีกทั้งอาจทำให้ระบบนิเวศเสียสมดุลอีกด้วย

การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้ามีหลายวิธี เช่น การย่อยสลายโดยกระบวนการทาง
ชีววิทยา (biodegradation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) การออกซิเดชัน
(oxidation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นต้น ซึ่งแม้ว่าจะสามารถทำได้หลายวิธี แต่ก็
ยังคงประสบกับปัญหาในเรื่องค่าใช้จ่ายต้นทุนที่สูง ดังนั้น กระบวนการดูดซับ (adsorption) จึงเป็น
ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกมะรุม ซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพที่หาได้ง่าย อีกทั้ง
ยังเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ นำมาทดลองใช้เป็นตัวดูดซับและเปรียบเทียบ
ประสิทธิภาพการดูดซับกับการใช้ถ่านบิทูมินัสเชิงพาณิชย์ มาดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อม
มาตรฐานในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยฯ ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นแนว
ทางเลือกในการพัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งและสารมลพิษของโรงงานฟอกย้อม
อื่นๆต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับจากผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยคองอันเนื่องมาจากพระราชดำริ
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ของตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาโดยคอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
3. การประยุกต์ใช้ผงเมล็ดมะรุมในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การตรวจเอกสาร

1. มะรุม (*Moringa oleifera*)

1.1 ลักษณะของมะรุม

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Moringa oleifera* Lam.

วงศ์: Moringaceae

ชื่อสามัญ: Horse radish tree, Drumstick



ภาพที่ 1 มะรุม(*Moringa oleifera*)

ลักษณะ: เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง สูง 5-10 เมตร ใบประกอบแบบขนนก ชนิดที่แตกใบย่อย 3 ชั้น ยาว 20-40 เซนติเมตร ออกเรียงแบบสลับใบย่อยยาว 1-3 เซนติเมตร รูปไข่ปลายใบและฐานใบมนผิวในด้านล่างสีอ่อนกว่าและมีขนเล็กน้อย ใบย่อยยาวขนาดที่เป็นใบอ่อน ดอกเป็นช่อสีขาว ออกที่ซอกวงกลีบเลี้ยง มี 5 กลีบ กลีบดอก 5 กลีบแยกกัน ผลเป็นฝัก เปลือกสีเขียว มีส่วนคอดและส่วนมน เป็นระยะๆ ตามความยาวของฝัก เป็นเหลี่ยม ฝักยาว 20-50 เซนติเมตร เมล็ดเป็นรูปสามเหลี่ยม มีปีกบางหุ้ม 3 ปีก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร มะรุมเป็นไม้ที่ปลูกง่าย เจริญได้ดีในดินทุกชนิด ต้องการน้ำและความชื้นในปริมาณปานกลาง (สถาบันส่งเสริมการแพทย์แผนไทย มูลนิธิการแพทย์แผนไทยพัฒนา, 2547)

ส่วนประกอบ: มะรุมมีถิ่นกำเนิดในประเทศแถบเอเชียแต่ก็พบได้ทั่วไปใน และเขตร้อนของทวีปอเมริกา จากการศึกษาโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันพบว่า มะรุมเป็นหนึ่งในบรรดาพืชหลายๆชนิดที่มีสารจำพวก Polyelectrolyte อยู่ในเมล็ด ซึ่งสารดังกล่าวมีคุณสมบัติในการช่วยตกตะกอน จากการศึกษาคุณสมบัติของพืชในตระกูล Moringaceae พืชตระกูลนี้จะมี Moringa เป็น genus เพียง genus เดียวในตระกูลซึ่ง Moringa นี้มีอยู่ 14 species ซึ่งมีอยู่ 6 species ซึ่งให้สารตกตะกอนได้ดี ทั้ง 6 species ได้แก่ *M.Oleifera*, *M.peregrina*, *M.stenopetala*, *M.longituba*, *M.drouhardii* และ *M.ovalifolia* (ภัญญูทิศา, 2531)

สำหรับประเทศไทยมะรุมพื้นเมืองที่ปลูกโดยทั่วไปเป็นพวก *M.Oleifera* ซึ่งมีสายพันธุ์มาจากอินเดียแถบเทือกเขาหิมาลัย สามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกสภาพแวดล้อม จึงมีแนวโน้มที่จะนำมะรุมมาใช้เพื่อเป็นสารตกตะกอนและช่วยในการกำจัดน้ำเสีย และจากการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของใบมะรุมและฝักมะรุม โดยการนำฝักดิบ ใบ และผงใบแห้ง มาวิเคราะห์ จาก 100 กรัมของส่วนที่กินได้ พบว่ามีปริมาณธาตุอาหารต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของส่วนต่างๆของมะรุม : 100 กรัม

Nutritional Analysis	Pods	Leaves	Leaf Powder
Moisture (%)	86.9	75	7.5
Calories	26.0	92.0	205.0
Protein (g)	2.5	6.7	27.1
Fat (g)	0.1	1.7	2.3
Carbohydrate (g)	3.7	13.4	38.2

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Nutritional Analysis	Pods	Leaves	Leaf Powder
Fiber (g)	4.8	0.9	19.2
Minerals (g)	2.0	2.3	-
Calcium (mg)	30.0	440.0	2003.0
Magnesium (mg)	24.0	24.0	368.0
Phosphorous (mg)	110.0	70.0	204.0
Potassium (mg)	259.0	259.0	1324.0
Copper (mg)	3.1	1.1	0.6
Iron (mg)	5.3	0.7	28.2
Oxalic acid (mg)	10.0	101.0	0.0
Sulphur	137	137	870
Vitamin A - B carotene (mg)	0.1	6.8	16.3
Vitamin B – Choline (mg)	423.0	423.0	-
Vitamin B1 – Thiamin (mg)	0.05	0.21	2.6
Vitamin B2 – Riboflavin (mg)	0.07	0.05	20.5
Vitamin B3 – Nicotinic Acid (mg)	0.2	0.8	8.2
Vitamin C – Ascorbic Acid (mg)	120	220.0	17.3
Vitamin E – Tocopherols Acetate (mg)	-	-	113.0
Arginine (mg)	360	406.6	1325
Histidine (mg)	110	149.8	613
Lysine (mg)	150	342.4	1325
Tryptophan (mg)	80	107	425
Phenylalanine (mg)	430	310.3	1388
Methionine (mg)	140	117.7	350
Threonine (mg)	390	117.7	1188
Leucine (mg)	650	492.2	1950
Isoleucine (mg)	440	299.6	825
Valine (mg)	540	374.5	1063

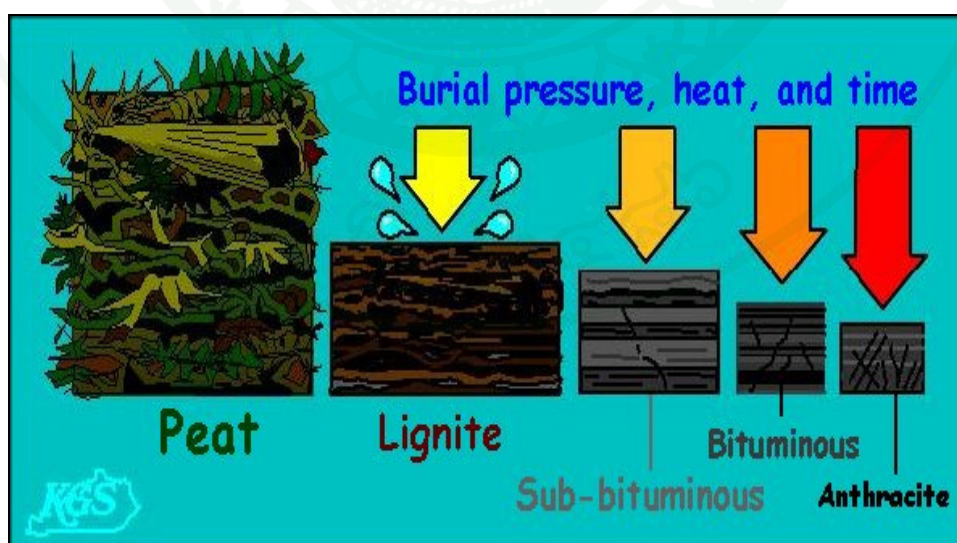
ที่มา : กล้วยทิศา (2531)

2. ถ่านหิน

ถ่านหิน คือ หินตะกอนชนิดหนึ่งที่เกิดจากการตกตะกอนสะสมของซากพืชในยุค ดึกดำบรรพ์เป็นระยะเวลานานหลายล้านปี จนตะกอนนั้นได้เปลี่ยนสภาพไป และมีองค์ประกอบ ส่วนใหญ่เป็นธาตุคาร์บอน โดยมีธาตุอื่นๆทั้งที่เป็นก๊าซและของเหลวปนอยู่ด้วย ในสัดส่วนที่น้อย กว่าและเป็นแร่เชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำ มีทั้งชนิดผิวมันและผิวด้าน น้ำหนักเบา ถ่านหินประกอบด้วยธาตุที่สำคัญ 4 อย่างได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน นอกจากนั้น มีธาตุหรือสารอื่น เช่น กำมะถัน เจือปนเล็กน้อย ถ่านหินที่มีจำนวนคาร์บอน สูงและมีธาตุอื่น ๆ ต่ำ เมื่อนำมาเผาจะให้ความร้อนมาก ถือว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพ

2.1 ประเภทของถ่านหิน

การเกิดถ่านหินมีความหลากหลายทั้งจากปัจจัยของแหล่งกำเนิด ระยะเวลา และ สภาพต่างๆ ทำให้ถ่านหินจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกันมีองค์ประกอบและคุณสมบัติต่างกัน ถ่านหิน สามารถจำแนกตามอายุการเกิด หรือปริมาณคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบได้เป็น 5 ประเภท คือ พีต (Peat), ลิกไนต์ (Lignite), ซับบิทูมินัส (Subbituminous), บิทูมินัส (Bituminous) และ แอนทราไซต์ (Anthracite) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การจำแนกถ่านหินแต่ละประเภท

2.2 ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ลักษณะสมบัติของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ที่ขายในท้องตลาด ลักษณะโดยทั่วไปที่ใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี โดยลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการทดลอง จะมีลักษณะเป็นเกล็ดสีดำ มีความมันวาว ผ่านการทดสอบมาตรฐานตาม American Society for Test and Material (ASTM) ประโยชน์ของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ใช้เป็นสารดูดซับกลิ่น สี ในเครื่องกรองน้ำ

ตารางที่ 2 ลักษณะจำเพาะของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

สมบัติทางกายภาพ	ค่าจำเพาะ
Particle Size Distribution : +8(2.36mm.)	MAX. 5%
(ASTM MESH MM.) 8*30 (2.36-0.60mm.)-30(0.60 mm)	MIN. 90%,MAX.5%
Apparent Density (g/cc)	MIN. 046
Moisture (%w/w)(As packed)	MAX. 8
Ash (%w/w)(As packed)	MAX. 14
pH	9-11
Surface Aere (m2/g)(Calculated)	MIN. 850
Iodine Number (mg/g)(AWWAB604)	800-900
Carbon Terachoride Adsorption (%w/w)(ASTM 3467-88)	MIN. 40
Hardness Number (%)(ASTM 3467-79)	MIN. 90
Packing : 25 kgs./bag (packed in paper sacks with a polythene inner bag)	
"Quality Guaranteed"	

ที่มา : ปราโมทย์ (2551)

3. สีย้อมผ้า

3.1 คุณลักษณะของสีย้อม

สีย้อม (Dyestuffs) คือ สารให้สีที่สามารถจับติดวัตถุด้วยตัวเองหรือด้วยการชักนำโดยปฏิกิริยาในกระบวนการย้อมหรือกระบวนการพิมพ์ ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ คูดติดเส้นใยได้ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีมากมายหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีความมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสภาวะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการคูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น

อิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีคูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vanderwaals' Force) แรงไอออน (Ionic Force) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) การคูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม กับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งบางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์

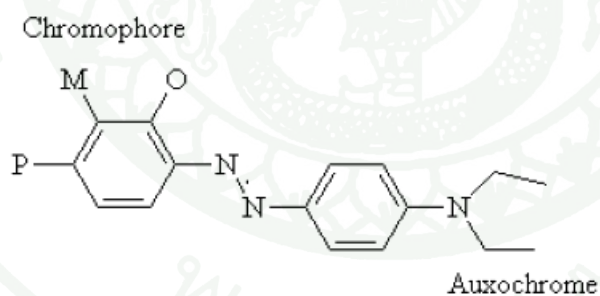
สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลแตกต่างกันจะมีความสามารถในการคูดกลืนพลังงานแสงที่ความยาวคลื่นที่ต่างกัน สามารถแบ่งประเภทของสีย้อมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) สีย้อมธรรมชาติ เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติโดยเฉพาะพืช และสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบของพืช เช่น สีนํ้าเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีส้มจากเปลือกส้ม สีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2) สีย้อมสังเคราะห์ สีย้อมประเภทนี้เป็นสีย้อมที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม และเมื่อปิโตรเลียมผ่านการสกัดแล้วจะได้ไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ เบนซีน และไซลีน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนสภาพให้เป็นสารตัวกลาง และจากสารตัวกลางจะเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ (กาวิ, 2545)

3.2 การเกิดสีของสีย้อม

สีของสีย้อมสังเคราะห์ที่ปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้นั้นเกิดจากองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ โครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งเป็นกลุ่มอะตอมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ (พลังงานแสงที่สายตามนุษย์มองเห็นได้จะมีความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร) โดยโครโมฟอร์มีอยู่ด้วยกันหลายกลุ่ม คือ กลุ่มอะโซ (Azo Group) กลุ่มแอนทราควิโนน (Anthraquinone Group) เป็นกลุ่มสารที่นิยมใช้มากที่สุดและกลุ่มอื่นๆ เช่น กลุ่มอินดิโก (Indigo Group) กลุ่มเบนโซดิฟูแรนโนน (Benzodifuranone Group) กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group) กลุ่มไนโตร (Nitro Group) กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group) กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group) กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group) กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group) และกลุ่มฟอร์มazan (Formazan Group) สีย้อมที่ประกอบด้วยโครโมฟอร์อย่างเดียวจะให้เพียงสีอ่อนๆ เท่านั้น เมื่อต้องการสีเข้มจึงต้องมีการเพิ่มโครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มอื่น และเรียกสารกลุ่มนี้ว่า ออกโซโครม (Auxochromes) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่สร้างความเข้มและความสว่างของสีมีสมบัติการละลายน้ำ และ/หรือปรับปรุงสมบัติในการติดกับเส้นใยให้กับสีย้อม หมู่ที่ละลายน้ำเช่น $-\text{SO}_3\text{Na}$, $-\text{COONa}$ และ $-\text{OH}$ เป็นต้น สูตรโครงสร้างของโครโมฟอร์และออกโซโครมของสีย้อม ดังแสดงในภาพที่ 3

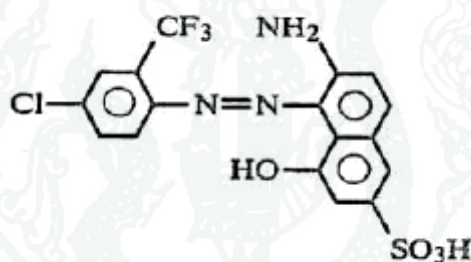


ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างของโครโมฟอร์และออกโซโครมของสีย้อม

3.3 ประเภทของสีย้อม

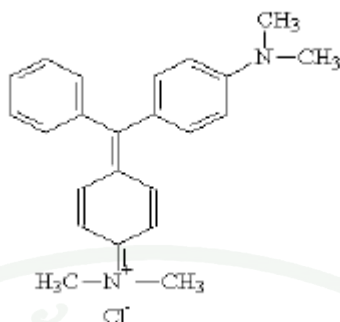
สีย้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีมากมายหลายชนิด ตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อม สีย้อมอาจจำแนกได้หลายประเภท ตามลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งออกเป็น สารสีละลายน้ำได้และสารสีไม่ละลายน้ำ หรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งวิธีจำแนกสีย้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่ายได้แก่ การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภท มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) สีย้อมแอซิด (Acid Dyes) สีย้อมชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ โมเลกุลสีย้อมมีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน สำหรับการเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนโมเลกุลของสีย้อมกับประจุบวกบนโมเลกุลของเส้นใย และสีย้อมนี้มักมี กลุ่มซัลโฟนิค (Sulfonic Group) ซึ่งเป็นตัวให้ประจุลบในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 4



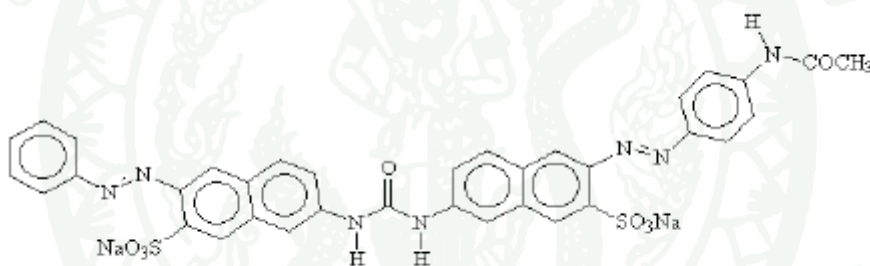
ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมแอซิด

2) สีย้อมเบสิก (Basic Dyes) หรือบางครั้งเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่า สีย้อมแคทไอออนิก (Cationic Dyes) มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี โมเลกุลสีย้อมมีประจุบวก โดยนิยมใช้ในการย้อมเส้นใยอะคริลิก โพรตีน และไนลอน ซึ่งในการย้อมด้วยสีย้อมเบสิกจะให้สีที่สดใสมาก การเกาะติดของสีย้อมในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนสีย้อมกับประจุลบบนเส้นใย สีย้อมกลุ่มนี้มักมีหมู่เอมีน (Amine Group) ในโมเลกุล ดังแสดงในภาพที่ 5



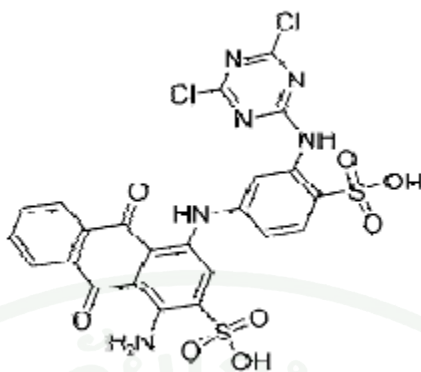
ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสียเบสิค

3) สียไคเร็กต์ (Direct Dyes) หรือเรียกว่าสียย้อมฝ้าย สียชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้สียย้อมสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสียไคเร็กต์

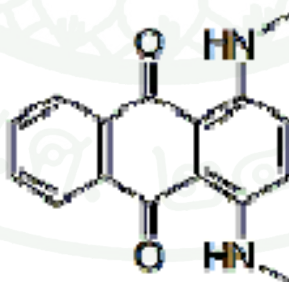
4) สิริแอคทีฟ (Reactive Dyes) เป็นสียที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นเบส สียชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของสียจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นเบสจนเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟ

5) สีดิสเพิร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ต่ำ สามารถย้อมเส้นใยสังเคราะห์ได้แก่ เส้นใยอะซิเตท เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิก ได้ดีในสภาวะที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี

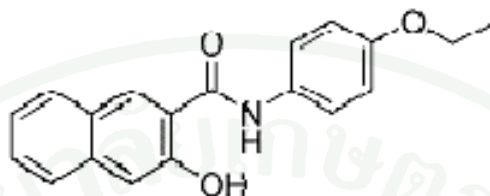
สีดิสเพิร์ส แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มสารเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกันดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีดิสเพิร์ส

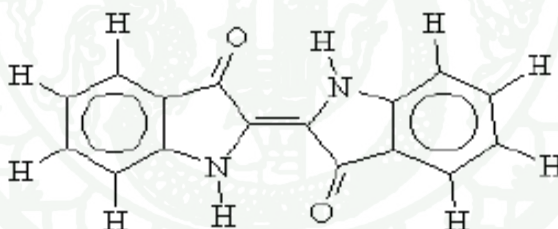
6) สีอะโซอิก (Azoic Dyes) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำ ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นภายในเส้นใยด้วยปฏิกิริยาเคมีระหว่างเกลือไดอะโซเนียมกับสารประกอบที่เหมาะสม

เกิดเป็นสีย้อมที่มีสูตรโครงสร้างของสีอะโซอิก สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรือ อะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนทานต่อการซักแต่ไม่ทนทานต่อการขูด ดังแสดงในภาพที่ 9



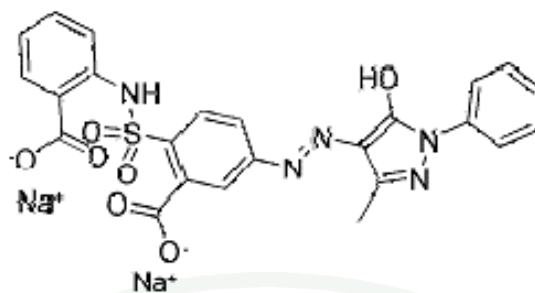
ภาพที่ 9 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีอะโซอิก

7) สีแว็ต (Vat Dyes) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยมีกลุ่มคีโตน (Ketone Group) เป็นสีย้อมที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโกยด์และสีแอนทราควิโน ดังแสดงในภาพที่ 10 และส่วนใหญ่ใช้ย้อมในเส้นใยฝ้าย



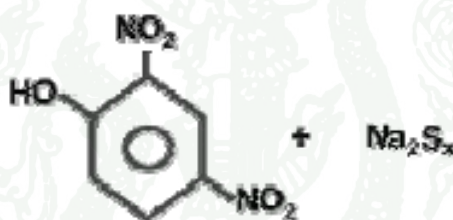
ภาพที่ 10 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแว็ต

8) สีมอร์แดนต์หรือโครม (Mordant or Chrome Dyes) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยในการติดสีเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายๆ โมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงนำมาใช้ในการย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนได้ดี ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีมอร์แดนท์

9) สีซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบในส่วนที่เป็นโครโมฟอร์และส่วนของสายโซ่พอลิซัลไฟด์ ดังแสดงในภาพที่12 เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวส์เพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่ซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวส์จะละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทนนาน และเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนทานต่อการซัก



ภาพที่ 12 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีซัลเฟอร์

10) สีออกซิเดชั่น (Oxidation Dyes) เป็นสีที่สามารถออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากปฏิกิริยาในน้ำ โดยสีจะติดแน่นซึ่งอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย สีย้อมนี้เมื่อถูกออกซิไดซ์ในเส้นใยจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมนำมาใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

11) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำได้จากการสังเคราะห์ขึ้นในเส้นใยด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวกลางในเส้นใยที่ไม่มีสีอะโซอิก เช่น สียฟทาโล โซยานิน จะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ โดยสีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

ดังนั้นในการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัตถุที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีหลากหลายชนิดที่แตกต่างกัน เช่น (1) เส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ ฝ้าย ลินิน ปอ ป่าน โดยส่วนใหญ่จะย้อมได้ด้วยสีไคเร็กซ์ สิริแอททิฟ สีแควี และสีซัลเฟอร์ เป็นต้น (2) เส้นใยโปรตีน ได้แก่ ไหม ขนสัตว์ จะย้อมด้วยสีแอซิดและสีเบสิก (3) เส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ พอลิเอสเตอร์ ไนลอน อะคริลิก โดยส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีดิสเพิร์ส สีแอซิด และสีเบสิก เป็นต้น

3.4 ผลกระทบของสีย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแหล่งน้ำในธรรมชาติดังต่อไปนี้

1) สารอินทรีย์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ลดลงซึ่งมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน ทำให้แหล่งน้ำขาดคุณสมบัติในการทำมาสะอาดด้วยตนเอง (Self Purification) ได้ ทำให้แหล่งน้ำเกิดกลิ่นเหม็นและไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เกิดประโยชน์ในทางเศรษฐกิจได้ อีกทั้งสารอินทรีย์บางตัวอาจหากสารนั้นสลายตัวได้ยากก็จะเกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ (Bio Accumulation) และอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม

2) ค่าความเป็นด่าง จะทำให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่สูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำที่มีสภาวะเป็นกลางช่วงความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 6.0-9.0

3) อุณหภูมิของน้ำที่สูง จะมีผลทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อีกด้วย

4) โลหะหนัก และของแข็งที่ละลายน้ำบางชนิด อาจทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำเป็นโรคได้ อีกทั้งโลหะหนักยังเป็นสารสะสมในระบบนิเวศอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

5) สี เป็นการทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ และทำให้ปริมาณแสงที่จะส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

6) ของแข็งแขวนลอย เป็นสิ่งที่ช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ สามารถตกตะกอนอาจทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้

3.5 การกำจัดสีในน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งจากการข้อมผ้าในโรงงานฟอกข้อมนั้น ส่วนใหญ่จะมีสีข้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเจือปน และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้งซึ่งก่อให้เกิดความรู้สึกรังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกข้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน ซึ่งวิธีการกำจัดสีมีหลายวิธีดังนี้

3.5.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการกำจัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง

เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีข้อม ถ้าสีข้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสียอดสีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจะส่งผลเสียต่อกระบวนการในตรียูเคชั่น

3.5.2 กระบวนการกำจัดทางชีววิทยา (biological treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถกำจัดสีได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

(1) ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) เป็นกระบวนการกำจัดน้ำทิ้งทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย หรือเปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง ให้มีความสกปรกตกลง

(2) ระบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) ดัดแปลงจากการกำจัดน้ำทิ้งแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกันโดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

3.5.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้ pH ของน้ำทิ้งสูงดังนั้นต้องมีการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับ pH ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

3.5.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (ozone treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน การโอโซนเนชั่น (ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำที่อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยในโครเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

3.5.5 เทคโนโลยีเมมเบรน (membrane technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเมมเบรน(membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

(1) ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (colloid)

(2) ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) เหมาะสำหรับการใช้กำจัดไอออนสีย้อมและโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเมมเบรน 2 ขั้นตอน คือเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (brackish water) และเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (sea water) ซึ่งเมมเบรนแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเมมเบรนที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94

(3) ไดนามิกเมมเบรน (dynamic membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก สแตนเลส วัสดุคาร์บอนหรือเซรามิกซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะครีลิก(Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

3.5.6 นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration)

ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารโพลิอิเล็กโทรไลต์ เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

วิธีการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมอาจใช้วิธีใดวิธีหนึ่งดังกล่าว หรืออาจใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสม จำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วยเนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

4. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการกำจัดน้ำทิ้ง การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า Adsorbent ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ความพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลหรือคอลลอยด์ออกจากสารละลาย โดยตัวถูกดูดซับจะเกาะบนผิวดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อีก โดยการไล่โมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่ถูกดูดซับไว้ออกไปโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ เปลี่ยนความดัน เปลี่ยนพีเอช เป็นต้น

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันระหว่างพื้นที่ผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยตัวถูกดูดซับจะไปเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็งและพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับใน

ดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไป ประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้าน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับจะทำให้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้จะถูกจำกัดความเป็นอิสระในการเคลื่อนย้ายเมื่อเทียบกับโมเลกุลอิสระที่ไม่ถูกดูดซับ โมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับนั้นจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสงหรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลที่ถูกดูดซับเอาไว้บนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

4.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

4.1.1 กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2) การแพร่ผ่านภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

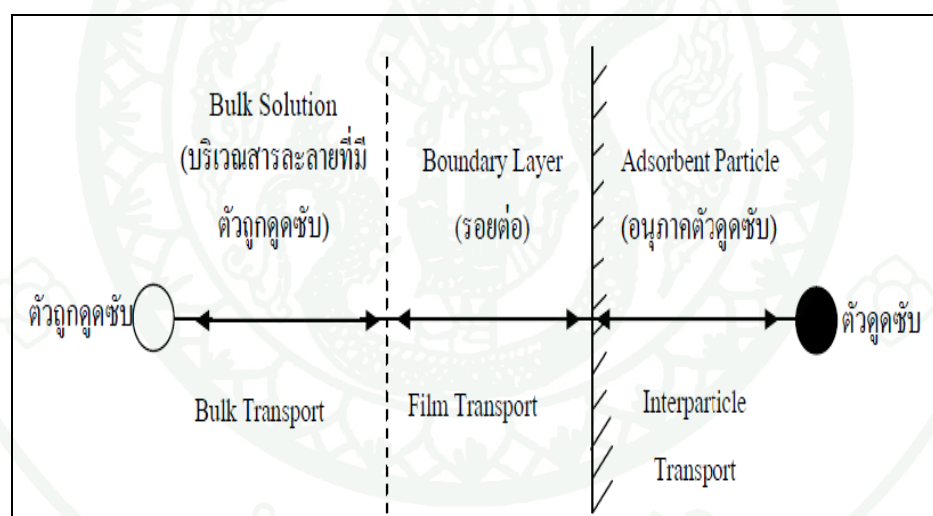
4.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้ ดังแสดงในภาพที่ 13

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวเข้าสู่สภาวะสมดุลน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในชั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

4.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

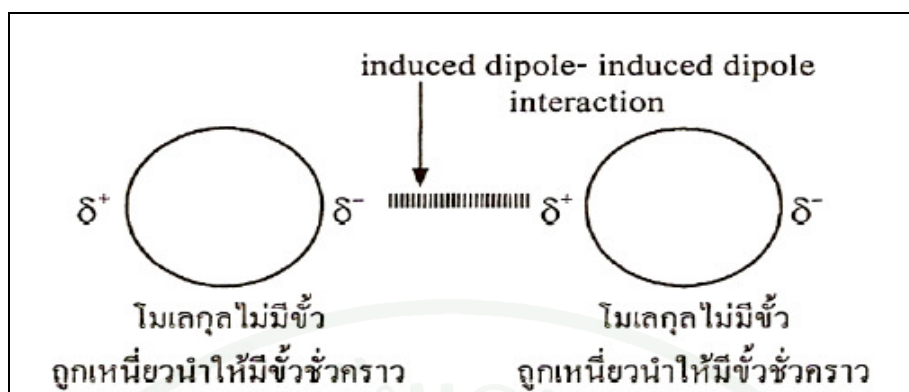
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (Physical Force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (Chemical Force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

4.2.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภทดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่ง เรียกว่า แรงลอนดอน (London Force) หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion Force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (Induced Dipole) โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Attraction)

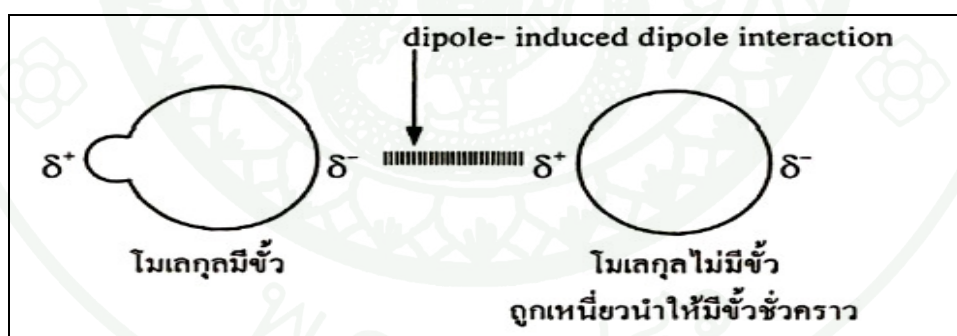
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่ง จะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

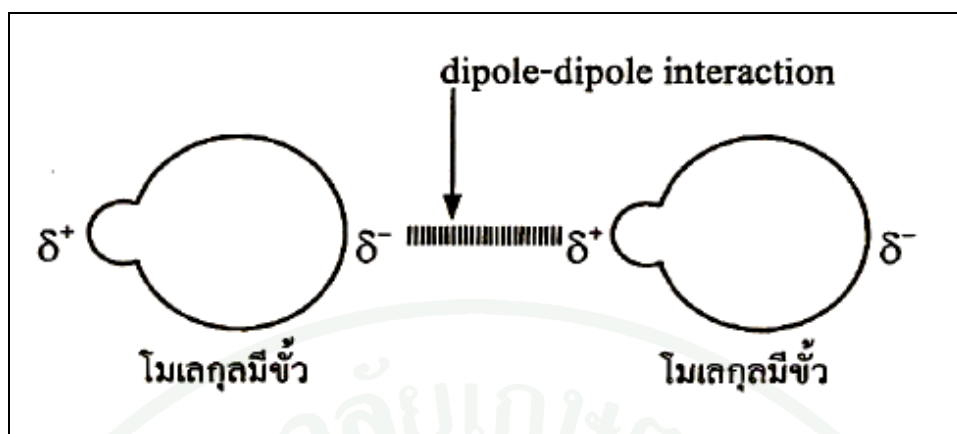
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Dipole-Induced Dipole Attraction) ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน เรียกว่าแรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Attraction) ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจน กับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะมีสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจะเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)

4.2.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

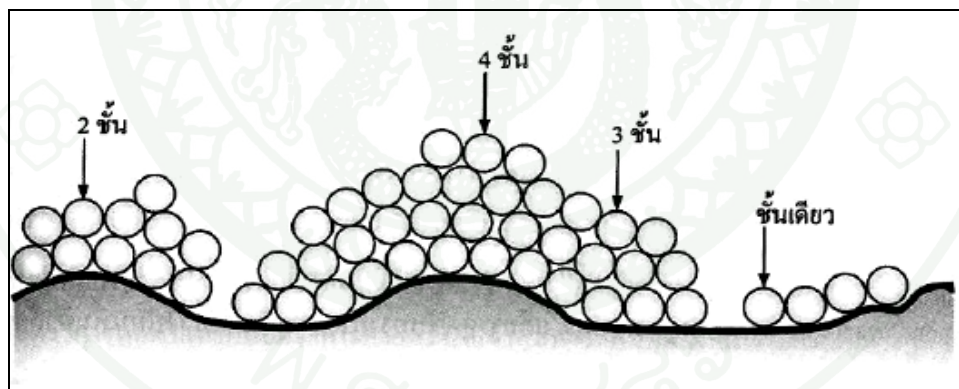
แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโคเวเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันโดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน) การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible Process) จึงไม่เกิดการคาย

4.3 รูปแบบของการดูดซับ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

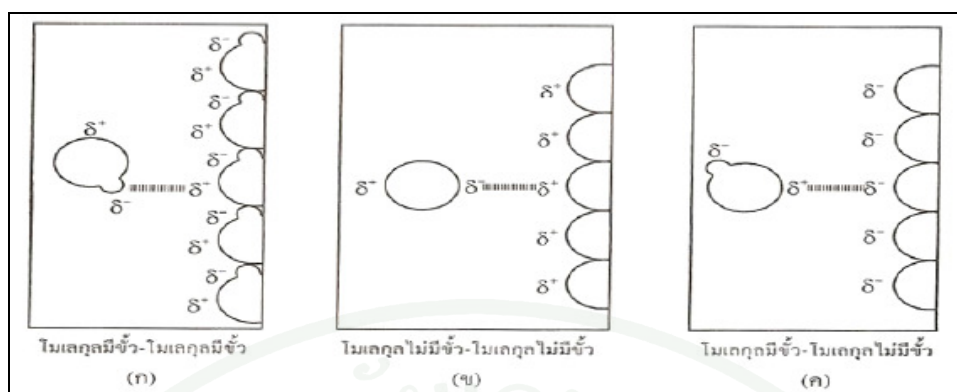
4.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption or Physical Adsorption or Van Der Waals Adsorption)

เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่นแรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 17,18



ภาพที่ 17 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 18 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ

- หมายเหตุ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
- (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่
- (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

4.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียวและเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ ประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ

4.4 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

- 1) สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีขีดจำกัด
- 2) ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น
- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
- 4) วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จี้เลื่อย เปลือกกุ้ง (นำมาทำเป็นไคโตซาน) กากกาแฟที่ใช้แล้ว กากชาที่ใช้แล้ว กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ ถ่านจากการเผาต้นพุทธรักษา ต้นรูปญาณี ช้างข้าวโพด ต้นยางพารา ต้นกกกลม และเถาเถาวัลย์ เป็นต้น
- 5) สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรียยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

4.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

- 1) อัตราการเขย่า เพื่อให้มีการดูดซับผิวอาจขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านฟิล์ม หรือการแพร่เข้าสู่โพรง ถ้าอัตราการเขย่าต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อ

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในตรงกันข้าม อัตราการเขย่าสูง จะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาสารดูดติดผิวได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดติดผิว

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

3) ขนาดและลักษณะของสารถูกดูดติดผิว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอน การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิว นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

4) ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดติดผิวได้ดี

5) พิเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกระบวนการดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี

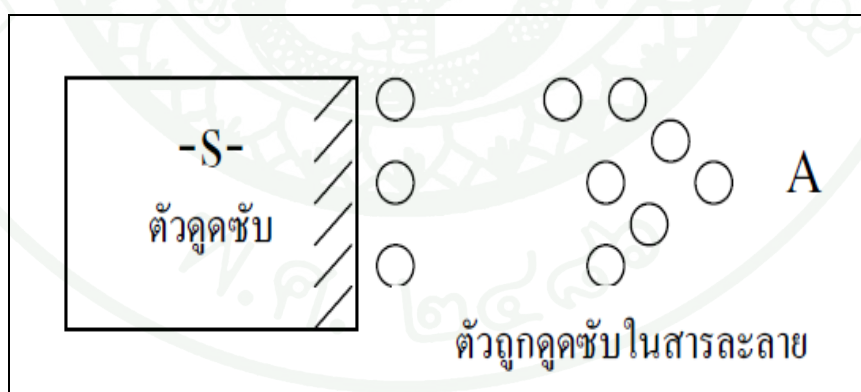
6) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิว

จะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ
กระบวนการคายความร้อน

7) เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว
และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการ
ดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อ
ประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

4.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น Co
ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมี
จำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลตัว
ถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ
เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบ
เข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุล
ตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่



ภาพที่ 19 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

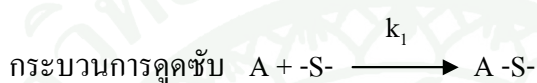
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตร
ในสารละลาย

S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1-q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล

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

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็น โมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือกิโลกรัม (kg)

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³) หรือลิตร (l)

C₀ เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

q อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (Adsorption Capacity)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

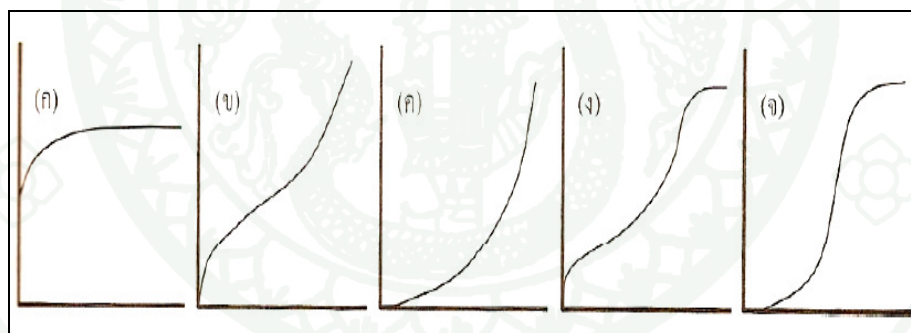
ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \quad \dots\dots\dots (3)$$

4.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550) อ้างโดย Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียวส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

4.7.1 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finalay Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

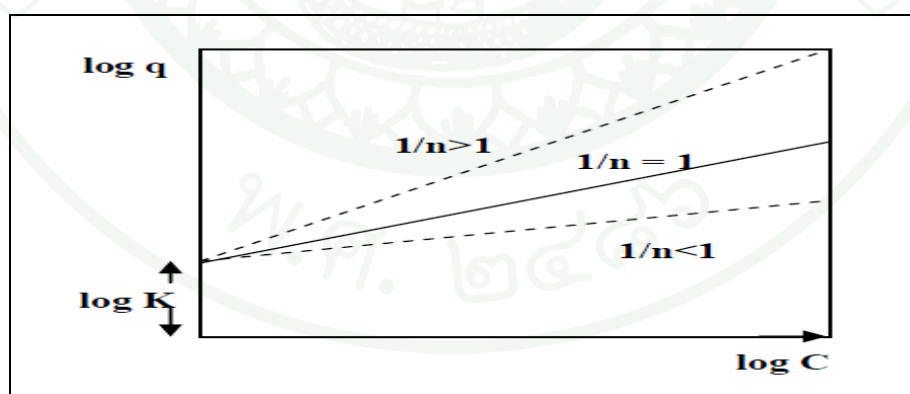
$$q = KC^{1/n} \dots\dots\dots(4)$$

สมการที่ (4) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

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



ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนด์ลิช

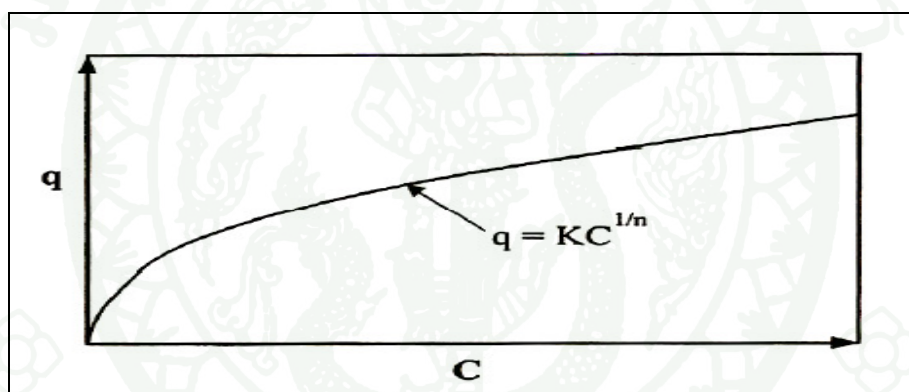
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

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

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

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

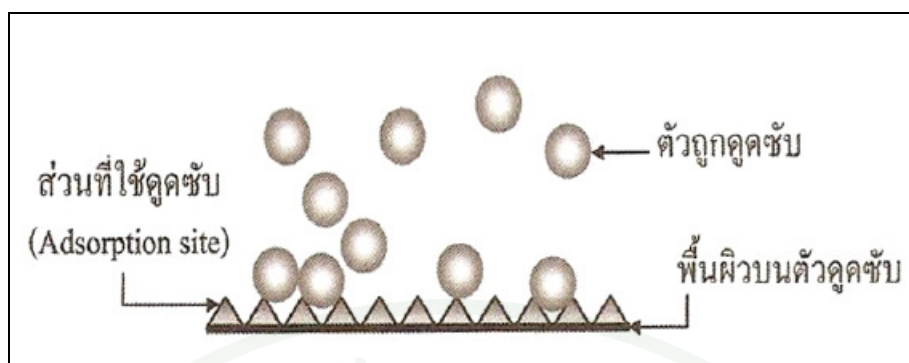
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (4) ดังภาพที่ จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 22 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

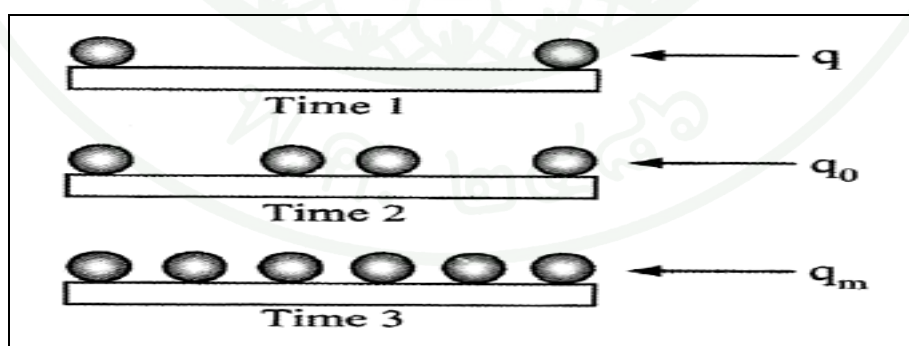
4.7.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932



ภาพที่ 23 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ดังนั้น สมการที่ (1) จึงมีรูปแบบดังนี้

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

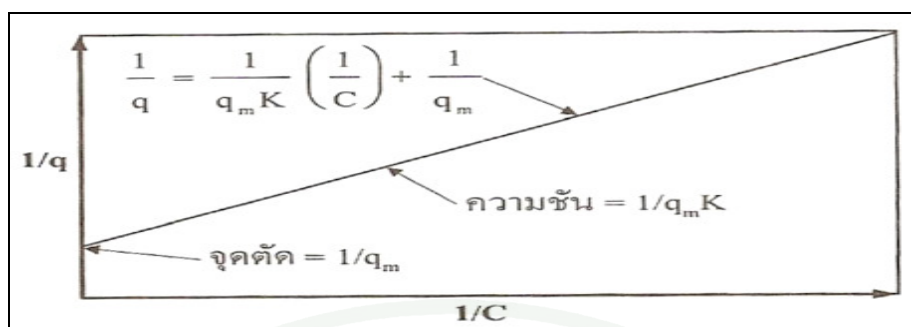
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังแสดงในภาพที่ 25



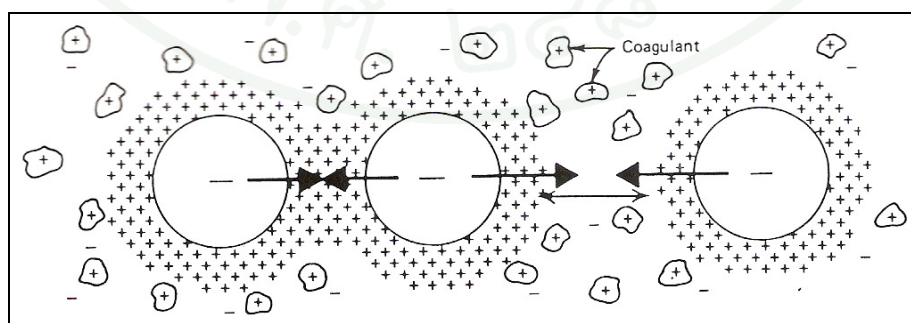
ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

5. กระบวนการโคแอกกูเลชันสำหรับการกำจัดสีข้อม

5.1 กระบวนการ โคแอกกูเลชัน (Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นการตกตะกอนทางเคมีของน้ำจัดเป็นกระบวนการสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ประกอบด้วย 2 กลไก ได้แก่ (1) กลไกส่วนแรกเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นด้วยการเติมสารเคมีลงในน้ำถึงกวนเร็วเพื่อที่จะทำให้การกระจายของสารเคมีเป็นไปได้อย่างดี (2) กลไกส่วนที่สองเป็นการทำให้อนุภาคซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพและสัมผัสกันเพื่อให้มีโอกาสจับตัวกันเป็นอนุภาคนขนาดใหญ่และน้ำหนักมากขึ้นเกิดเป็นปุย เรียกว่า ฟล็อกกูเลชัน (Flocculation) ซึ่งจะเกิดขึ้นด้วยกลไกทางเคมีโดยการผสมเบาๆ และใช้เวลานาน (ประมาณ 20-30 นาที) กลุ่มปุยที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนอย่างรวดเร็วในถังตกตะกอน



ภาพที่ 26 สารเคมีช่วยตกตะกอนช่วยลดแรงผลักระหว่างอนุภาค

ที่มา: ณรงค์ (2545)

ไชยยุทธ์ และ ปรีชา (2536) กล่าวว่า การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น จึงส่งผลต่อการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้มทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงสู่ท่อน้ำทิ้ง กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งมีลักษณะที่แตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลขนาดเล็ก (สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ) การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้น จึงต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น พอลิอิเล็กโตรไลต์ และสามารถใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-เบส และใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้นก่อนกระบวนการกำจัดทางชีววิทยา สมบัติด้านการละลายน้ำของสีย้อมมีความสำคัญต่อความยากง่ายในการกำจัดออกจากน้ำทิ้ง ถ้าเป็นสีที่ละลายน้ำไม่ได้การกำจัดโดยวิธีตกตะกอนจะสามารถทำได้ง่าย แต่ถ้าเป็นสีที่ละลายน้ำได้การกำจัดสีให้หมดไปเป็นเรื่องที่ทำได้ค่อนข้างยาก สีแต่ละประเภทจึงมีวิธีการกำจัดแตกต่างกันออกไปตามประเภทและโครงสร้างทางเคมีของสีที่ใช้ในการย้อม

5.2 การเลือกใช้สารสร้างตะกอน

สารสร้างตะกอน (Coagulant) มีหน้าที่ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ และทำให้ตะกอนยึดเหนี่ยวกันแข็งแรงขึ้น เพื่อไม่ให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นต้องแตกตัวออก ซึ่งสารสร้างตะกอนกลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหรืออลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ เมื่อเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำ จะทำให้โมเลกุลแตกตัวเป็นอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) และไอออนเชิงซ้อนจำนวนมากที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสของอลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์

1) อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) หรือสารส้ม (Alum) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมากที่สุด สารส้มที่อยู่ในรูป ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) จัดเป็นเกลือกรด มีลักษณะเป็นเกล็ด ดังนั้นจึงสามารถกัดกร่อนโลหะได้ ละลายน้ำได้ดี อาจอยู่ในรูปของแข็งหรือสารละลายได้

2) สารส้มที่เป็นของเหลว ละลายน้ำ (Al_2O_3) ประมาณร้อยละ 5.8-8.5 โดยมวล และราคาถูกกว่าชนิดแรก

3) โซเดียมอลูมิเนต ประกอบด้วย (Al_2O_3) ทำให้อยู่ตัวได้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ควรใช้สารชนิดนี้ร่วมกับสารส้มเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ

4) แอคติเวเตชันเคมี นิยมใช้ร่วมกับสารส้มจะทำให้เกิดการตกตะกอนได้เร็วขึ้นและจัดเป็นสารช่วยสร้างตะกอนของสารส้ม

ปราโมทย์ (2551) กล่าวว่า การสร้างตะกอนและการรวมตัวของตะกอนนั้น เป็นการเติมสารส้มหรือเรียกชื่อทางเคมีว่าอลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) เพื่อลดความเสถียรของอนุภาคน้ำขนาดเล็กพวกคอลลอยด์ในน้ำหรือความขุ่นของน้ำทำให้อนุภาคเหล่านี้รวมตัวกันเป็นของแข็งที่มีอนุภาคน้ำขนาดใหญ่และหนักขึ้น โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพร่วมด้วย คือกระบวนการผสมเร็วและผสมช้า นอกจากนี้ต้องมีการปรับพีเอชของน้ำให้กระบวนการสร้างและรวมตัวของตะกอนให้มีประสิทธิภาพโดยสารเคมีที่นิยมใช้ปรับพีเอชในกระบวนการนี้คือ ปูนขาว ($Lime; (Ca(OH)_2)$)

5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างตะกอน

กระบวนการสร้างตะกอนสามารถดำเนินการไปได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือประจุลบ หรือเป็นคอลลอยด์ประเภทไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สามารถถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่าประเภทชอบน้ำ (Hydrophilic)

2) อุณหภูมิ มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นโดยเมื่ออุณหภูมิลดลง จะทำให้ความหนืด (Viscosity) ของน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการตกตะกอนของฟล็อกช้าลง เพราะมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ค่าพีเอชจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโดยจะมีผลมากในกรณีใส่สารเคมีช่วยตกตะกอนในปริมาณต่ำ และเมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆของสารเคมีในน้ำลดลงด้วย

3) ความเป็นเบสของน้ำ ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ด้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเพื่อให้ปฏิกิริยาในการกำจัดอนุภาคน้ำคอลลอยด์มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับสารสร้างตะกอนบางชนิด ได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟตและเกลือของเหล็ก ซึ่งเป็นกรดเมื่อเติมลงไปในน้ำจะไปลดค่าความเป็นเบสในน้ำและมีผลทำให้น้ำมีฤทธิ์กัดกร่อนได้

4) ค่าพีเอช สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน การเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำที่ไม่อยู่ในช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสม นอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้แล้ว ยังทำให้คุณภาพน้ำไม่ดีและเกิดกระบวนการตกตะกอนที่ไม่ดีขึ้น

5) ชนิดและปริมาณของสารเคมีสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการทำลายอนุภาคคอลลอยด์ได้แตกต่างกัน รวมทั้งยังต้องคำนึงถึงปริมาณที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น ความเร็วในการตกตะกอน ราคาและความง่ายในการใช้งาน

6) กลีของสารอนินทรีย์ การมีอนุมูลซัลเฟตหรือฟอสเฟตละลายอยู่ในน้ำทั้งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการจับตัวเป็นฟล็อกเปลี่ยนแปลงไป ผลของอิออนชนิดต่างๆ ต่อการจับตัวเป็นฟล็อกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง คือ เปลี่ยนแปลงช่วง pH ที่ดีที่สุดในการเกิดฟล็อก เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเกิดฟล็อก ปริมาณของสารเคมีที่เหมาะสมที่ช่วยในการตกตะกอน สำหรับการเกิดฟล็อกจะเปลี่ยนแปลงไป และปริมาณสารเคมีช่วยตกตะกอนที่เหลือในน้ำเปลี่ยนแปลงไป

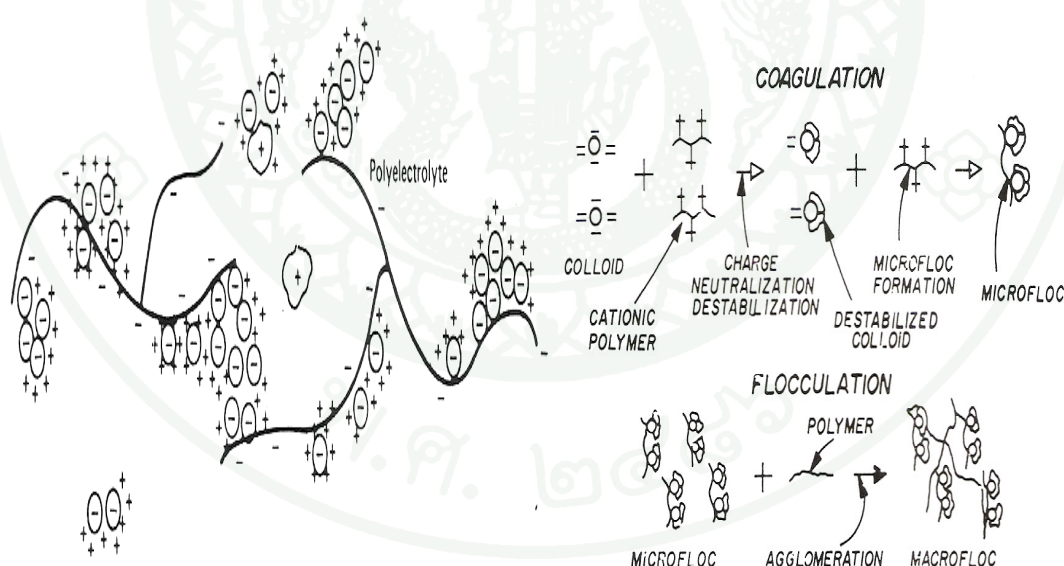
7) ความขุ่นในน้ำเกิดจากเศษดินและแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.002-0.005 มิลลิเมตร อนุภาคเหล่านี้จะตกตะกอนนอนก้นได้เองถ้าหากมีเวลามากพอ การใส่สารเคมีช่วยตกตะกอนจะทำให้เกิดฟล็อกได้ง่ายและรวดเร็ว เพียงแต่ปรับค่าให้เหมาะสม คือ ใส่สารช่วยตกตะกอนเพิ่มขึ้นตามความขุ่นที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของสารเคมีไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความขุ่นที่เพิ่มขึ้น และถ้าน้ำมีความขุ่นมาก ควรใส่สารช่วยตกตะกอนเพียงเล็กน้อย เพราะโอกาสที่อนุภาคต่างๆ จะมาชนกันและจับตัวกันมีมาก

8) การกวน เพื่อให้เกิดการปั่นกววนขึ้นในน้ำ ในตอนแรกจะเป็นการกวนเร็วขณะที่มีการเติมสารเคมีช่วยตกตะกอนเพื่อให้สารเคมีกระจายตัวในน้ำอย่างทั่วถึงและช่วยเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคความขุ่นกับสารเคมีให้มากขึ้น โอกาสที่จะจับตัวเป็นฟล็อกก็จะเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการกวนเร็วอยู่ประมาณ 30-60 วินาที การกวนช้า ก็เพื่อให้ฟล็อกขนาดเล็กๆ ที่เกิดจากการกวนเร็วมีโอกาที่จะชนกันเพิ่มขึ้น เพื่อจับตัวรวมกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น การกวนนี้ต้องการเพียงแค่ให้ฟล็อกลอยตัวอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอน ไม่ให้กวนแรงจนกระทั่งฟล็อกแตกออกเพราะแรงเฉือน ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกวนช้าอยู่ประมาณ 30-60 นาที

9) อัตราการเกิดฟล็อก ในระยะแรกของการเกิดฟล็อก จะมีอนุภาคมานกันถี่มากเท่าใด อัตราการเกิดการจับตัวเป็นฟล็อกก็จะมีมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มจำนวนฟล็อกแล้วยังเพิ่มน้ำหนักและขนาดของฟล็อกอีกด้วย ทำให้จมตัวได้ง่ายยิ่งขึ้น ถ้าน้ำตัวอย่างเป็นน้ำที่มีความขุ่นน้อยจะพบว่าปัญหาว่าเกิดฟล็อกยากและตกตะกอนช้า

5.4 สารเคมีเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน

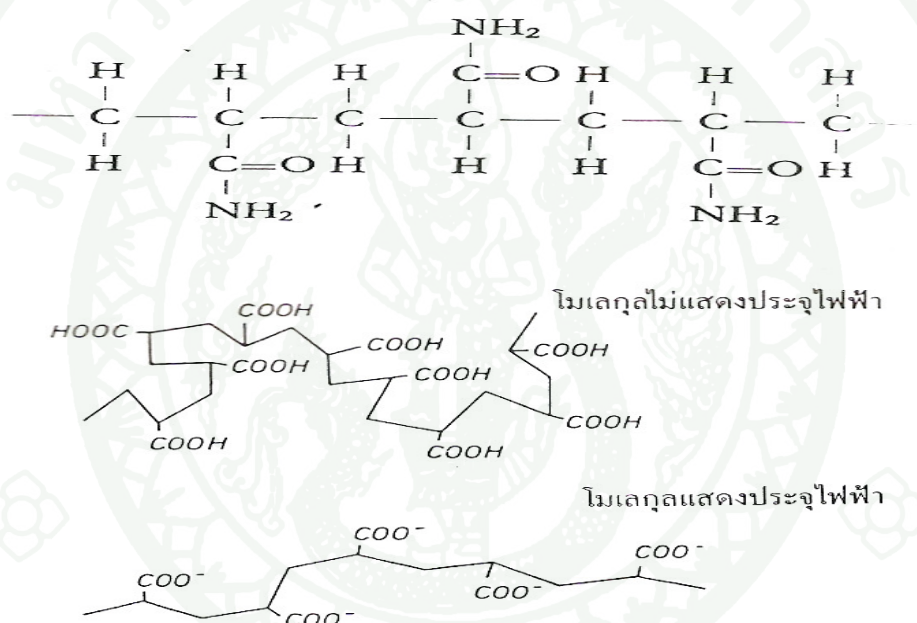
ในการตกตะกอนด้วยสารเคมีช่วยตกตะกอนนั้น ในบางครั้งจะพบปัญหาในเรื่องตะกอนตกช้า ฟล็อกมีลักษณะเปื่อยยุ่ยแตกง่ายเมื่อถูกน้ำพัดพาในถังตกตะกอน หรือบางครั้งถ้าน้ำมีความขุ่นมากกว่าปกติ เกินกำลังของอุปกรณ์ที่จะรับความขุ่นได้ จึงต้องใส่สารเคมีพวก Polymers เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนเพราะมีลักษณะเป็นเส้นยาว (Chain) และมีประจุไฟฟ้าด้วย ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคคอลลอยด์จับตัวรวมตัวกันเป็นฟล็อกเร็วขึ้น และช่วยให้ฟล็อกเล็กๆ จับตัวกันเป็นตะกอนเม็ดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ลักษณะของโพลีอิเล็กโทรไลต์ช่วยจับอนุภาค และลักษณะการจับตัวการรวมตัวเมื่อใส่โพลีเมอร์

ที่มา: ณรงค์ (2545)

Polyelectrolytes ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงอยู่ในช่วง 10,000–1,000,000 หรือมากกว่า สารเหล่านี้ได้แก่พวก Polyacrylamides, Polyamines, polyacrylates, Polyethyleneimine สารเหล่านี้มีโครงสร้างเป็นร่างแหและมีโมเลกุลขนาดใหญ่ สามารถแตกตัวได้ในน้ำแสดงประจุไฟฟ้าได้ จะมี Ionic Strength และ Adsorption Activity สูงสำหรับประเภทของ Polyelectrolytes มี 4 ชนิด คือ (1) Anionic มีประจุลบ (2) Cationic มีประจุบวก (3) Ampholytic มีทั้งประจุบวกและลบ (4) Non-ionic ไม่แสดงประจุไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 สูตรโครงสร้างของโพลีอเล็กโทรไลต์และการปรากฏประจุไฟฟ้าของโพลีอเล็กโทรไลต์

ที่มา: ณรงค์ (2545)

Polyelectrolytes พวก Anionic และ Non-ionic Polyelectrolytes นิยมใช้ร่วมกับสารส้ม เพื่อช่วยให้ฟล็อกจับตัวได้รวดเร็ว และมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณสารส้มที่ใช้ได้อีกด้วย ซึ่งถ้าคิดค่าใช้จ่ายรวมแล้วจะเป็นการประหยัดกว่าการใช้สารส้มเพียงชนิดเดียว

5.5 ขั้นตอนสำคัญในการเติมสารเคมีในกระบวนการสร้างตะกอน

ในการเติมสารเคมีในกระบวนการสร้างตะกอนจำเป็นต้องมีขั้นตอนเพื่อให้สารเคมีกระจายไปในน้ำได้อย่างทั่วถึงและเกิดตะกอนได้ดี

1) การกวนเร็ว (Flash Mixing or Rapid Mixing) มีหน้าที่ดังนี้

- (1) ทำหน้าที่กระจายสารเคมีให้ผสมลงในน้ำอย่างทั่วถึง โดยใช้ระยะเวลาสั้นที่สุด
- (2) ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคและเกิดการรวมเป็นตะกอนขึ้น

เมื่อน้ำที่มีสิ่งเจือปนผสมกับสารเคมีโดยการกวนเร็ว อนุภาคขนาดเล็ก เช่น คอลลอยด์ จะก่อตัวเป็นตะกอนขนาดเล็ก ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีขนาดเท่าปลายเข็มหมุด ตะกอนขนาดเล็กจะทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นในการก่อตัวเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในกระบวนการสร้างตะกอนต่อไป โดยขั้นตอนการกวนเร็วเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง หากสารเคมีที่เติมลงไปไม่มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงในน้ำ กระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค จะไม่มีประสิทธิภาพและสารเคมีที่เติมลงไปนั้นน้ำแทนที่จะทำปฏิกิริยากับอนุภาค แต่อาจไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของน้ำแทน เช่น สารส้มทำปฏิกิริยากับความเป็นเบส เกิดเป็นตะกอน $Al(OH)_3$ ทำให้ต้องใช้สารเคมีในการสร้างตะกอนปริมาณที่มากขึ้น

2) การกวนช้า (Slow Mixing) เป็นขั้นตอนต่อจากการกวนเร็ว จำแนกได้ดังนี้

- (1) เป็นระบบรวบรวมตะกอนที่ถูกทำลายเสถียรภาพจากขั้นตอนการกวนเร็ว
- (2) เป็นการสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำ เพื่อให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพและเกิดเป็นตะกอนขนาดเล็ก มีการเคลื่อนที่และมีโอกาสสัมผัสกัน เกิดการเกาะติดก่อตัวให้มีน้ำหนักและขนาดเพิ่มขึ้น เรียกว่า ฟล็อก การควบคุมการลดหลั่นของความปั่นป่วนแกรเดียนต์ (G) จากมากลงมาน้อยเพื่อทำให้ฟล็อกเกิดการรวมตัวกันได้ดี และไม่ทำให้เกิดการแตกตะกอนก่อนหรือเกิดการแตกตัวของฟล็อก เนื่องจากความปั่นป่วนมากเกินไป ขั้นตอนนี้ควรคำนึงถึงลักษณะของสิ่งเจือปนหรืออนุภาคในน้ำรวมทั้งชนิดของสารเคมีที่ใช้ เพื่อทำให้เกิดฟล็อกขึ้น จึงจะทำให้การออกแบบการกวนช้า เพื่อให้ความปั่นป่วนแกรเดียนต์ลดหลั่นลงมาจากมากไปหาน้อยได้อย่าง

เหมาะสม การทดลองด้วยเครื่องจาร์เทสต์จึงมีส่วนช่วยในการศึกษาถึงความปั่นป่วนแกรเดียนที่เหมาะสมกับคุณภาพน้ำนั้นๆ และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอนได้

6. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จินตนา (2550) ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไครเรทจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีเพื่อปรับสภาพตัวดูดซับซึ่งตัวดูดซับที่ได้มีลักษณะเป็นผลและถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15% 20% 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่า พีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาการปั่นกววน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นสีย้อมไครเรทโดยทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่าประสิทธิภาพตัวดูดซับเป็นไปตามกลไกสมการการดูดซับของฟรุนลิชและแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงตัวดูดซับจากผักตบชวาสามารถกำจัดสีย้อมไครเรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กาญจนาทิศา (2531) ศึกษาการกำจัดความขุ่นของน้ำโดยใช้เมล็ดมะรุม โดยการเตรียมสารละลายจากเมล็ดมะรุมเข้มข้น 2% นำสารละลายดังกล่าวมาใช้ทดสอบเช่นเดียวกับสารตกตะกอนตัวอื่นๆ เพื่อหาปริมาณสารที่ใช้แน่นอน วิธีที่ใช้ในการทดสอบคือ การทำจาร์เทสต์ โดยทำการกววนเร็วที่ความเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 2 นาที และกววนช้าที่ความเร็วรอบ 17-18 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่มีช่วง > 15 ถึง 10,000 NTU สามารถกำจัดความขุ่นได้ภายในระยะเวลา 1-2 ชั่วโมง

อริศรา (2539) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำเสียโดยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ 1) การกำจัดสีโดยใช้สารส้ม 2) การกำจัดสีโดยการดูดซับ 3) การกำจัดสีโดยสารส้มร่วมกับการดูดซับ สารดูดซับที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ชนิดเกล็ด และขี้เถ้าลอย โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการกำจัดสีสังเคราะห์โดยสีที่ใช้เป็น สีที่ละลายน้ำได้ 4 ประเภท คือ สีเบสิก, สีไคแรท, สีรีแอคทีฟ และสีเอซิก โดยที่สีเอซิก สีไคแรท และสีรีแอคทีฟ มีประจุลบ และสีเบสิกมีประจุบวก ประสิทธิภาพในการกำจัดสี กำจัดสีโดยใช้สารส้มโดยสารส้มสามารถกำจัดสีในกลุ่มประจุลบได้มากกว่าร้อยละ 80 ยกเว้นสี Levafix Navy Blue ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 11.00 เมื่อมีการเติมสารลดสีชนิด Colfoc RD ร่วมกับสารส้ม สามารถกำจัดสี Levafix Navy Blue ได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 88.00 ส่วนสารส้มกำจัดสีประจุบวกได้น้อยมาก การกำจัดสีโดยใช้ถ่านเป็นตัวดูดซับพบว่าสามารถดูดซับสีในประจุบวก ได้ดีกว่าในประจุลบ ในขณะที่การกำจัดสีย้อมโดยใช้ขี้เถ้าลอย พบว่าสามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้นจากการใช้สารส้ม ส่วนที่สองเป็นการกำจัดสีจากโรงงาน

พอกย้อนพบว่า การกำจัดสีย้อมโดยใช้สารส้มมีประสิทธิภาพร้อยละ 67.7-72.8 ลดค่าซีโอดี (COD) ได้ร้อยละ 65.0-74.0 ส่วนการกำจัดสีโดยใช้วิธีอื่นๆ เช่น การใช้ถ่าน การใช้สารส้มร่วมกับถ่าน พบว่ามีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพ ส่วนการใช้จีเถ้าลอยซึ่งเป็นของเสียจากการเผาไหม้ สามารถกำจัดสีได้มาก แต่การใช้สารส้มร่วมกับจีเถ้าลอย พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีไม่ได้เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้สารส้มเพียงอย่างเดียว

อำนาจ (2546) ได้ศึกษาการใช้โพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับแกลบเผาขี้เถ้าอะลูมินา หรือ เถ้าลอย อย่างใดอย่างหนึ่ง ในการกำจัดสีน้ำกากส่า ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ใช้น้ำกากส่าที่ผ่านการกำจัดโดยบ่อบำบัดทางชีวภาพ โดยนำมาเจือจาง 5 เท่า ค่าความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 900 – 1200 เอสยู และน้ำกากส่าที่ไม่ผ่านการกำจัดโดยกระบวนการชีวภาพ ความเข้มข้นประมาณ 1300 – 1500 เอสยู พบว่า การใช้โพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ 8 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 94.64 สำหรับน้ำที่ผ่านการกำจัดทางชีวภาพแล้ว และใช้โพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์ 10 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 65.89 สำหรับน้ำที่ไม่ผ่านการกำจัดทางชีวภาพ

Harrelkas *et al.* (2009) ศึกษาการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานพอกย้อมโดยใช้โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชัน ร่วมกับกานูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชัน(CF) คือ พีเอช 5 , สารละลาย $Al_2(SO_4)_3$ ใช้ในการตกตะกอน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการสร้างตะกอน ซึ่งสามารถลดค่าซีโอดีและความเข้มข้นสีจากน้ำทิ้งได้ อีกทั้ง การใช้วิธีการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกกูเลชันร่วมกับไมโครฟิวเตรชัน (MF) หรืออัลตราฟิวเตรชัน (UF) และการดูดซับด้วยผงถ่านกัมมันต์ โดย CF/MF, CF/UF, และ CF/PAC สามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 37, 42 และมากกว่าร้อยละ 80 ตามลำดับ และสามารถลดความเข้มข้นของสีได้ถึงร้อยละ 65, 74 และ 50 ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น Spectrum SP-1105
- 1.2 เครื่องวัด pH รุ่น model 410 บริษัท Thermo Orion., USA
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด อ่านค่าละเอียด 0.0001 g รุ่น WB-0250003 บริษัท KERM & Sohn GmbH
- 1.4 เครื่องเขย่า (shaker) รุ่น Model VRN-480 บริษัท Gemmy Industrial Corp.
- 1.5 ตู้อบ (Oven) รุ่น OF-11E บริษัท JEIO TECH, KOREA
- 1.6 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน บริษัท whatman
- 1.7 เดสซิเคเตอร์ (Dessicator)
- 1.8 ใบพัด และ มอเตอร์
- 1.9 เครื่องปั่นละเอียด
- 1.10 เครื่องแก้วต่างๆที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด

2. สารเคมี

2.1 สารละลายสีย้อมมาตรฐาน 9 สี ได้แก่ 6% Super Black G, 2% Turquoise H-GN, 2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 2% Orange LS-BR, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R และ 2% Br.Blue LS-G

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

2.3 สารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl)

3. วัสดุชุดขับ

3.1 พงเมทีคมะรุม

3.2 ถ่านบิพูมินัสเชิงพาณิชย์

วิธีการ

1. การเตรียมสารละลาย

1.1 การเตรียมสารละลายสีย้อมมาตรฐาน เข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซังสีย้อมมาตรฐานแต่ละสี (มีทั้งหมด 9 สี ดังแสดงในตารางที่ 3) 0.01 กรัม ใส่ในบีกเกอร์แต่ละใบละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตรแต่ละใบจะได้สารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละสีเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองเช่นเดียวกัน แต่ซังสีย้อมมาตรฐานแต่ละสี 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 กรัม จะได้สารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละสีเข้มข้น 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 สารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละสีที่เตรียมได้

1.2 การเตรียมสารละลายสีย้อมผสม ชนิดที่ 1

นำสารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละสีเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาตรเท่ากัน ทุกสี กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน และนำสารละลายสีย้อมผสมที่เตรียมได้ใช้ในการศึกษาทดลอง เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ แทนน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง

1.3 การเตรียมสารละลายสีย้อมผสม ชนิดที่ 2

นำสารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละสีเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปริมาตรเท่ากัน ทุกสี แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.2

2. การเตรียมตัวดูดซับผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิฐมินัสเชิงพาณิชย์

2.1 ผงเมล็ดมะรุม เตรียมโดย นำฝักมะรุมที่แก่จัดมาแกะเอาเมล็ดออกจากเปลือกหุ้มเมล็ด จากนั้นนำเมล็ดมาตากแดดจนกระทั่งเมล็ดแห้งสนิท แล้วอบที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออก นำเมล็ดที่แห้งแล้ว มาบดด้วยเครื่องปั่นจนเป็นผงละเอียด จากนั้นเก็บไว้ในเดสซิเคเตอร์ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

2.2 ถ่านบิฐมินัสเชิงพาณิชย์ เตรียมโดย นำถ่านบิฐมินัสเชิงพาณิชย์มาอบที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นเก็บไว้ในเดสซิเคเตอร์ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมผสม

เตรียมสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเตรียมดังวิธีการในข้อ 1.1 จากนั้นนำสารละลายสีย้อมผสม มาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ที่ค่าความยาวคลื่น 400, 420, 434, 546, 588, 594, 616, 662 และ 666 นาโนเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 3 สีย้อม (Reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง 9 ชนิด และค่าความยาวคลื่นที่แต่ละสีดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด

Dyes	λ_{max} (nm)
 6% Super Black G	594
 2% Turquoise H-GN	662
 2% Yellow LS-4G	420
 2% Yellow LS-R-01	400
 2% Orange LS-BR	434
 4% Navy LS-G	616
 2% Red LS-B	546
 2% Blue LS-3R	588
 2% Br.Blue LS-G	666

4. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์

ในการศึกษาได้ใช้สารละลายสีย้อมผสมชนิดที่ 1 ในการทดลอง และปัจจัยที่ทำการศึกษาเพื่อให้ได้สถานะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและ ถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์ มีดังนี้

4.1 ศึกษาปริมาณผงเมล็ดมะรุมเริ่มต้น

ชั่งผงเมล็ดมะรุมปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัมต่อสารละลายสีย้อมผสมชนิดที่ 1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400, 420, 594, 616, 434, 588, 546, 666 และ 662 นาโนเมตรตามลำดับ และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของผงเมล็ดมะรุม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกับผงเมล็ดมะรุม

4.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

ชั่งผงเมล็ดมะรุมในปริมาณเท่ากับที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1 ต่อสารละลายสีย้อมผสม 50 มิลลิลิตรที่มีการปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 4, 5, 7 และ 8 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1 และนำถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.3 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.2 โดยปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดจากการทดลองข้อ 4.2 และแปรผันความเร็วรอบการเขย่าเป็น 0, 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที และนำถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเขย่า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.3 โดยเขย่าที่ความเร็วรอบเท่ากับความเร็วรอบที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดจากการทดลองข้อ 4.3 และแปรผันระยะเวลาเขย่าเป็น 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที และนำถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.5 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.4 โดยระยะเวลาเขย่านานเท่ากับระยะเวลาที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดจากการทดลอง ข้อ 4.4 และแปรผันระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเป็น 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที และนำถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.6 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.5 โดยระยะเวลาเข้าสู่สมดุลนานเท่ากับระยะเวลาที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดจากการทดลองข้อ 4.5 และแปรผันความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสมเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงเมสคัมมูร์ที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มในการดูดซับสีข้อม

ชั่งผงเมสคัมมูร์ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.6 โดยตั้งทิ้งไว้นานเท่ากับระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดจากการทดลองข้อ 4.6 และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิชและนำถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐาน ด้วยผงเมล็ดมะรุม และถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

ทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม โดยชั่งผงเมล็ดมะรุมในปริมาณเท่ากับที่ให้ร้อยละการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.7 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.7 โดยทำการทดลอง 7 ชั่วโมง

5. การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง และวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง หลังผ่านการกำจัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยทำความสะอาดภาชนะเก็บตัวอย่างน้ำขนาด 20 ลิตร ด้วยตัวอย่างน้ำทิ้ง 1-2 ครั้ง ก่อนจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำใส่ภาชนะเก็บน้ำ นำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณสีข้อมและดัชนีคุณภาพน้ำ 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)

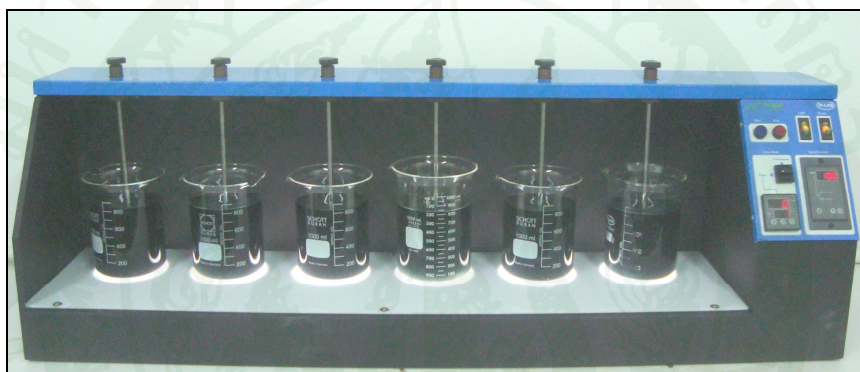
6. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

นำน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง มาทดลองใช้ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ โดยชั่งผงเมล็ดมะรุมในปริมาณเท่ากับที่ให้ร้อยละการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.8 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.8 โดยทำการทดลอง 7 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำทิ้งที่ผ่านการดูดซับด้วยผงเมล็ดมะรุม มาวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำหลังการดูดซับ สำหรับถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ทำการทดลองเช่นเดียวกับผงเมล็ดมะรุม

7. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้วิธีจาร์เทสต์

ในการศึกษาใช้สารละลายสีข้อมผสมชนิดที่ 2 ในการศึกษา

7.1 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้วิธีจาร์เทสต์ ดังแสดงในภาพที่ 30 ในที่นี้ประยุกต์ใช้ผงเมล็ดมะรุม เพื่อหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม (optimum dose) และค่าพีเอชที่เหมาะสม (optimum pH) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพที่ 30 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้วิธีจาร์เทสต์

7.1.1 ศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมโดยใช้ผงเมล็ดมะรุมในการตกตะกอนแบบหยาบ

1) นำสารละลายสีข้อมผสม ปริมาตร 800 มิลลิลิตร มาเติมลงใน ปีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

2) กวนสารละลายสีข้อมผสมด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 นาที เพื่อให้ตัวอย่างน้ำผสมเข้ากันเป็นอย่างดี

3) เติมสารสร้างตะกอนที่ต้องการทดสอบ (ผงเมล็ดมะรุม) ลงในน้ำตัวอย่างโดยศึกษาที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5-2 กรัม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4) กวนเร็วด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 นาที เพื่อให้ น้ำตัวอย่างและสารสร้างตะกอนผสมเข้ากันเป็นอย่างดี

5) กวนช้าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที และความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที

6) ปล่อยให้เกิดการตกตะกอนโดยตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นนำมากรองด้วยผ้าขาวบางที่เตรียมไว้และนำสารละลายที่กรองได้มาวิเคราะห์ ความเข้มข้นของแต่ละสีย้อม ค่าพีเอช และความขุ่น

7) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบละเอียดต่อไป

7.1.2 ศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 7.1.1 โดยการปรับค่าพีเอชในน้ำตัวอย่างตั้งแต่ช่วงพีเอช 4-8 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน

7.1.3 ศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการตกตะกอนแบบละเอียด

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 7.1.2 โดยการเติมสารสร้างตะกอนที่ต้องการทดสอบลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้ผงเมล็ดมะรุมที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดข้อ 7.1.1 ลงในสารละลายสีย้อมผสมที่ระดับความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการตกตะกอนแบบละเอียด

7.2 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยดู อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้วิธีจาร์เจสต์ โดย

ทำการศึกษาทดลองเช่นเดียวกันกับ ข้อ 7.1 จากนั้นนำน้ำที่ผ่านกระบวนการกำจัดแล้วมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการกำจัด

8. ศึกษาประสิทธิภาพเพื่อการประยุกต์ใช้งานจริงในการกำจัดสีย้อมโดยใช้ผงเมล็ดมะรุมเป็นสารสร้างตะกอน

8.1 ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์

นำสารละลายสีย้อมผสมชนิดที่ 2 ปริมาตร 20 ลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้อยู่ผลการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองข้อ 4.2 ทำการทดลองโดยศึกษาที่ปริมาณตั้งแต่ 5-45 กรัม โดยใช้ใบพัดปั่นกวนเร็วเป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ น้ำเสียสังเคราะห์ผสมเข้ากันเป็นอย่างดี จากนั้นเติมสารสร้างตะกอนลงไป (ผงเมล็ดมะรุม) และใช้ใบพัดปั่นกวนเร็วเป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ น้ำเสียสังเคราะห์และสารสร้างตะกอนผสมเข้ากันเป็นอย่างดี จากนั้นใช้แท่งแก้วปั่นกวนช้าเป็นเวลา 10 นาที และปล่อยให้เกิดการตกตะกอนโดยตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นนำมากรองด้วยผ้าขาวบางและนำสารละลายที่กรองได้มาวิเคราะห์ ความเข้มข้นของแต่ละสีย้อม ค่าพีเอช ความขุ่นและประสิทธิภาพการกำจัด ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

8.2 ทดลองกับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

นำน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ปริมาตร 20 ลิตร ลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้อยู่ระหว่างการดูคซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองข้อ 4.2 ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 8.1 จากนั้นนำน้ำที่ผ่านกระบวนการกำจัดสีย้อมแล้วมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการกำจัดและประสิทธิภาพการกำจัด

สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือน กันยายน พ.ศ. 2553 ถึง กันยายน พ.ศ. 2554

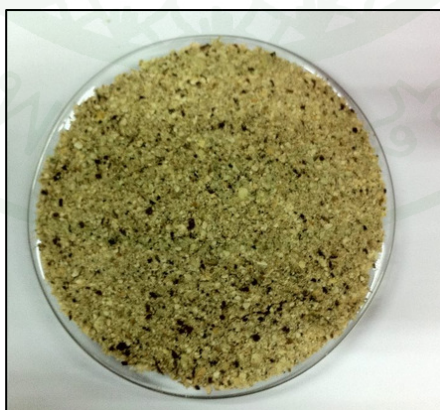
ผลและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมผ้า 9 ชนิด ในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง โดยใช้ผงจากเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์ เป็นตัวดูดซับ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช, ความเร็วรอบการเขย่า, ระยะเวลาการเขย่า, ระยะเวลาสัมผัส, ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสม, ปริมาณตัวดูดซับ และวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ตอนที่ 2 เป็นการทดลองด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยวิธีจารทดสอบ และการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ได้ผลการทดลองดังนี้

1. ลักษณะของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

1.1 ผงเมล็ดมะรุม

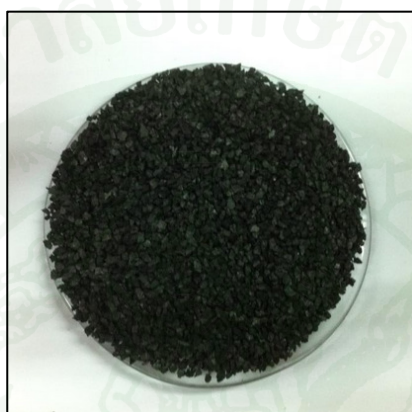
นำฝักมะรุมที่แก่จัดมาแกะเอาเมล็ดออกจากเปลือกหุ้มเมล็ด จากนั้นนำเมล็ดมาตากแดดจนกระทั่งเมล็ดแห้งสนิท แล้วอบที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก นำเมล็ดที่แห้งแล้วมาปั่นด้วยเครื่องปั่นจนเป็นผงละเอียด พบว่า ผงเมล็ดมะรุมที่เตรียมได้ มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อนปนน้ำตาลอ่อน มีความละเอียดปานกลาง ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ผงเมล็ดมะรุม

1.2 ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

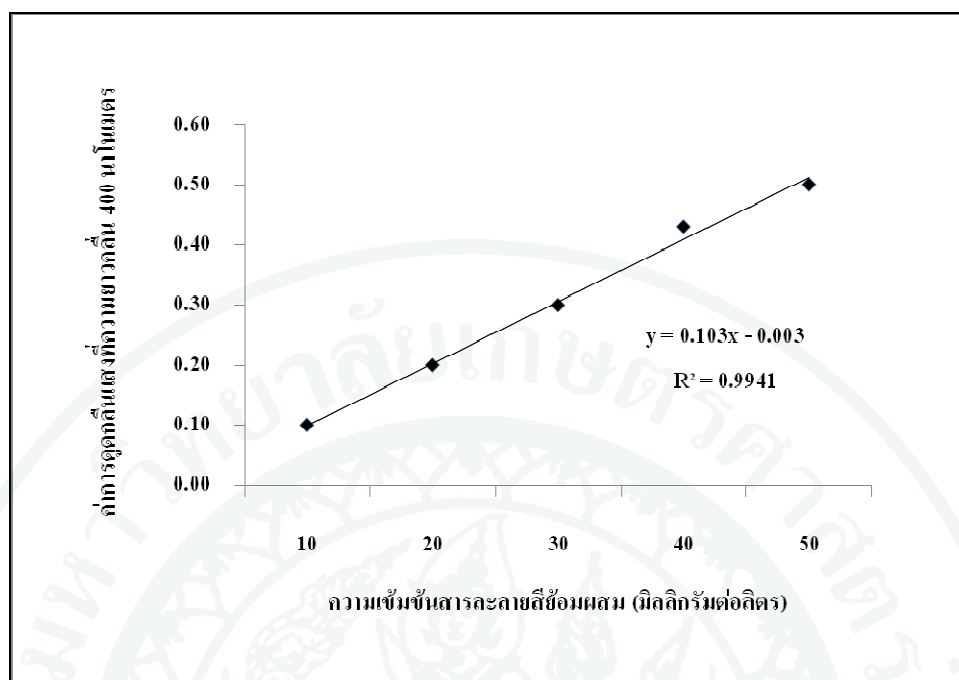
ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ก่อนนำมาใช้ในการทดลองต้องนำมาอบที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นเกล็ดสีดำ มีความมันวาว ค่าพีเอชของถ่านพบว่า ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มีพีเอชประมาณ 9-10 ดังแสดงในภาพที่ 33



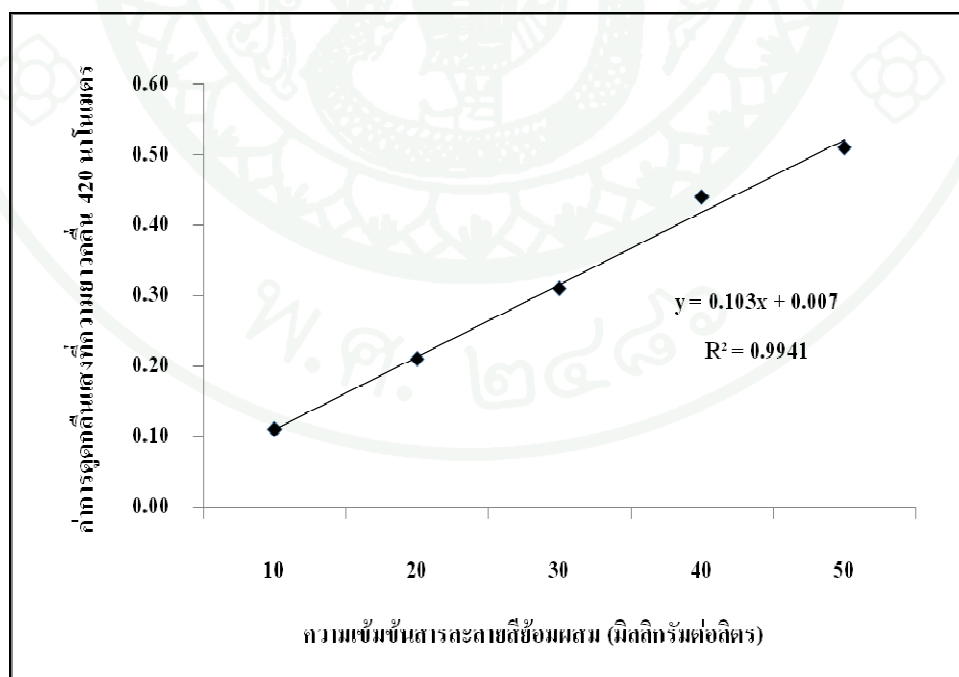
ภาพที่ 33 ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

2. กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสม

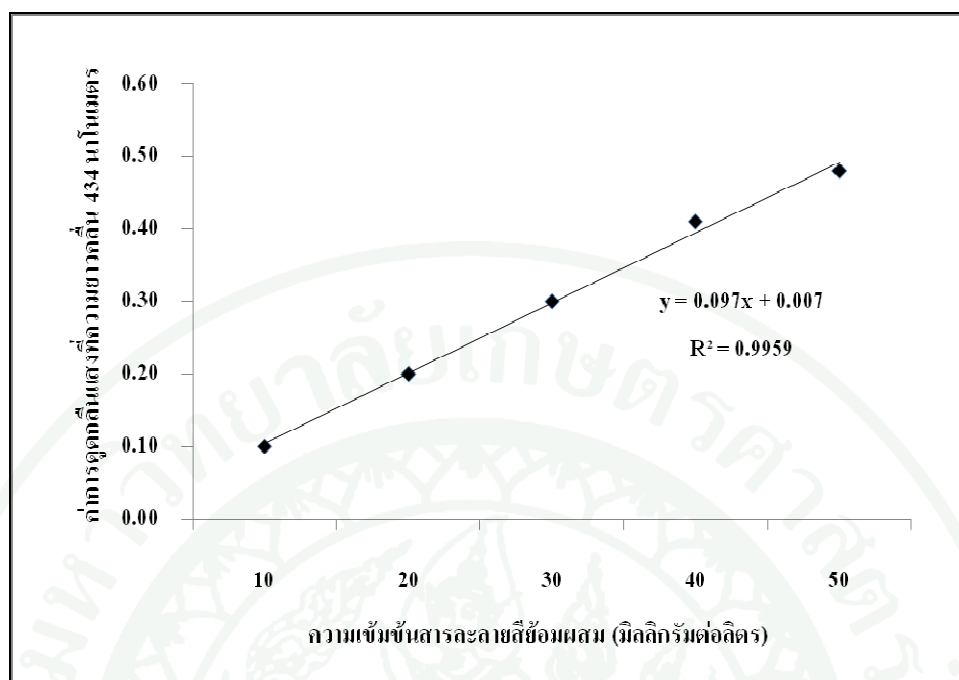
ทดลองโดยเตรียมสารละลายสีข้อมผสม ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายสีข้อมมาตรฐานแต่ละสี แต่ละความเข้มข้น มาปริมาตรเท่ากันทุกสี กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม จากนั้นนำมาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ที่ค่าความยาวคลื่น 400, 420, 434, 546, 588, 594, 616, 662 และ 666 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อเขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมผสม (แกนนอน) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสารละลายสีข้อมผสม มีค่าเท่ากับ 0.9941, 0.9941, 0.9959, 0.9982, 0.9959, 0.9980, 0.9985, 0.9987 และ 0.9959 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ดังแสดงในภาพที่ 34-42



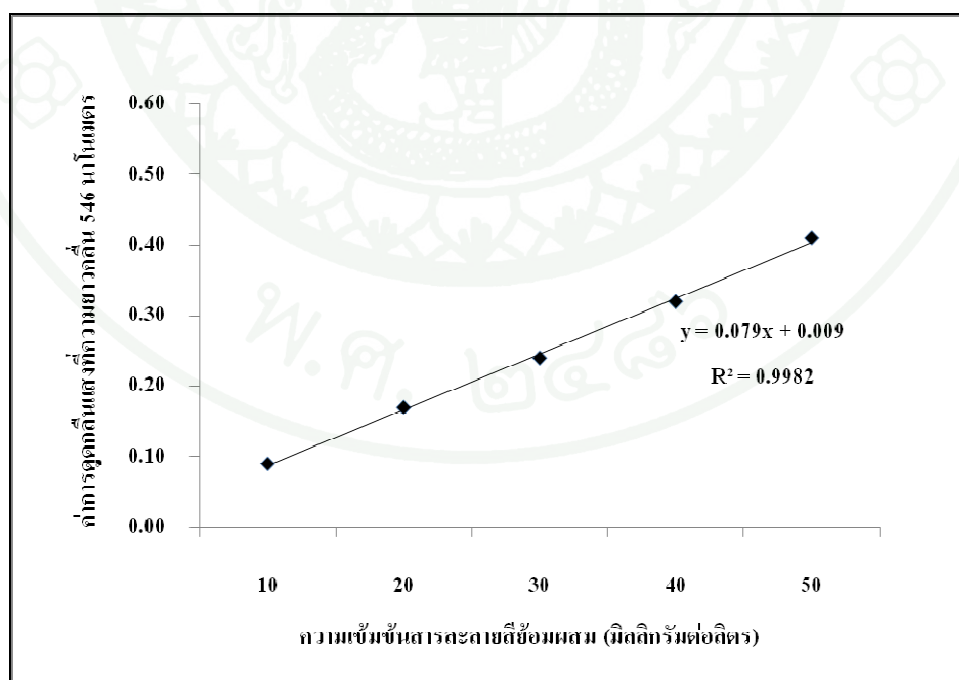
ภาพที่ 34 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



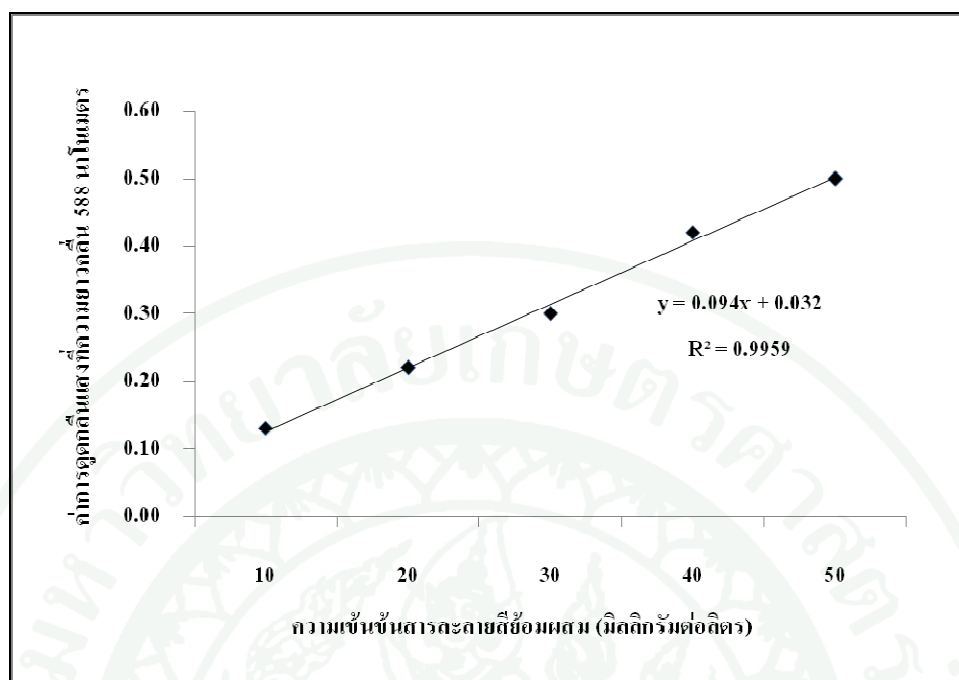
ภาพที่ 35 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร



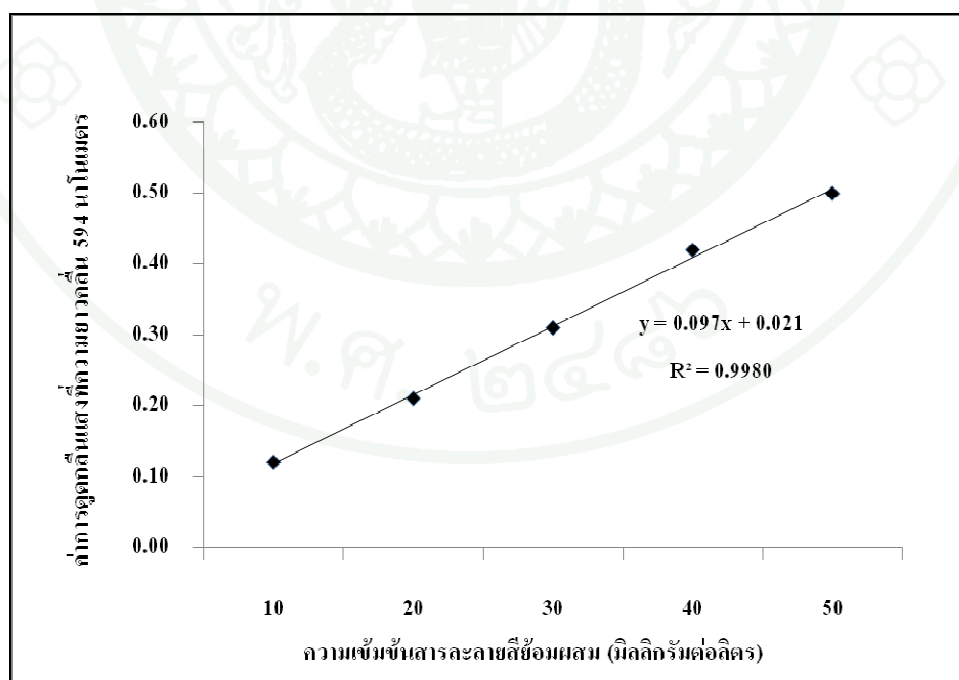
ภาพที่ 36 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร



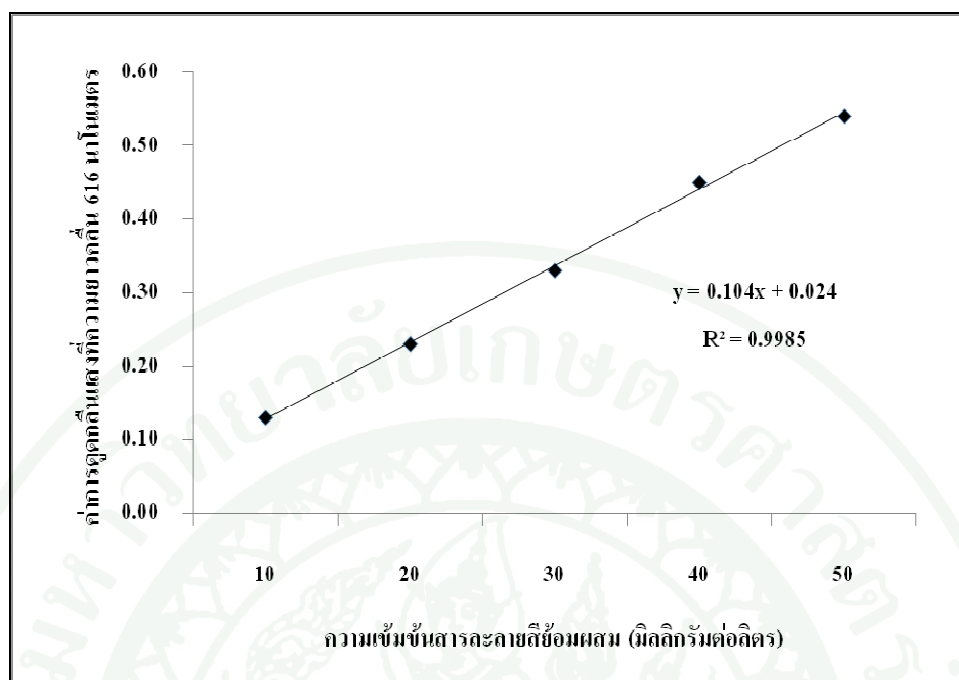
ภาพที่ 37 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร



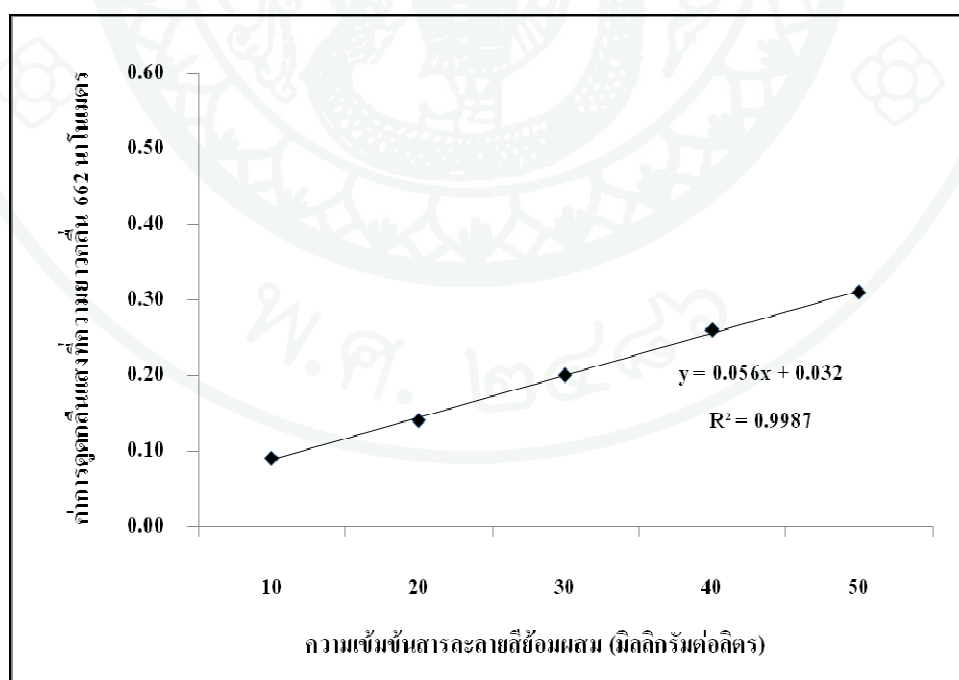
ภาพที่ 38 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร



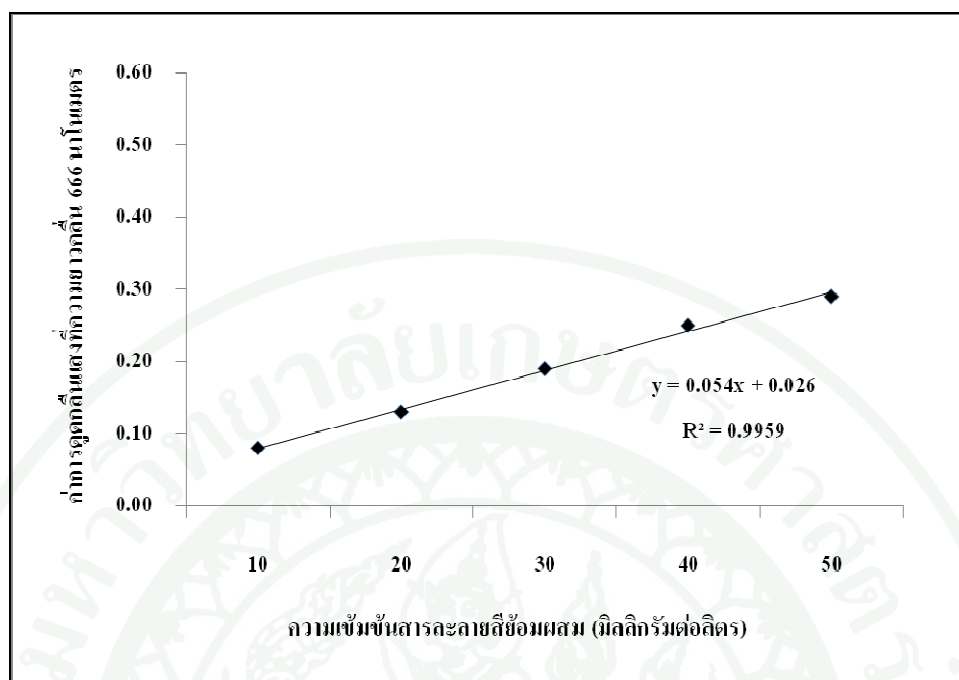
ภาพที่ 39 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร



ภาพที่ 40 กราฟมาตรฐานของสารละลายที่ผสมที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร



ภาพที่ 41 กราฟมาตรฐานของสารละลายที่ผสมที่ความยาวคลื่น 662 นาโนเมตร



ภาพที่ 42 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมผสมที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร

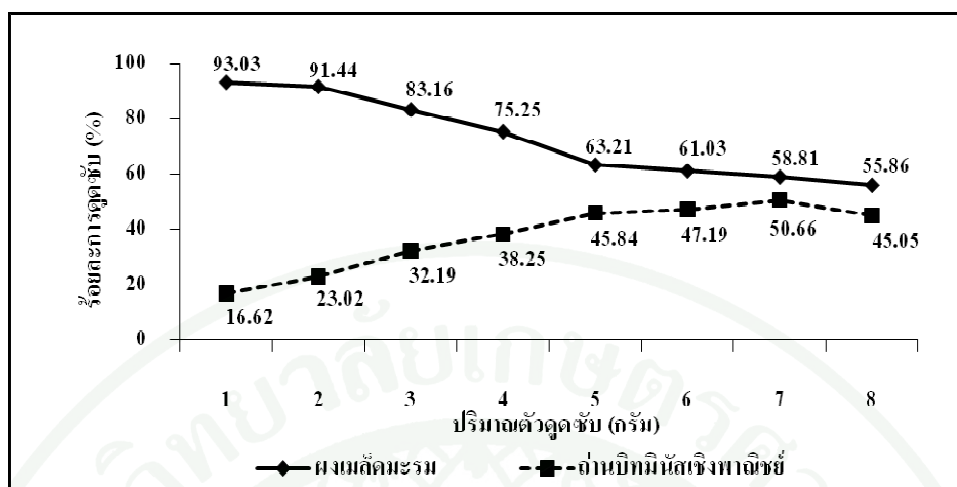
3. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอตตง ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์

3.1 ศึกษาปริมาณเริ่มต้น

จากการทดลองในข้อที่ 4.1 ได้นำผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัม ต่อสารละลายสีข้อมผสม 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นกรองสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400, 420, 594, 616, 434, 588, 546, 666 และ 662 นาโนเมตร มีผลการทดลองดังนี้

ผลการทดลองพบว่า ผงเมล็ดมะรุมมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมได้ทั้ง 9 ชนิด และประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับมีมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 43 และตารางที่ 4 จะพบว่าผงเมล็ดมะรุม ที่ปริมาณ 1 กรัม ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมสูงสุดคือ ร้อยละ 93.03 ดังนั้นจึงเลือกใช้ผงจากเมล็ดมะรุมที่ปริมาณ 1 กรัมมาใช้ในการศึกษาและทดลองปัจจัยอื่นๆต่อไป

ผลการทดลองพบว่า ถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมได้ทั้ง 9 ชนิด และประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับมีมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 36 และตารางที่ 3 จะพบว่าถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ ที่ปริมาณ 7 ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมสูงสุดคือ ร้อยละ 50.66 ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ที่ปริมาณ 7 กรัม มาใช้ในการศึกษาและทดลองปัจจัยอื่นๆต่อไป



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเริ่มต้นต่อร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุ้มและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

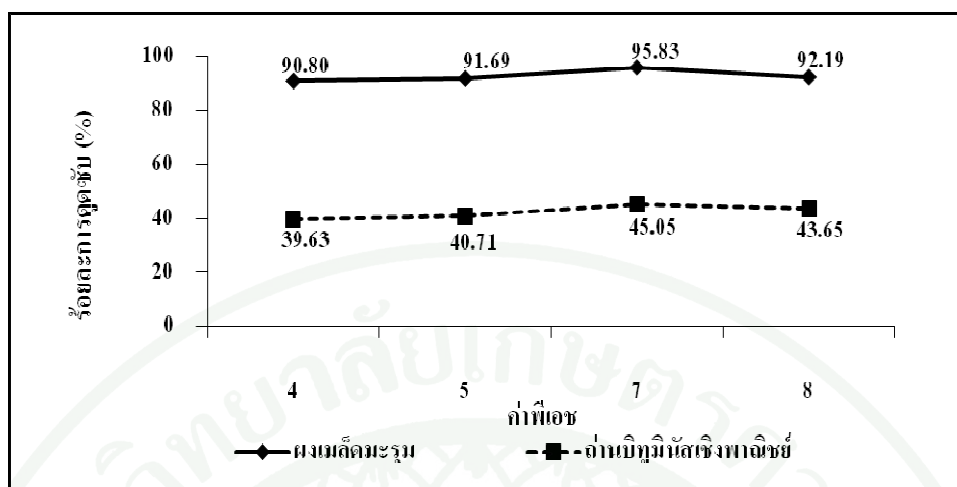
ตารางที่ 4 อิทธิพลของปริมาณเริ่มต้นต่อร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุ้มและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับสีของ ผงเมล็ดมะรุ้ม	ร้อยละการดูดซับสีของ ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์
1	93.03	16.62
2	91.44	23.02
3	83.16	32.19
4	75.25	38.25
5	63.21	45.84
6	61.03	47.19
7	58.81	50.66
8	55.86	45.05

3.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

จากการทดลองในข้อที่ 4.1 ทำให้ทราบปริมาณผงเมล็ดมะรุมและปริมาณถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์ที่เหมาะสมคือ ผงเมล็ดมะรุมปริมาณ 1 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมได้สูงสุดร้อยละ 93.03 และ ถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์ปริมาณ 7 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมได้สูงสุดร้อยละ 50.66 จากนั้นนำค่าปริมาณที่เหมาะสมมาศึกษาอิทธิพลของพีเอช โดยการนำสารละลายสีข้อมผสม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 4, 5, 7 และ 8 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1 มีผลการทดลองดังนี้

ผลการทดลองพบว่า เมื่อค่าพีเอชของสารละลายสีข้อมผสมสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมมาตรฐานผสมก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยพบว่าที่พีเอช 7 ผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีข้อมได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 6% Super Black G (98.63) และ (49.31), 2% Turquoise H-GN (98.97) และ (35.56), 2% Yellow LS-4G (91.87) และ (51.52), 2% Yellow LS-R-01 (90.00) และ (50.60), 2% Orange LS-BR (92.00) และ (48.72), 4% Navy LS-G (98.11) และ (50.64), 2% Red LS-B (97.5) และ (41.88), 2% Blue LS-3R (97.92) และ (47.52) และ 2% Br.Blue LS-G (97.5) และ (29.76) ตามลำดับ และมีค่าการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดคือ ร้อยละ 95.83 และ 45.05 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมก็จะมีค่าลดลงดังแสดงในภาพที่ 44 และตารางที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการดูดซับสีข้อมจะพบว่าผงเมล็ดมะรุมจะมีค่าร้อยละการดูดซับสีข้อมที่มากกว่าถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์อาจจะอธิบายได้ว่าสีข้อมที่ใช้ในการทดลองซึ่งเป็นสีชนิด (Reactive Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นเบส และอยู่ในรูปของแอนไอออน ส่วนผงเมล็ดมะรุมจะประกอบไปด้วยสารจำพวก Polyelectrolyte เช่น สารจำพวกวิตามินและกรดอะมิโน ดังแสดงในตารางที่ 1 จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างไอออนของโมเลกุล ทั้งนี้ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ที่พีเอชต่ำ ในสารละลายจะมีโปรตอนเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับแสดงอำนาจไฟฟ้าบวก ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของสารละลายสีข้อมมาตรฐาน เกิดการถูกยึดจับด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้า และเมื่อสารละลายมีพีเอชเพิ่มขึ้น มีผลทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปแย่งจับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีอำนาจไฟฟ้าเป็นประจุลบ ส่งผลให้เกิดแรงผลักรันระหว่างโมเลกุลของสารละลายสีข้อมมาตรฐานและตัวดูดซับ ทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการลดจำนวนเชื้อด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

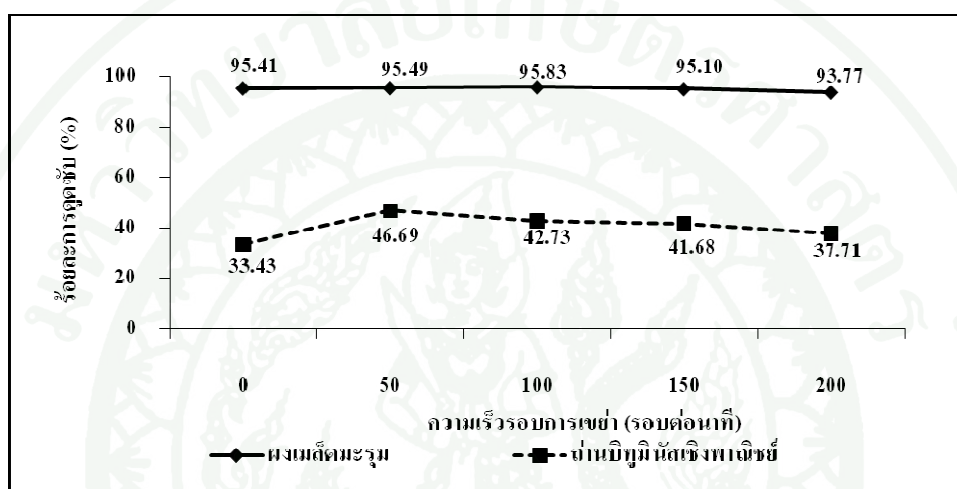
ตารางที่ 5 อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการลดจำนวนเชื้อด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าพีเอช	ร้อยละการลดจำนวนของ ผงเมล็ดมะรุม	ร้อยละการลดจำนวนของ ถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์
4	90.80	39.63
5	91.69	40.71
7	95.83	45.05
8	92.19	43.65

3.3 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่า

จากการทดลองในข้อที่ 4.3 เมื่อแปรผันความเร็วรอบการเขย่าเป็น 0, 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที ผลการทดลอง พบว่า ผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์สามารถลดจำนวนเชื้อได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 6% Super Black G (98.63)และ(48.37), 2% Turquoise H-GN (98.97)และ(39.08), 2% Yellow LS-4G (91.87)และ(52.38), 2% Yellow LS-R-01 (90.00)และ(52.05), 2% Orange LS-BR (92.00)และ(50.31), 4% Navy LS-G (98.11)และ(49.38), 2% Red LS-

B (97.5)และ(45.53), 2% Blue LS-3R (97.92)และ(47.33)และ 2% Br.Blue LS-G (97.5)และ(35.80) ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับสีของในสารละลายสีของผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบการปั่นกวนเพิ่มขึ้น โดยพบว่าผงเมล็ดมะรุมที่ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบต่อนาที มีค่าการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดคือ ร้อยละ 95.83 ขณะที่ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ที่ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที มีค่าการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดคือ ร้อยละ 46.70 จากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีของก็จะมียาลดลง ดังแสดงในภาพที่ 45 และตารางที่ 6



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

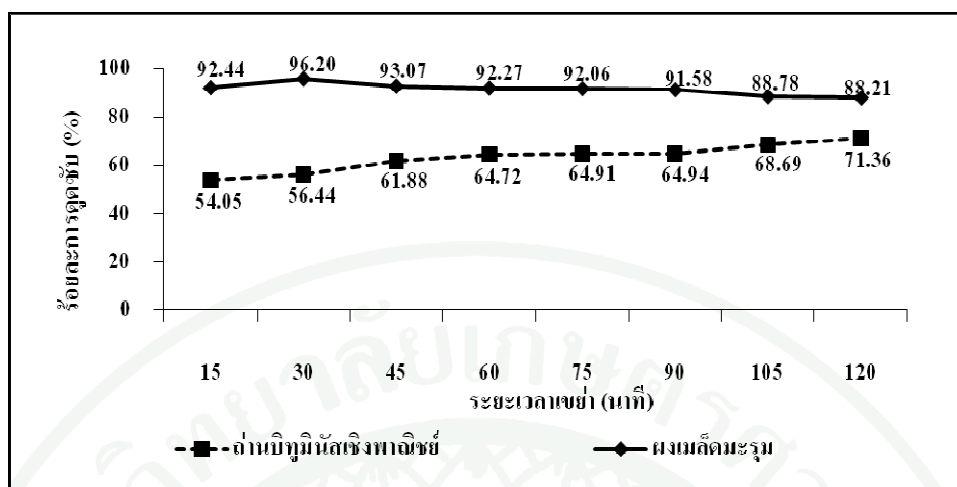
ตารางที่ 6 อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ความเร็วรอบการเขย่า (รอบต่อนาที)	ร้อยละการดูดซับสีของของผงเมล็ดมะรุม	ร้อยละการดูดซับสีของของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์
0	95.41	33.43
50	95.49	46.69
100	95.83	42.73
150	95.10	41.68
200	93.77	31.71

อธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบการเขย่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเมื่อความเร็วรอบการเขย่าสูง จะทำให้ความหนาชั้นฟิล์มของน้ำลดลง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วขึ้นจนถึงระยะเวลาหนึ่งที่พื้นผิวของตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับ ในขณะที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวตัวดูดซับได้อีก จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง (นิพนธ์ และคณะ, 2550)

3.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเขย่า

จากการทดลองในข้อที่ 4.4 แปรผันระยะเวลาเขย่าเป็น 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาเขย่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาเขย่าที่นานทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มในน้ำลดลง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปกระบวนการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล (อัตราการดูดเท่ากับอัตราการคาย) โดยพบว่า พงเมลิคมะรุุมและถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 6% Super Black G (94.67) และ (73.33), 2% Turquoise H-GN (98.77) และ (68.89), 2% Yellow LS-4G (92.31) และ (67.28), 2% Yellow LS-R-01 (90.38) และ (74.14), 2% Orange LS-BR (95.83) และ (74.82), 4% Navy LS-G (98.61) และ (74.36), 2% Red LS-B (100.00) และ (69.92), 2% Blue LS-3R (97.78) และ (72.79) และ 2% Br.Blue LS-G (97.44) และ (66.67) ตามลำดับ พงเมลิคมะรุุมที่ระยะเวลาการเขย่า 30 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมสูงสุดโดยมีค่าการดูดซับเฉลี่ยคือ ร้อยละ 96.20 และถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ที่ระยะเวลาการเขย่า 120 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมสูงสุด โดยมีค่าการดูดซับเฉลี่ยคือ ร้อยละ 71.36 ดังแสดงในภาพที่ 46 และตารางที่ 7



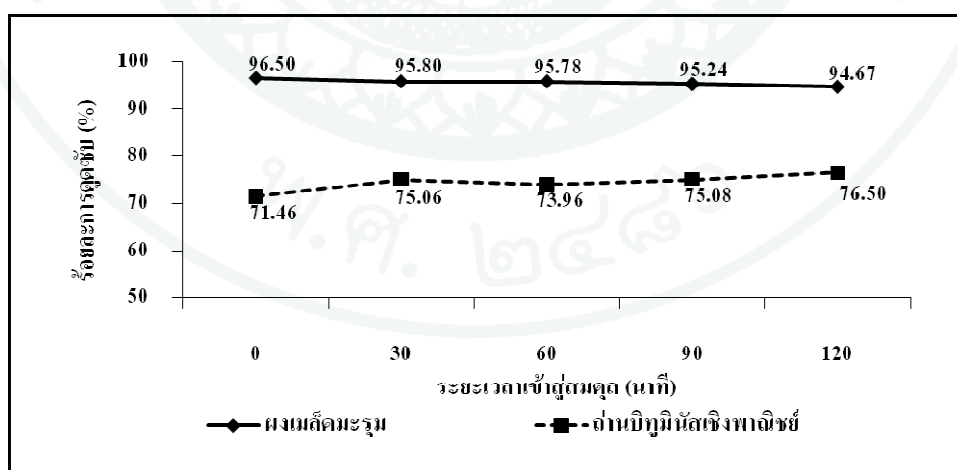
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาแช่กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 7 อิทธิพลของระยะเวลาแช่ต่อร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ระยะเวลาแช่ (นาที)	ร้อยละการดูดซับสีของ ผงเมล็ดมะรุม	ร้อยละการดูดซับสีของ ถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์
15	92.44	54.05
30	96.20	56.44
45	93.07	61.88
60	92.27	64.72
75	92.06	64.91
90	91.58	64.94
105	88.78	68.69
120	88.21	71.36

3.5 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

จากการทดลองในข้อที่ 4.5 แปรผันระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเป็น 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ผลการทดลองพบว่า ผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 6% Super Black G (97.87)และ(77.33), 2% Turquoise H-GN (100.00)และ(70.11), 2% Yellow LS-4G (96.15)และ(75.29), 2% Yellow LS-R-01 (91.03)และ(80.61), 2% Orange LS-BR (93.88)และ(77.56), 4% Navy LS-G (98.00)และ(77.36), 2% Red LS-B (98.20)และ(73.33), 2% Blue LS-3R (97.04)และ(74.83)และ 2% Br.Blue LS-G (96.30)และ(69.14) ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมมีค่าลดลง ซึ่งระยะเวลาเริ่มต้นนี้พื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่มาก ทำให้มีอัตราการดูดซับมีมากขึ้น จนถึงระยะเวลานึ่งบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมไปด้วยตัวถูกดูดซับ (สารละลายสีย้อมผสม) ซึ่งตัวดูดซับจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับลดลง (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมที่ระยะเวลาสัมผัส 0 นาที มีค่าการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดคือ ร้อยละ 96.50 ขณะที่ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที มีค่าการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดคือ ร้อยละ 76.5 แต่เนื่องจากค่าการดูดซับที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 120 นาที และ 30 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันมาก และเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและระยะเวลาในการทดลองจึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัสที่ 30 นาที ซึ่งมีค่าการดูดซับเฉลี่ยคือ ร้อยละ 75.06 ดังแสดงในภาพที่ 47 และตารางที่ 8



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุลกับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

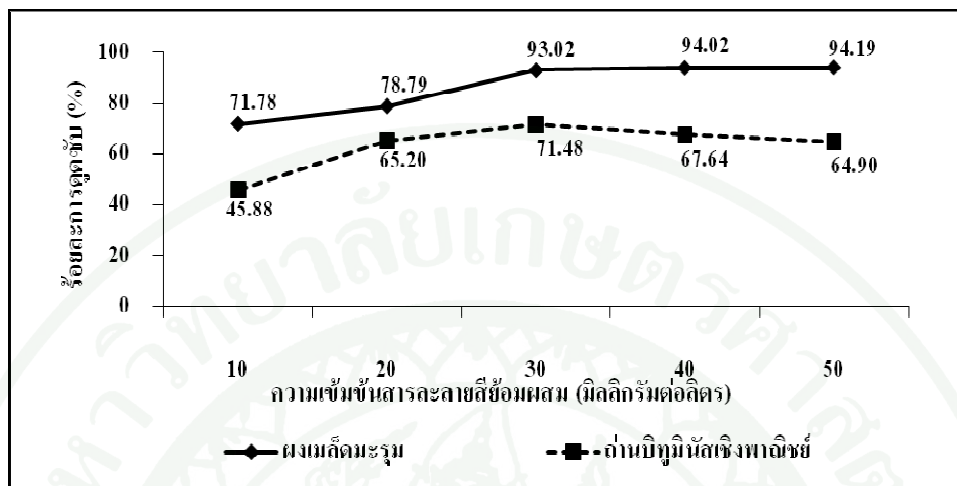
ตารางที่ 8 อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (นาที)	ร้อยละการดูดซับสีของ ผงเมล็ดมะรุม	ร้อยละการดูดซับสีของ ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์
0	96.50	71.46
30	95.80	75.06
60	95.78	73.96
90	95.24	75.08
120	94.67	76.50

3.6 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีของผสม

จากการทดลองในข้อที่ 4.6 แปรผันความเข้มข้นสารละลายสีของผสมเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีของได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 6% Super Black G (93.83)และ(74.71), 2% Turquoise H-GN (92.60)และ(53.33), 2% Yellow LS-4G (90.00)และ(67.62), 2% Yellow LS-R-01 (82.22)และ(68.69), 2% Orange LS-BR (89.29)และ(72.04), 4% Navy LS-G (96.43)และ(76.34), 2% Red LS-B (98.41)และ(77.38), 2% Blue LS-3R (94.44)และ(77.42)และ 2% Br.Blue LS-G (100.00)และ(75.76) ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีของผสมมีค่าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีของก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงระยะหนึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีของก็จะมีค่าลดลง ทั้งนี้การที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้น พื้นผิวของตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น ในขณะที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นผิวของตัวดูดซับได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)โดยพบว่าความเข้มข้นที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผงเมล็ดมะรุมมีประสิทธิภาพการดูดซับสีของในสารละลายสีของผสมสูงสุด โดยมีค่าการดูดซับเฉลี่ยคือ ร้อยละ 94.19 แต่เนื่องจากที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดซับเฉลี่ยคือ ร้อยละ 93.02 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แตกต่างกันมากและเพื่อเป็นการประหยัดสารละลายสีของผสม ในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกความเข้มข้นที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ถ่านบิโหมินัสเชิง

พลาสม่าที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมสูงสุด โดยมีค่าการดูดซับเฉลี่ยคือ ร้อยละ 71.48 ดังแสดงในภาพที่ 48 และตารางที่ 9



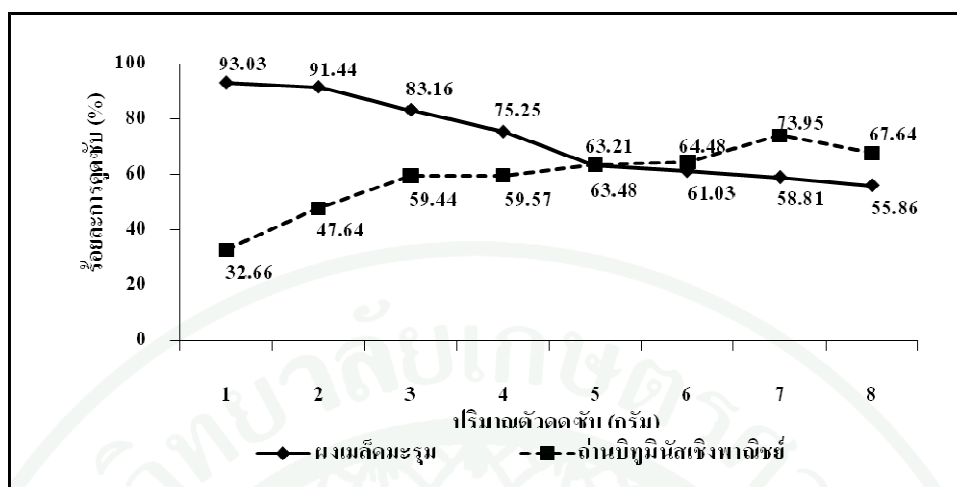
ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสมกับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 9 อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสมต่อร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับสีข้อม ของผงเมล็ดมะรุม	ร้อยละการดูดซับสีข้อม ของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์
10	71.78	45.88
20	78.79	65.20
30	93.02	71.48
40	94.03	67.64
50	94.19	64.90

3.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงเม็ลต์มะรุุมและถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสม

จากการทดลองในข้อที่ 4.7 ผงเม็ลต์มะรุุมทดลองโดยใช้สารละลายสีข้อมผสมชนิดที่ 1 ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้ปริมาณผงเม็ลต์มะรุุม 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 0 นาที และถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ทดลองโดยใช้สารละลายสีข้อมผสมชนิดที่ 2 ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้ปริมาณถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 120 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 30 นาที จากการทดลองดังกล่าว พบว่า ผงเม็ลต์มะรุุมและถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีข้อมได้ทั้ง 9 ชนิดดังนี้ 6% Super Black G (91.16) และ (75.56), 2% Turquoise H-GN (100.00) และ (70.37), 2% Yellow LS-4G (88.68) และ (80.81), 2% Yellow LS-R-01 (85.33) และ (75.76), 2% Orange LS-BR (90.78) และ (73.12), 4% Navy LS-G (94.67) และ (79.57), 2% Red LS-B (95.00) และ (76.81), 2% Blue LS-3R (97.22) และ (76.19) และ 2% Br.Blue LS-G (94.44) และ (57.41) ตามลำดับ และเมื่อปริมาณผงเม็ลต์มะรุุมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานจะมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณผงเม็ลต์มะรุุมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การวัดค่าดูดกลืนแสงไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากน้ำจะมีค่าความขุ่นเพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมลดลงโดยปริมาณผงเม็ลต์มะรุุม 1 กรัมมีค่าการดูดซับสีข้อมเฉลี่ยสูงสุด คือ ร้อยละ 93.03 โดยพบว่าหลังจากปริมาณผงเม็ลต์มะรุุม 1 กรัมเมื่อผ่านกระบวนการดูดซับจะได้สารละลายที่มีความขุ่น เนื่องจากผงเม็ลต์มะรุุมส่วนที่ไม่ได้ถูกดูดซับละลายออกมาแล้วผ่านรูกระดวยกรองทำให้สารละลายที่ได้ขุ่น การดูดกลืนคลื่นแสงลดลงเกิดการกระเจิงแสงทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ลดลงด้วย ขณะที่ถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ พบว่า เมื่อปริมาณถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นด้วย ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมจึงเพิ่มขึ้นโดยปริมาณถ่านบิทุมินัสเชิงพาณิชย์ 7 กรัม มีค่าการดูดซับสีข้อมเฉลี่ยสูงสุด คือ ร้อยละ 73.95 ดังแสดงในภาพที่ 49 และตารางที่ 10



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับร้อยละการรอดชีวิตของผงเมล็ดมะรุ้มและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

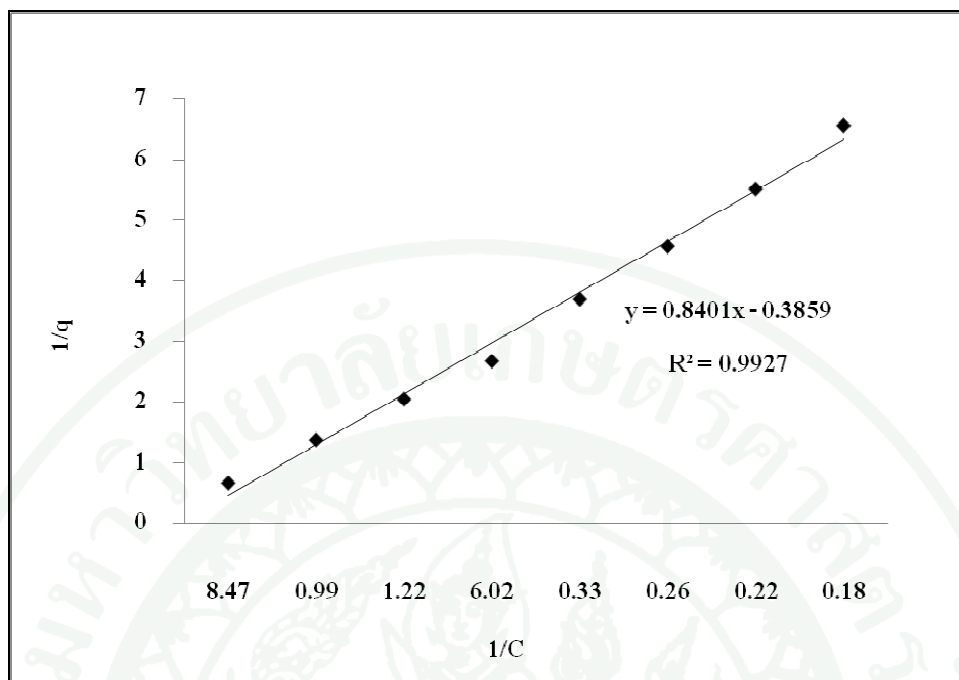
ตารางที่ 10 อิทธิพลของปริมาณต่อร้อยละการรอดชีวิตของผงเมล็ดมะรุ้มและถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ปริมาณตัวดัด (กรัม)	ร้อยละการรอดชีวิตของ ผงเมล็ดมะรุ้ม	ร้อยละการรอดชีวิตของ ถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์
1	93.03	32.66
2	91.44	47.64
3	83.16	59.44
4	75.25	59.57
5	63.21	63.48
6	61.03	64.48
7	58.81	73.95
8	55.86	67.64

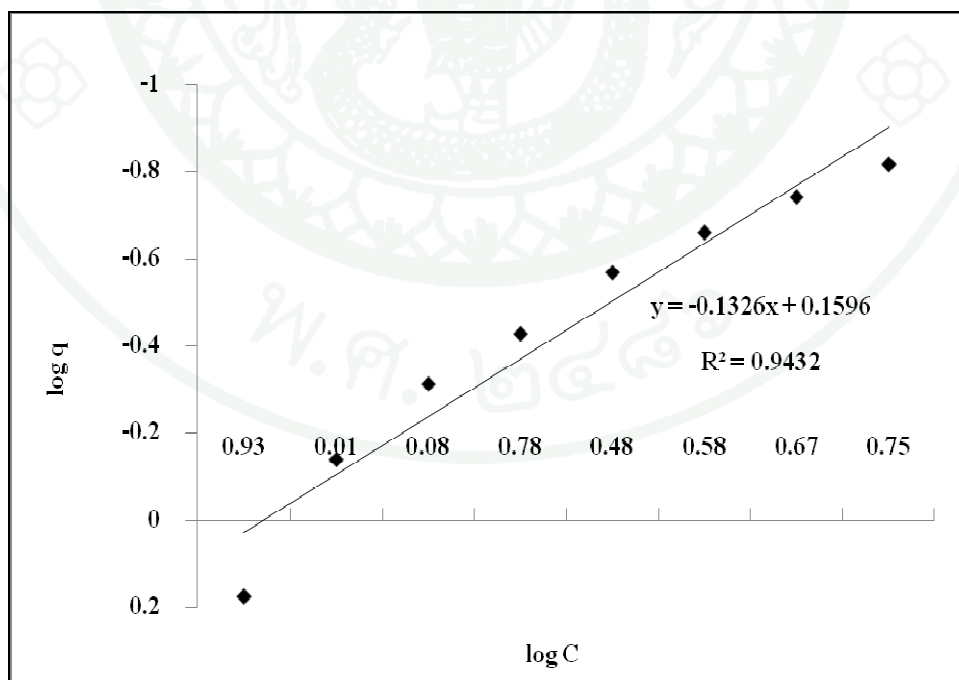
การดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมชนิดที่ 2 ด้วยผงเมล็ดมะรุมเมื่อนำมาเขียนกราฟ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังแสดงในภาพที่ 50 และ 51 ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมชนิดที่ 1 มีค่า 0.9927 และ 0.9432 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 39 และการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมชนิดที่ 2 ด้วย ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ เมื่อนำมาเขียนกราฟ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังแสดงในภาพที่ 52 และ 53 ตามลำดับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมชนิดที่ 2 มีค่า 0.9999 และ 0.9187 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 40 ฉะนั้นจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของทั้งสองไอโซเทอร์มมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่ากลไกการดูดซับมีลักษณะเป็นไปได้ทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

กลไกการดูดซับของแลงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับ พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

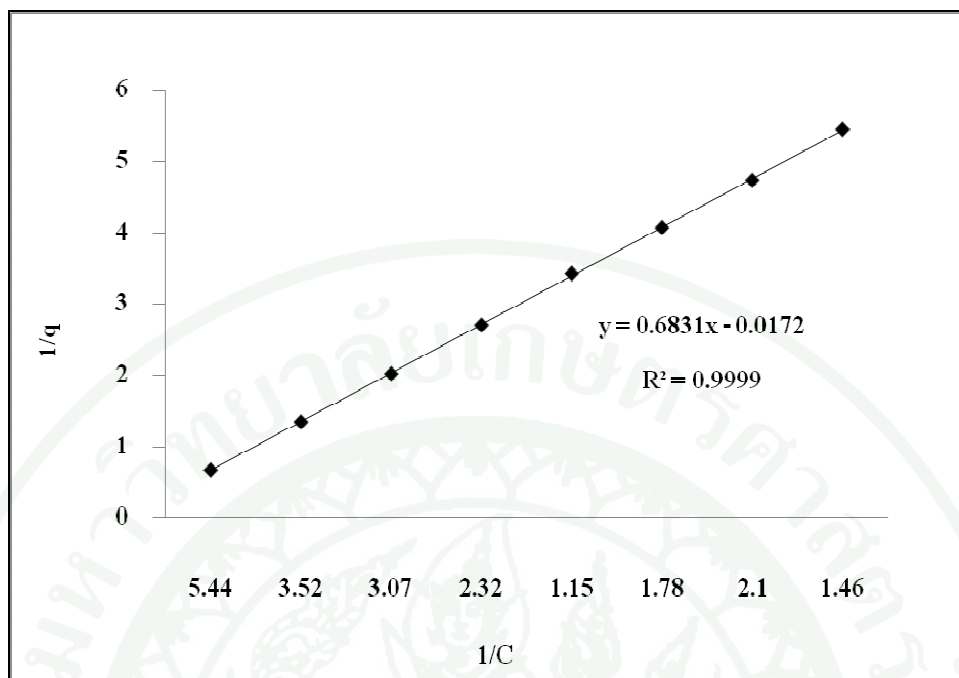
กลไกการดูดซับของฟรุนดลิช คือ พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด การดูดซับจะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับได้ เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ เมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับได้ พื้นที่ผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับอิ่มตัว



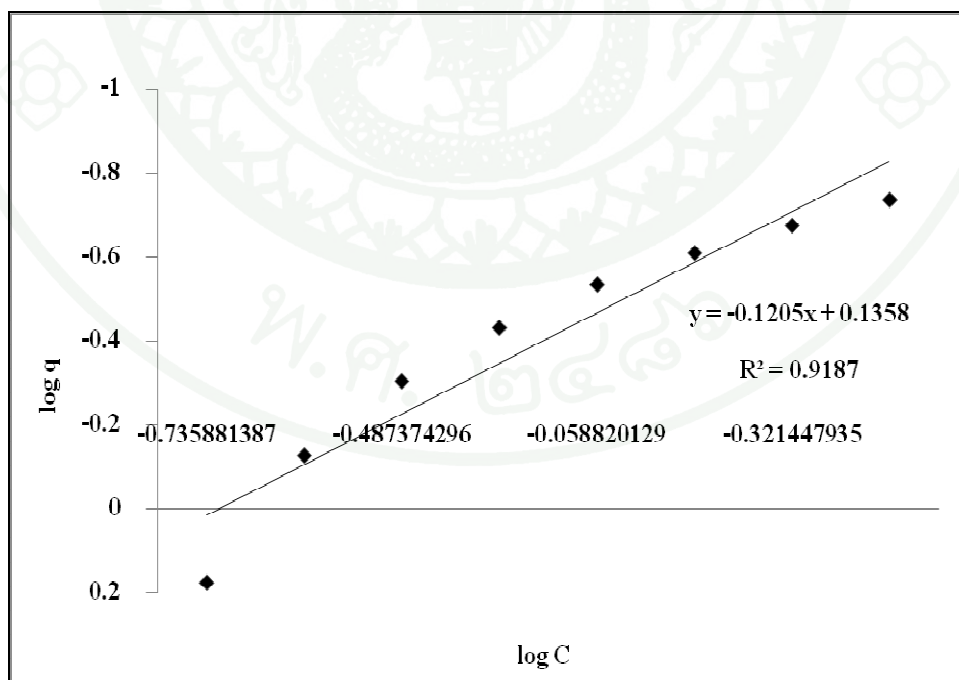
ภาพที่ 50 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมของแสงเมียร์ด้วยผงเมล็ดมะรุม



ภาพที่ 51 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมของฟรุณคิซด้วยผงเมล็ดมะรุม



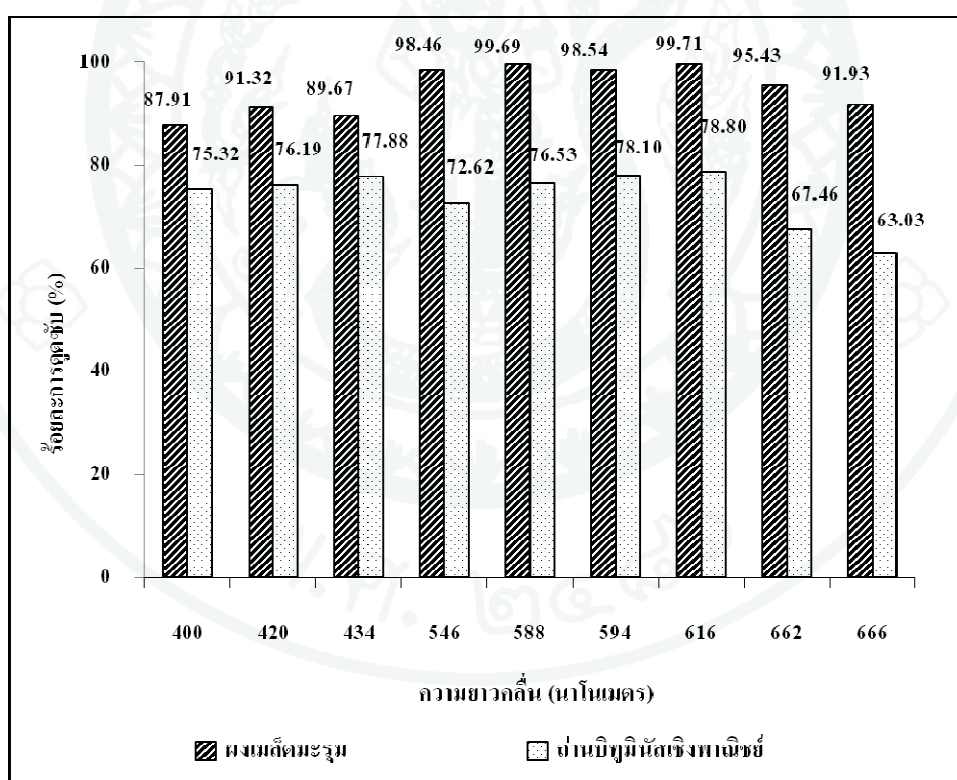
ภาพที่ 52 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมของแลงเมียร์ด้วยถ่านบิทูมินัสเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 53 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมของฟรอนดิชด้วยถ่านบิทูมินัสเชิงพาณิชย์

3.8 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสม ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

จากการทดลองด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ โดยใช้ผงเมล็ดมะรุมปริมาณ 1 กรัม และถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ปริมาณ 7 กรัม สารละลายสีข้อมผสมชนิดที่ 2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ คือ ผงเมล็ดมะรุมมีสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมคือ พีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบต่อนาที ระยะเวลาการเขย่า 30 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 0 นาที ผงเมล็ดมะรุมมีประสิทธิภาพการดูดซับคิดเป็นร้อยละ 94.74 และถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มีสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมคือ พีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที ระยะเวลาการเขย่า 120 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพการดูดซับคิดเป็นร้อยละ 73.99 ดังแสดงในภาพที่ 54 และดังตารางที่ 11



ภาพที่ 54 เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับสีข้อม 9' ชนิด จากสารละลายสีข้อมผสมโดยใช้ผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการดูดซับสีของผ้าด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ในน้ำเสีย
สังเคราะห์ชนิดที่ 2 ที่เตรียมได้จากสารละลายสีผสม

ชนิดตัวดูดซับ	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย
ผงเมล็ดมะรุม	94.74
ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	73.99

ตารางที่ 12 สภาพที่เหมาะสมของการการดูดซับสีของในสารละลายสีผสมด้วยผงเมล็ดมะรุม
และถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ โดยการทดลองแบบแบดซ์

ปัจจัย	ตัวดูดซับ	
	ผงเมล็ดมะรุม	ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์
พีเอช	7	7
ความเร็วรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที)	100	50
ระยะเวลาในการเขย่า (นาที)	30	120
ระยะเวลาต้มผ้า (นาที)	0	30
ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	30	30
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	1	7

จากการนำสภาพที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบดซ์ในการดูดซับสีของในสารละลายสีผสมด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ พบว่ามีค่าสภาพที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 12 จากนั้นนำค่าปัจจัยต่างๆในสภาพที่เหมาะสมมาทำการทดลองอีก 7 ชั่วโมงพบว่า ผงเมล็ดมะรุมมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีของในสารละลายสีผสมคิดเป็นร้อยละ 94.74 และยังพบว่าถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีของในสารละลายสีผสมคิดเป็นร้อยละ 73.99

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ เมื่อนำผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโตนีสเชิงพาณิชย์มาทำการเปรียบเทียบร้อยละการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสม คำนวณโดยแทนค่าในสมการดังนี้

$$qW = V(C_0 - C)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³) หรือลิตร (l)

C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

จากแทนค่าในสมการดังกล่าวข้างต้นพบว่า ผงเมล็ดมะรุมปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับสีข้อมได้ 1.49 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าถ่านบิโตนีสเชิงพาณิชย์ปริมาณ 1 กรัม สามารถดูดซับสีข้อมได้ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผงเมล็ดมะรุมมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมได้ดีกว่าถ่านบิโตนีสเชิงพาณิชย์

4. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคลอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคลอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ในวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 13, 14

ตารางที่ 13 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคลอง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	คุณภาพน้ำเสีย
	อุตสาหกรรม	จากโรงงานย้อมผ้า
พีเอช	5.5-9.0	9.74
ความขุ่น (NTU)	-	68.87
EC (ms/cm)	-	5.54
ความเค็ม	-	3
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	3.71
ไขมันและน้ำมัน(mg/l)	ไม่เกิน 5	14.15
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 50	568
ของแข็งทั้งหมด(mg/l)	ไม่เกิน 300	5356
ซีโอดี (mg/l)	ไม่เกิน 120	26.67
บีโอดี (mg/l)	ไม่เกิน 20	53.1

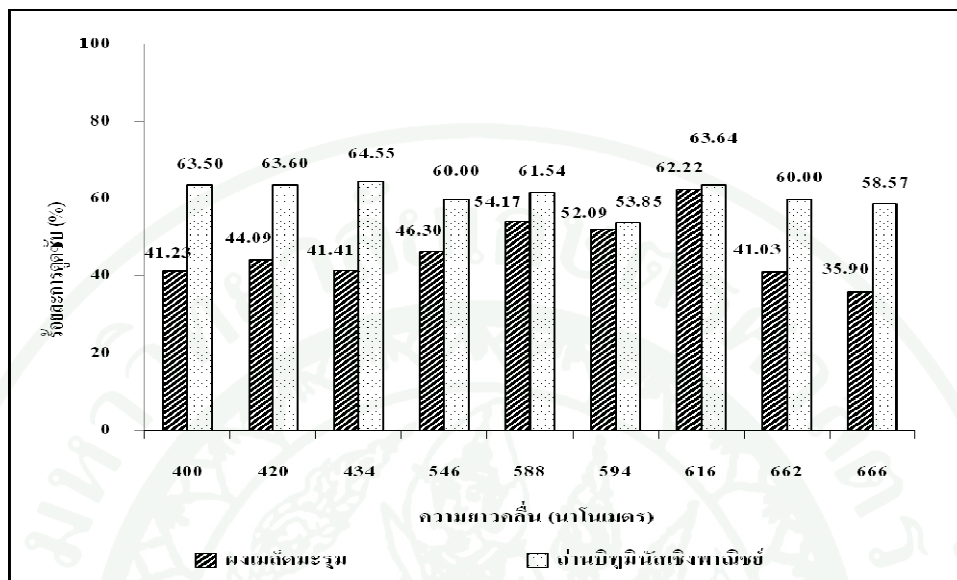
ตารางที่ 14 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
400	0.97
420	0.79
434	0.7
546	0.33
588	0.28
594	0.27
616	0.25
662	0.21
666	0.21

5. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง ด้วยผงจากเมล็ดมะรุ้มและถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์

จากการทดลองเมื่อทราบสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมแล้ว นำสถานะที่ได้มาทดลองกับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง พบว่า ผงจากเมล็ดมะรุ้มและถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมได้ทั้ง 9 ชนิดโดยมีร้อยละการดูดซับดังนี้ 6% Super Black G (52.08)และ(53.85), 2% Turquoise H-GN (41.03)และ(60.00), 2% Yellow LS-4G (44.09)และ(63.60), 2% Yellow LS-R-01 (41.23)และ(63.49), 2% Orange LS-BR (41.41)และ(64.55), 4% Navy LS-G (62.22)และ(63.64), 2% Red LS-B (46.30)และ(60.00), 2% Blue LS-3R (54.17)และ(61.54)และ 2% Br.Blue LS-G (35.90)และ(58.57) ตามลำดับ ดังตารางภาคผนวกที่ 87 และ 88 และพบว่าเมล็ดมะรุ้มมีประสิทธิภาพในการการดูดซับสีย้อมได้น้อยกว่าถ่าน อาจเนื่องมาจากสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในน้ำเสียไปรบกวนการดูดซับของผงเมล็ดมะรุ้มต่อการดูดซับสีย้อมซึ่งมีค่าการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าคอยตุง คิดเป็นร้อยละ 46.49 และ 61.03 ตามลำดับ โดยทำการทดลองภายใต้สถานะที่เหมาะสมคือ เริ่มต้นใช้ผงจากเมล็ดมะรุ้มปริมาณ 1 กรัม และถ่านบิฑูมินัสเชิงพาณิชย์ปริมาณ 7 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสม 30

มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 0 และ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาการเขย่า 0 และ 120 รอบ/นาที ระยะเวลาสัมผัส 0 และ 30 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 55 และตารางที่ 15



ภาพที่ 55 เปรียบเทียบร้อยละการคลอรีนที่ขี้นในน้ำที่จกโรงงานขี้นผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริโดยใช้ผงเม็ลล์คิมะรุุมและถ่านบิพูมินัสเซิงพานิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

ตารางที่ 15 ประสิทธิภาพการคลอรีนที่ขี้นผ้าด้วยผงเม็ลล์คิมะรุุมและถ่านบิพูมินัสเซิงพานิชย์ในน้ำที่จกโรงงานขี้นผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

ชนิดตัวคลอรีน	ร้อยละการคลอรีนเฉลี่ย
ผงเม็ลล์คิมะรุุม	46.49
ถ่านบิพูมินัสเซิงพานิชย์	61.03

จากการทดลองโดยการนำน้ำที่จกโรงงานขี้นผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่เก็บตัวอย่างน้ำในวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 ที่ผ่านการคลอรีนด้วยผงเม็ลล์คิมะรุุมและถ่านบิพูมินัสเซิงพานิชย์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองแบบแบดซ์ มาวิเคราะห์คุณภาพน้ำได้ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ก่อนและหลังการดูดซับด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

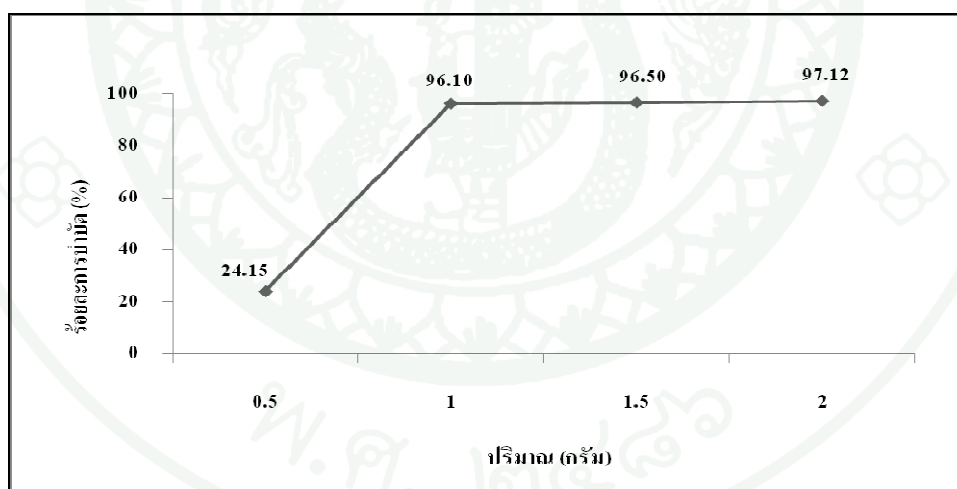
พารามิเตอร์	ผงจากเมล็ดมะรุม			ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์	
	ค่ามาตรฐาน	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ
	น้ำทิ้ง อุตสาหกรรม	หลัง การกำจัด	การกำจัด (ร้อยละ)	หลัง การกำจัด	การกำจัด (ร้อยละ)
พีเอช	5.5-9.0	7.2	-2.86	8.7	-24.29
ความขุ่น (NTU)	-	56.4	34.52	25.3	61.94
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	-	6.12	5.12	5.58	13.49
ความเค็ม	-	3.4	5.56	0	100
ของแข็งทั้งหมดที่ ละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	4.1	5.09	3.74	13.43
ไขมันและน้ำมัน (mg/l)	ไม่เกิน 5	0.48	20	0.27	55
ของแข็งแขวนลอย ทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 50	15	31.82	18	18.18
ของแข็งทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 300	5,549.33	35.29	4,765	44.43
ซีโอดี (mg/l)	ไม่เกิน 120	45	40.79	32	57.89

จากตารางที่ 16 พบว่าน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ หลังผ่านการดูดซับด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ สามารถบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าได้ นอกจากนี้ยังสามารถบำบัด ความขุ่น ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS), ไขมันและน้ำมัน, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ของแข็งทั้งหมด (TS), และซีโอดีได้อีกด้วย

6. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้วิธีจาร์เทสต์

ทำการทดลองในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสม ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน วิธีการคือ นำสารละลายสีย้อมผสมที่มีค่าความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ใส่ลงในแต่ละบีกเกอร์ขนาดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 4 ใบ สารละลายสีย้อมผสมมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.0 จากนั้นนำมาทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอน และค่าพีเอช ที่เหมาะสมด้วยวิธีจาร์เทสต์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 ขั้นตอนที่หนึ่ง ใช้ผงเมล็ดมะรุมเป็นสารสร้างตะกอนในการศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแบบหยาบ โดยการเติมผงเมล็ดมะรุมปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กรัม ลงในสารละลายสีย้อมผสมที่มีค่าความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 จากการศึกษพบว่า ปริมาณผงเมล็ดมะรุมที่เหมาะสมคือ 2 กรัม ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้สูงสุดคือ ร้อยละ 97.12 ดังภาพที่ 56 และตารางที่ 17

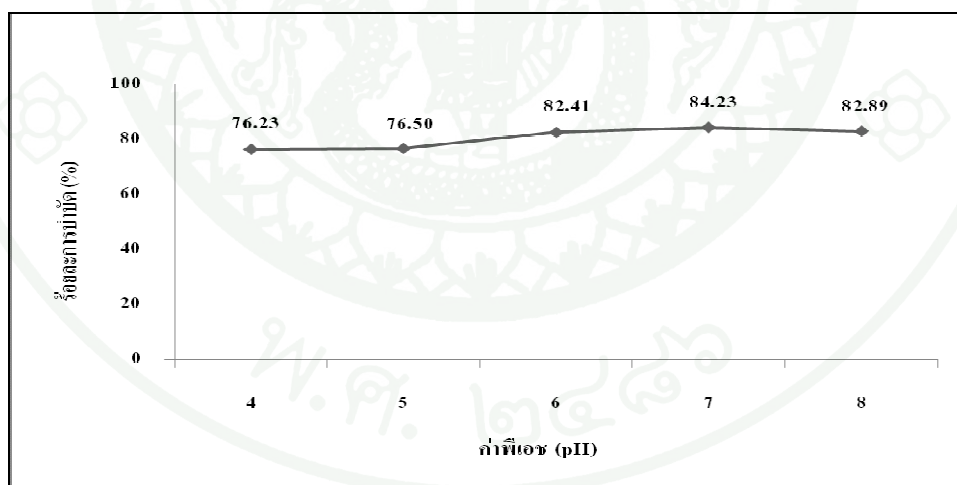


ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดโดยวิธีจาร์เทสต์

ตารางที่ 17 ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสม

ปริมาณผงเมล็ดมะรุม (กรัม)	ร้อยละการกำจัดสีข้อม
0.5	24.15
1.0	96.10
1.5	96.50
2.0	97.12

6.2 ขั้นตอนที่สอง เมื่อทราบปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมแล้วนำปริมาณที่เหมาะสมไปหาค่าพีเอชในการตกตะกอน โดยปรับสารละลายสีข้อมผสมให้มีค่าพีเอชในช่วง 4.0-8.0 ตามลำดับ เมื่อเติมสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมปริมาณ 2 กรัมลงในสารละลายสีข้อมผสมที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 7.0 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมได้สูงสุดคือ ร้อยละ 84.23 และเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมก็จะมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพที่ 57 และตารางที่ 18

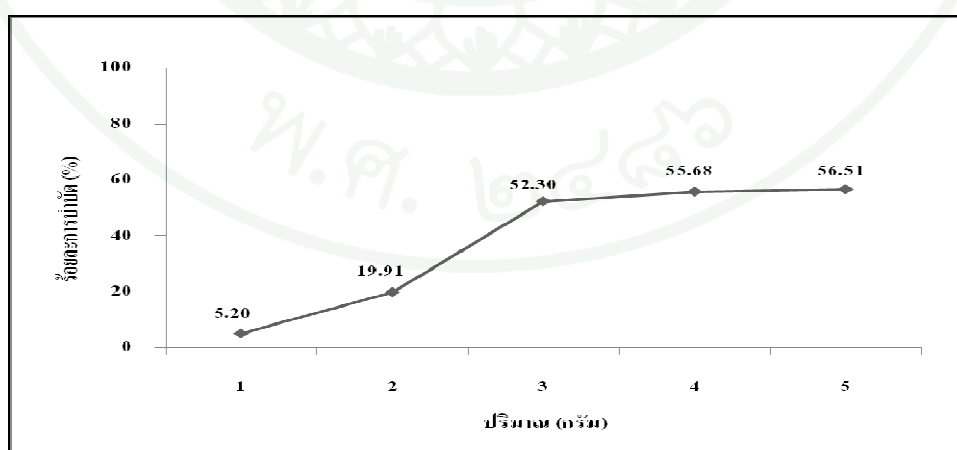


ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการกำจัดโดยวิธีจาร์เจสส์

ตารางที่ 18 ผลการศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชต่อร้อยละการกำจัดสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสม

พีเอช	ร้อยละการกำจัดสีข้อม
4	76.23
5	76.50
6	82.41
7	84.23
8	82.89

6.3 ขั้นตอนที่สาม เมื่อทราบปริมาณสารสร้างตะกอนและค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 6.1 และ 6.2 แล้ว นำค่าปริมาณที่เหมาะสมและค่าพีเอชที่เหมาะสมมาทำการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยนำน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า มาปริมาตร 800 มิลลิลิตร มาใส่ในบีกเกอร์ขนาดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 7.0 จากนั้นเติมผงเมล็ดมะรุมซึ่งทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนปริมาณ 2 กรัมทำการทดลอง 7 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณสารสร้างตะกอน 2 กรัม ลงในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมได้ร้อยละ 19.91 และจะเห็นได้ว่า จากการทดลอง เมื่อเติมปริมาณสารสร้างตะกอนเพิ่มจาก 2 กรัม เป็น 3, 4 และ 5 กรัม ตามลำดับ จะพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมมีค่าสูงขึ้นตามลำดับดังนี้คือ 52.30, 55.68 และ 56.51 ดังแสดงในภาพที่ 58 และตารางที่ 19

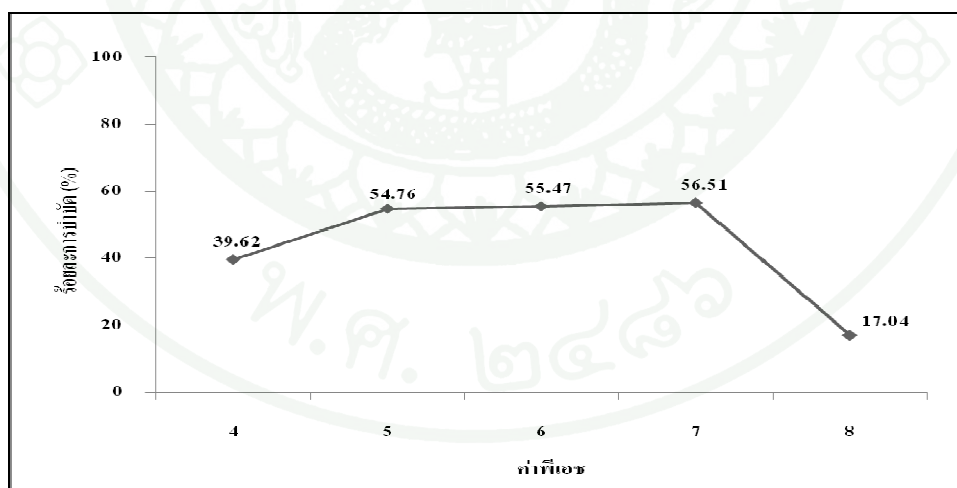


ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีจาร์เทสต์

ตารางที่ 19 ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

ปริมาณผงเมล็ดมะรุม (กรัม)	ร้อยละการกำจัดสีข้อม
1	5.20
2	19.91
3	52.3
4	55.68
5	56.51

6.4 ขั้นตอนที่สี่ จากการทดลองในข้อ 6.3 จะพบว่าสารสร้างตะกอนที่ปริมาณ 5 กรัม ให้ร้อยละการกำจัดสีข้อมได้สูงสุดคือ ร้อยละ 56.51 ฉะนั้น จึงเลือกสารสร้างตะกอนที่ปริมาณ 5 กรัม มาทำการศึกษาค่าพีเอชในบำบัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จากการศึกษาพบว่า เมื่อค่าพีเอชมีค่าเท่ากับ 8 จะให้ค่าร้อยละการกำจัดสีข้อมได้ต่ำสุด คือร้อยละ 17.04 และเมื่อค่าพีเอช 7 จะให้ร้อยละการกำจัดสีข้อมได้สูงสุดคือร้อยละ 56.51 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับที่ศึกษาจากวิธีแบบเบตซ์ ดังแสดงในภาพที่ 59 และตารางที่ 20



ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีจาร์เทสต์

ตารางที่ 20 ผลการศึกษาอิทธิพลค่าพีเอชต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า
โครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

พีเอช	ร้อยละการกำจัดสีย้อม
4	39.62
5	54.76
6	55.47
7	56.51
8	17.04

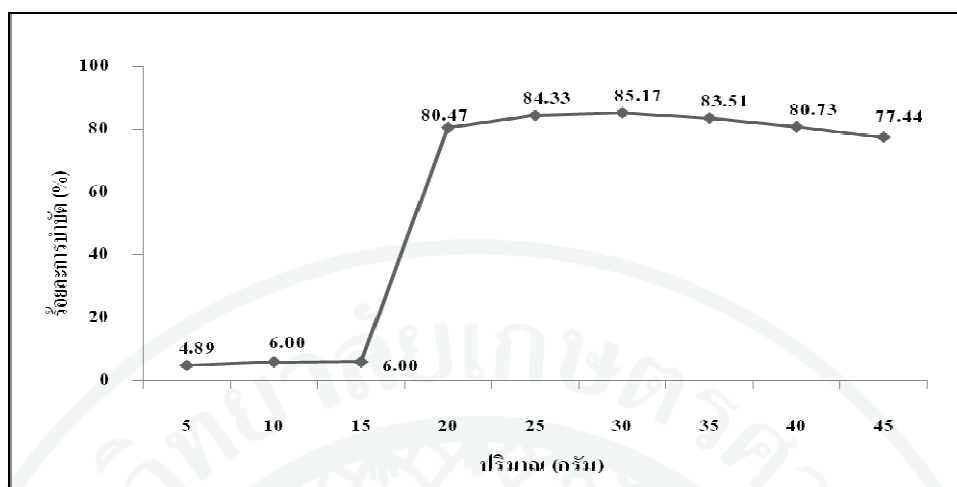
สำหรับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ภายหลังการการกำจัดสีย้อมด้วยผงเมล็ดมะรุม พบว่า ผงเมล็ดมะรุมสามารถบำบัดมลสารอื่นๆ ได้ เช่น ความขุ่น, ค่าการนำไฟฟ้า, ความเค็ม, ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ, ไขมัน และน้ำมัน, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด, ของแข็งทั้งหมด และซีไอดี โดยอาศัยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้วิธีจาร์เทศต์ ซึ่งสามารถบำบัดได้ร้อยละ 1.20, 10.74, 11.36, 10.88, 16.40, 40.00, 4.91 และ 43.86 ตามลำดับ ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
หลังการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชั่น โดยใช้วิธีจาร์เทสต์

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้ง อุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำ หลัง การกำจัด	ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
พีเอช	5.5-9.0	7.2	-2.86
ความขุ่น (NTU)	-	57.8	1.2
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	-	6.98	10.74
ความเค็ม	-	3.9	11.36
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	4.67	10.88
ไขมันและน้ำมัน (mg/l)	ไม่เกิน 5	0.51	16.4
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 50	12	40
ของแข็งทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 300	6,406.00	4.91
ซีโอดี (mg/l)	ไม่เกิน 120	42.67	43.86

7. ผลการศึกษาประสิทธิภาพเพื่อการประยุกต์ใช้งานจริง ในการกำจัดสีย้อมโดยใช้ ผงเมล็ดมะรุม เป็นสารสร้างตะกอน

จากการทดลองในข้อ 8.1 เมื่อนำผงเมล็ดมะรุมซึ่งเป็นสารช่วยสร้างตะกอนมาทำการกำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสมเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 ลิตร พบว่า เมื่อปริมาณผงเมล็ดมะรุมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานเพิ่มสูงขึ้น จากภาพจะพบว่าในช่วงแรกที่เติมปริมาณสารสร้างตะกอนลงไป ค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะมีค่าต่ำคือที่ปริมาณ 5 กรัม จะให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมได้ต่ำสุดคือร้อยละ 4.89 แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณสารสร้างตะกอนมีปริมาณมากขึ้น พบว่า ที่ 40 กรัม จะให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมได้สูงสุดคือร้อยละ 80.73 ดังภาพที่ 60 และตารางที่ 22 และจากภาพจะพบว่าสารสร้างตะกอนที่ปริมาณ 20 กรัม จะให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมได้ใกล้เคียงกันกับที่ 40 กรัม ดังนั้นในการศึกษาทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ 20 กรัม เพื่อช่วยประหยัดตัวสารสร้างตะกอนและช่วยลดต้นทุนในการกำจัดน้ำเสีย



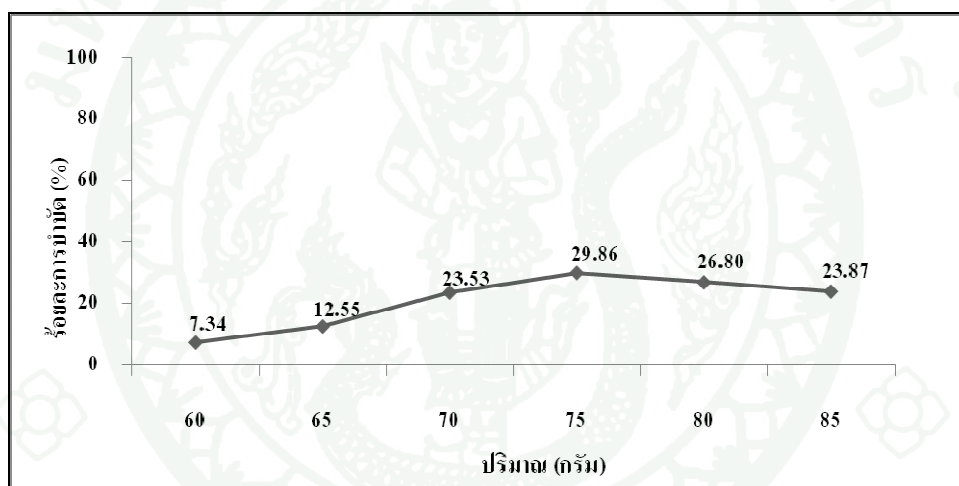
ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสม โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง

ตารางที่ 22 ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสม โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง

ปริมาณผงเมล็ดมะรุม (กรัม)	ร้อยละการกำจัดสีย้อม
5	4.89
10	6.00
15	6.00
20	80.47
25	84.33
30	85.17
35	83.51
40	80.73
45	77.44

จากการทดลองในข้อ 8.2 เมื่อนำผงเมล็ดมะรุมซึ่งเป็นสารช่วยสร้างตะกอนมาทำการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยเมื่อเติมสารช่วยสร้างตะกอนปริมาณ 20 กรัม ลงในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า พบว่า ไม่สามารถบำบัดสี

ข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าได้ อาจเป็นเพราะน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า มีค่าความเข้มข้นของสีข้อมสูงเกินไป จึงทำให้การกำจัดสีข้อมโดยการเติมผงจากเมล็ดมะรุมที่ปริมาณ 20 กรัม ไม่สามารถบำบัดสีข้อมได้ ดังนั้น จึงทำการศึกษาหาปริมาณสารช่วยตกตะกอนเพิ่มเติม โดยการเติมปริมาณสารช่วยตกตะกอนให้มากขึ้น และพบว่า เมื่อปริมาณสารช่วยสร้างตะกอนมากขึ้น จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมมีค่าสูงขึ้นกล่าวคือ ที่ปริมาณ 70, 75 และ 80 จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ปริมาณ 75 กรัมจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมสูงสุดคือ ร้อยละ 29.86 รองลงคือที่ปริมาณ 80 และ 70 กรัม จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมคือ ร้อยละ 26.80 และ 23.53 ตามลำดับ ดังภาพที่ 61 และตารางที่ 23 และจากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการกำจัดสีข้อมพบว่าสารสร้างตะกอนที่ปริมาณ 70 กรัม จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารต่างๆ ในน้ำได้ดีกว่า 75 และ 80 กรัม ตามลำดับ



ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง

ตารางที่ 23 ผลการศึกษาอิทธิพลปริมาณสารสร้างตะกอนต่อร้อยละการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง

ปริมาณผงเมล็ดมะรุม (กรัม)	ร้อยละการดูดซับสีข้อม
60	7.34
65	12.55
70	23.53
75	29.86
80	26.8
85	23.87

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ภายหลังจากการกำจัดสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมโดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง (การปั่นกววนโดยใช้พัดลม) พบว่า ผงเมล็ดมะรุมสามารถบำบัดมลสารอื่นๆ ได้ เช่น ความขุ่น ค่าการนำไฟฟ้า ความเค็ม ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ไนโตรเจนและน้ำมัน ของแข็งทั้งหมด และซีโอดี โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง (การปั่นกววนโดยใช้พัดลม) ซึ่งสามารถบำบัดได้ร้อยละ 26.07, 0.30, 2.70, 0.45, 30.00, 4.09 และ 36.84 ตามลำดับ ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานซ่อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ หลัง
การจัดตั้งโดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้ง อุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำเสีย ที่ปรับสภาพ เริ่มต้น	คุณภาพน้ำเสีย หลังการ บำบัด	ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
พีเอช	5.5-9.0	7.00	7.20	-2.86
ความขุ่น (NTU)	-	75.30	55.67	26.07
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	-	6.62	6.60	0.30
ความเค็ม	-	3.70	3.60	2.70
ของแข็งทั้งหมด ที่ละลายน้ำ (mg/l)	ไม่เกิน 3,000	4.44	4.42	0.45
ไขมันและน้ำมัน (mg/l)	ไม่เกิน 5	0.30	0.21	30.00
ของแข็งแขวนลอย ทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 50	196.00	226.00	-15.31
ของแข็งทั้งหมด (mg/l)	ไม่เกิน 300	7098.00	6808.00	4.09
ซีโอดี (mg/l)	ไม่เกิน 120	76.00	48.00	36.84

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยผงเมล็ดมะรุมเปรียบเทียบกับถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์และการประยุกต์ใช้งานจริง และส่วนที่สองการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมโดยใช้ผงเมล็ดมะรุมเป็นสารช่วยสร้างตะกอนในกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยวิธีจาร์เทสต์ และการประยุกต์ใช้งานจริง

การทดลองส่วนที่หนึ่ง การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยผงเมล็ดมะรุมเปรียบเทียบกับถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสมเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยผงเมล็ดมะรุม 1 กรัม ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ พีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบต่อนาที ระยะเวลาการเขย่า 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 0 นาที ผงเมล็ดมะรุมมีประสิทธิภาพการดูดซับคิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 94.74 และสำหรับถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ 7 กรัม ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ พีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที ระยะเวลาการเขย่า 120 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ มีประสิทธิภาพการดูดซับคิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 73.99 นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับสมการไอโซเทอรัมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีข้อมมาประยุกต์ใช้งานจริงโดยทำการทดลองกับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยดุง ปริมาตร 20 ลิตร พบว่า ตัวดูดซับผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์สามารถบำบัดสีข้อมทั้ง 9 ชนิด ได้ร้อยละการกำจัดดังนี้ 6% Super Black G 52.08 และ 53.85, 2% Turquoise H-GN 41.03 และ 60.00, 2% Yellow LS-4G 44.09 และ 63.60, 2% Yellow LS-R-01 41.23 และ 63.49, 2% Orange LS-BR 41.41 และ 64.55, 4% Navy LS-G 62.22 และ 63.64, 2% Red LS-B 46.30 และ 60.00, 2% Blue LS-3R 54.17 และ 61.54 และ 2% Br.Blue LS-G 35.90 และ 58.57 ตามลำดับ โดยพบว่าเมล็ดมะรุมมีประสิทธิภาพในการการดูดซับสีข้อมได้น้อยกว่าถ่าน อาจเนื่องมาจากสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในน้ำเสียไปรบกวนการดูดซับของผงเมล็ดมะรุมต่อการดูดซับสีข้อม ซึ่งผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าได้เฉลี่ยร้อยละ 46.49 และ 61.03 ตามลำดับ

การทดลองส่วนที่สองคือ การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้วิธีจาร์เทสต์และใช้ผงเมล็ดมะรุมเป็นสารช่วยสร้างตะกอน ผลการทดลองพบว่า ผงเมล็ดมะรุมมีความเหมาะสมที่จะใช้เปรี๊สสาร โคแอกกูแลนต์ และผงเมล็ดมะรุมมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 800 มิลลิตร คือ ใช้ปริมาณผงเมล็ดมะรุม 2 กรัม พีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7 สามารถบำบัดสีข้อมคิดเป็นร้อยละ 97.12 และเมื่อนำผงเมล็ดมะรุมมาทำการทดสอบกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า ปริมาตร 800 มิลลิตร พบว่า ผงเมล็ดมะรุมมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า คือ ปริมาณผงเมล็ดมะรุม 5 กรัม ที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมคิดเป็นร้อยละ 56.51 ภายหลังการกำจัดสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้วิธีจาร์เทสต์ พบว่า ผงเมล็ดมะรุมสามารถบำบัดมลสารอื่นๆได้ เช่น ความขุ่น ค่าการนำไฟฟ้า ความเค็ม ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ไขมันและน้ำมัน ของแข็งทั้งหมด และซีโอดี ซึ่งสามารถบำบัดได้ร้อยละ 1.20, 10.74, 11.36, 10.88, 16.40, 40.00, 4.91 และ 43.86 ตามลำดับ

การศึกษาประสิทธิภาพเพื่อการประยุกต์ใช้งานจริง ในการกำจัดสีข้อม โดยใช้ผงเมล็ดมะรุมเป็นสารสร้างตะกอน ผลการศึกษาพบว่า ผงเมล็ดมะรุมมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีข้อมในสารละลายสีข้อมผสม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 ลิตร คือ ใช้ปริมาณผงเมล็ดมะรุม 20 กรัม พีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ปั่นกวนโดยใช้ใบพัดต่อเข้ากับมอเตอร์กวนเป็นระยะเวลา 12 นาที ให้ร้อยละการกำจัดเฉลี่ยที่ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 80.47 และเมื่อนำผงเมล็ดมะรุมมาทำการทดสอบกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า พบว่า ผงเมล็ดมะรุมมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า คือ ใช้ปริมาณผงเมล็ดมะรุม 70 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมคิดเป็นร้อยละ 23.53 ภายหลังการกำจัดสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุมโดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง พบว่า ผงเมล็ดมะรุมสามารถบำบัดมลสารอื่นๆได้ เช่น ความขุ่น ค่าการนำไฟฟ้า ความเค็ม ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ไขมันและน้ำมัน ของแข็งทั้งหมด และซีโอดี โดยวิธีการประยุกต์ใช้งานจริง ซึ่งสามารถบำบัดได้ร้อยละ 26.07, 0.30, 2.70, 0.45, 30.00, 4.09 และ 36.84 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาพัฒนาเปรียบเทียบระหว่างผงเมล็ดมะรุมและผงจากพืชตระกูลถั่วว่าสามารถนำมาบำบัดน้ำเสียได้ดีเท่ากันหรือไม่
2. ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ได้นำผงเมล็ดมะรุมที่ผ่านการดูดซับสีข้อมจากโรงงานย้อมผ้าไปใช้เป็นปุ๋ยให้ต้นไม้ต่อไป



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กาวิ ศรีกุลกิจ. 2545. รายงานเรื่องหลักการข้อมลสิ่งทอ. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือผู้ควบคุมและผู้ปฏิบัติงานระบบบำบัดมลพิษโรงงาน, กรุงเทพฯ.
- คุณิ ธนะบริพัฒน์. 2538. จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. โครงการดำ รา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ไชยยุทธ์ กลิ่นสุคนธ์ และ ปรีชา พลอยภัทรภิญโญ. 2536. การจัดการน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ. วารสารวิจัยและพัฒนาสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- ปราโมทย์ เชี่ยวชาญ. 2551. ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ (WATER TREATMENT PLANT). จุลสารสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มุมวิชาการ ด้านอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, นนทบุรี
- กัญญ์ทิศา มุ่งการดี. 2531. การกำจัดความขุ่นของน้ำโดยใช้เมล็ดมะรุม. งานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น
- อริศรา พุ่มเดชา. 2539. การศึกษาการดูดซับร่วมกับสารส้มในการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- อำนาจ จิตศิริวิริยะ. 2546. การกำจัดสีน้ำจากสารระหว่างการใช้โพลีโอลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับ แกลบเผา หรือซิลิกาอลูมินา หรือเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Harrelkas, F., A. Azizi, A. Yaacoubi, A. Benhammou and M.N. Pons. 2009. **Treatment of Textile Dyess Effluents Using Coagulation`Flocculation Coupled with Membrane Processes or Adsorption on Powdered Activated Carbon**. Desalination, 235: 330-339.





ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (4, 5) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	pH 4				pH 5			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.54	0.07	86.42	0.01	0.53	0.07	86.79	0.01
420 nm	0.51	0.06	88.89	0.01	0.53	0.06	89.25	0.01
434 nm	0.29	0.09	70.11	0.01	0.33	0.09	73.64	0.01
546 nm	0.34	0.01	97.06	0.01	0.36	0.02	93.61	0.01
588 nm	0.42	0.01	97.62	0.01	0.45	0.01	97.78	0.01
594 nm	0.47	0.02	96.45	0.01	0.47	0.02	96.38	0.01
616 nm	0.46	0.01	98.55	0.01	0.50	0.01	98.6	0.01
662 nm	0.21	0.01	93.65	0.01	0.25	0.01	96.00	0.01
666nm	0.20	0.02	88.33	0.01	0.25	0.02	93.20	0.01

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	pH 7				pH 8			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.53	0.05	90.00	0.01	0.54	0.07	87.59	0.01
420 nm	0.53	0.04	91.89	0.01	0.52	0.05	90.39	0.00
434 nm	0.50	0.04	92.00	0.00	0.35	0.09	73.43	0.01
546 nm	0.40	0.01	97.50	0.00	0.38	0.01	97.37	0.01
588 nm	0.48	0.01	97.92	0.00	0.47	0.00	99.36	0.01
594 nm	0.51	0.01	98.63	0.01	0.50	0.01	86.60	0.01
616 nm	0.53	0.01	98.11	0.00	0.51	0.00	100.00	0.00
662 nm	0.29	0.00	98.97	0.01	0.27	0.00	100.00	0.00
666nm	0.28	0.01	97.50	0.01	0.26	0.01	95.00	0.01

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (4, 5) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	pH 4				pH 5			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.58	0.28	51.15	0.01	0.56	0.30	45.83	0.01
420 nm	0.56	0.28	49.40	0.01	0.56	0.29	48.21	0.00
434 nm	0.50	0.27	46.67	0.02	0.52	0.28	45.51	0.01
546 nm	0.37	0.22	39.64	0.02	0.37	0.23	36.94	0.01
588 nm	0.45	0.24	45.93	0.01	0.46	0.24	47.83	0.02
594 nm	0.45	0.25	43.70	0.01	0.47	0.25	46.81	0.02
616 nm	0.48	0.26	45.14	0.01	0.50	0.27	45.33	0.01
662 nm	0.26	0.21	20.51	0.01	0.29	0.21	26.44	0.01
666nm	0.23	0.20	14.49	0.01	0.27	0.21	23.46	0.01

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	pH 7				pH 8			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.56	0.28	50.60	0.01	0.55	0.29	47.88	0.01
420 nm	0.55	0.27	51.52	0.01	0.55	0.28	49.70	0.01
434 nm	0.52	0.27	48.72	0.01	0.53	0.27	48.43	0.01
546 nm	0.39	0.23	41.88	0.01	0.39	0.23	40.17	0.01
588 nm	0.47	0.25	47.52	0.01	0.47	0.24	48.94	0.01
594 nm	0.48	0.24	49.31	0.01	0.48	0.24	49.31	0.01
616 nm	0.52	0.26	50.64	0.01	0.50	0.26	47.33	0.01
662 nm	0.30	0.19	35.56	0.01	0.31	0.21	31.18	0.01
666nm	0.28	0.20	29.76	0.01	0.29	0.20	29.89	0.01

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (0, 50) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเร็วรอบการเขย่า (0 รอบต่อนาที)				ความเร็วรอบการเขย่า (50 รอบต่อนาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.51	0.06	88.89	0.01	0.52	0.06	88.46	0.00
420 nm	0.53	0.03	94.34	0.01	0.52	0.04	91.67	0.01
434 nm	0.48	0.04	90.97	0.01	0.48	0.03	93.06	0.01
546 nm	0.37	0.00	99.10	0.01	0.41	0.02	95.12	0.01
588 nm	0.46	0.01	97.83	0.00	0.49	0.01	97.28	0.01
594 nm	0.47	0.00	99.29	0.01	0.47	0.00	99.29	0.01
616 nm	0.50	0.01	97.33	0.01	0.51	0.00	99.35	0.01
662 nm	0.31	0.02	94.62	0.01	0.28	0.01	96.43	0.01
666nm	0.27	0.01	96.30	0.02	0.26	0.00	98.72	0.01

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (100, 150) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเร็วรอบการเขย่า (100 รอบต่อนาที)				ความเร็วรอบการเขย่า (150 รอบต่อนาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.53	0.05	89.94	0.01	0.52	0.06	88.46	0.00
420 nm	0.53	0.04	91.82	0.01	0.50	0.05	90.67	0.01
434 nm	0.50	0.04	92.00	0.00	0.47	0.03	92.91	0.01
546 nm	0.40	0.01	97.50	0.00	0.40	0.02	95.00	0.00
588 nm	0.48	0.01	97.92	0.00	0.46	0.01	97.10	0.01
594 nm	0.51	0.01	98.69	0.01	0.47	0.01	97.87	0.00
616 nm	0.53	0.01	98.11	0.00	0.51	0.01	98.69	0.01
662 nm	0.29	0.00	98.85	0.01	0.28	0.01	95.24	0.01
666nm	0.28	0.01	97.62	0.01	0.27	0.00	100.00	0.00

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (200) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	เริ่มต้น	ความเร็วรอบการเขย่า (200 รอบต่อนาที)		S.D.
		หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	
400 nm	0.52	0.07	87.18	0.01
420 nm	0.53	0.06	88.68	0.00
434 nm	0.51	0.07	86.93	0.01
546 nm	0.37	0.02	95.50	0.01
588 nm	0.47	0.01	98.58	0.01
594 nm	0.48	0.02	95.83	0.01
616 nm	0.49	0.01	97.28	0.02
662 nm	0.28	0.01	96.43	0.01
666nm	0.27	0.01	97.53	0.01

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (0, 50) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเร็วรอบการเขย่า (0 รอบต่อนาที)				ความเร็วรอบการเขย่า (50 รอบต่อนาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.57	0.37	35.09	0.01	0.57	0.27	52.05	0.01
420 nm	0.56	0.36	35.12	0.01	0.56	0.27	52.38	0.01
434 nm	0.53	0.35	33.33	0.01	0.53	0.26	50.31	0.01
546 nm	0.41	0.28	30.89	0.01	0.41	0.22	45.53	0.01
588 nm	0.50	0.34	31.33	0.01	0.50	0.26	47.33	0.01
594 nm	0.51	0.35	30.72	0.01	0.51	0.26	48.37	0.01
616 nm	0.54	0.36	32.72	0.01	0.54	0.27	49.38	0.01
662 nm	0.29	0.15	49.43	0.00	0.29	0.18	39.08	0.01
666nm	0.27	0.21	22.22	0.00	0.27	0.17	35.80	0.01

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (100, 150) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านปิโตรนัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเร็วรอบการเขย่า (100 รอบต่อนาที)				ความเร็วรอบการเขย่า (150 รอบต่อนาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.57	0.29	49.12	0.00	0.57	0.31	46.20	0.01
420 nm	0.56	0.29	48.81	0.01	0.57	0.30	47.95	0.01
434 nm	0.53	0.28	46.54	0.01	0.53	0.28	46.54	0.01
546 nm	0.41	0.25	39.02	0.00	0.41	0.24	40.65	0.01
588 nm	0.50	0.26	48.00	0.00	0.51	0.27	46.41	0.01
594 nm	0.51	0.26	48.37	0.01	0.52	0.27	47.44	0.01
616 nm	0.54	0.28	48.77	0.01	0.54	0.28	48.77	0.01
662 nm	0.29	0.21	27.59	0.00	0.29	0.21	26.44	0.01
666nm	0.27	0.19	28.40	0.01	0.27	0.20	24.69	0.01

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการเขย่า (200) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	เริ่มต้น	ความเร็วรอบการเขย่า (200 รอบต่อนาที)		S.D.
		หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	
400 nm	0.57	0.32	44.44	0.01
420 nm	0.57	0.31	45.03	0.01
434 nm	0.53	0.30	44.03	0.01
546 nm	0.41	0.26	35.77	0.01
588 nm	0.51	0.28	45.75	0.02
594 nm	0.52	0.28	45.51	0.01
616 nm	0.54	0.29	46.91	0.01
662 nm	0.29	0.24	18.39	0.01
666nm	0.27	0.23	13.58	0.01

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (15,30) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (15 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (30 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.07	85.90	0.02	0.52	0.05	90.38	0.00
420 nm	0.53	0.01	98.11	0.02	0.52	0.04	92.31	0.00
434 nm	0.48	0.05	88.89	0.01	0.48	0.02	95.83	0.00
546 nm	0.35	0.01	96.19	0.01	0.35	0.00	100.00	0.00
588 nm	0.45	0.03	94.07	0.01	0.45	0.01	97.78	0.00
594 nm	0.50	0.08	84.67	0.06	0.50	0.03	94.67	0.01
616 nm	0.47	0.02	96.45	0.01	0.48	0.01	98.61	0.01
662 nm	0.28	0.02	94.05	0.01	0.27	0.00	98.77	0.01
666nm	0.26	0.02	93.59	0.01	0.26	0.01	97.44	0.01

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (45,60) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (45 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (60 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.07	85.90	0.01	0.53	0.06	88.05	0.01
420 nm	0.52	0.06	89.10	0.01	0.53	0.04	92.45	0.00
434 nm	0.48	0.04	90.97	0.01	0.49	0.05	90.48	0.01
546 nm	0.35	0.01	96.19	0.01	0.35	0.04	89.52	0.01
588 nm	0.45	0.02	96.30	0.01	0.45	0.02	95.56	0.00
594 nm	0.49	0.02	95.24	0.01	0.50	0.01	97.33	0.01
616 nm	0.48	0.02	96.53	0.01	0.49	0.02	95.92	0.00
662 nm	0.27	0.01	95.06	0.01	0.27	0.02	91.36	0.01
666nm	0.26	0.02	92.31	0.01	0.26	0.03	89.74	0.01

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (75,90) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (75 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (90 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.05	91.03	0.01	0.52	0.05	90.38	0.00
420 nm	0.52	0.04	92.95	0.01	0.51	0.04	92.81	0.01
434 nm	0.44	0.04	90.91	0.00	0.48	0.04	90.97	0.03
546 nm	0.39	0.01	96.58	0.01	0.37	0.01	96.40	0.01
588 nm	0.52	0.05	91.03	0.01	0.54	0.05	90.74	0.00
594 nm	0.51	0.02	96.08	0.01	0.53	0.01	98.11	0.00
616 nm	0.52	0.02	95.51	0.01	0.51	0.02	95.42	0.01
662 nm	0.30	0.04	85.56	0.01	0.31	0.04	86.02	0.01
666nm	0.30	0.03	88.89	0.01	0.26	0.04	83.33	0.01

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (105,120) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมทัลลิกมะรุ

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (105 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (120 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.08	85.26	0.01	0.55	0.08	85.45	0.00
420 nm	0.52	0.04	91.67	0.01	0.49	0.05	90.48	0.01
434 nm	0.47	0.06	87.23	0.00	0.45	0.09	80.00	0.00
546 nm	0.39	0.06	85.47	0.01	0.41	0.05	86.99	0.01
588 nm	0.49	0.02	95.92	0.00	0.49	0.02	95.24	0.01
594 nm	0.50	0.08	84.00	0.00	0.57	0.04	93.57	0.01
616 nm	0.52	0.03	93.59	0.01	0.57	0.04	93.57	0.01
662 nm	0.29	0.04	87.36	0.01	0.28	0.05	82.14	0.00
666nm	0.29	0.03	88.51	0.01	0.27	0.04	86.42	0.01

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (15,30) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (15 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (30 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.58	0.26	55.75	0.01	0.58	0.24	58.62	0.00
420 nm	0.54	0.25	54.32	0.01	0.54	0.23	57.41	0.00
434 nm	0.53	0.23	55.97	0.01	0.53	0.22	58.49	0.00
546 nm	0.41	0.19	54.47	0.01	0.41	0.18	56.10	0.00
588 nm	0.49	0.23	53.74	0.01	0.49	0.21	57.14	0.00
594 nm	0.50	0.23	54.67	0.01	0.50	0.21	57.33	0.01
616 nm	0.52	0.23	56.41	0.01	0.52	0.22	58.33	0.01
662 nm	0.30	0.15	51.11	0.01	0.30	0.14	53.33	0.00
666nm	0.28	0.14	50.00	0.00	0.28	0.14	51.19	0.01

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (45,60) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (45 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (60 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.58	0.21	63.79	0.00	0.58	0.19	67.82	0.01
420 nm	0.54	0.19	64.20	0.01	0.54	0.18	66.05	0.01
434 nm	0.53	0.19	64.15	0.00	0.53	0.17	67.30	0.01
546 nm	0.41	0.16	61.79	0.01	0.41	0.16	61.79	0.01
588 nm	0.49	0.19	61.90	0.01	0.49	0.17	64.63	0.01
594 nm	0.50	0.19	62.67	0.01	0.50	0.17	65.33	0.01
616 nm	0.52	0.19	63.46	0.00	0.52	0.17	66.67	0.01
662 nm	0.30	0.13	57.78	0.01	0.30	0.11	62.22	0.01
666nm	0.28	0.12	57.14	0.00	0.28	0.11	60.71	0.00

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (75,90) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (75 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (90 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.58	0.19	67.24	0.00	0.58	0.19	67.82	0.01
420 nm	0.54	0.18	66.67	0.00	0.54	0.20	62.96	0.00
434 nm	0.53	0.17	67.92	0.00	0.53	0.17	68.55	0.01
546 nm	0.41	0.15	62.60	0.01	0.41	0.15	63.41	0.00
588 nm	0.49	0.17	64.63	0.01	0.49	0.16	68.03	0.01
594 nm	0.50	0.17	66.00	0.00	0.50	0.17	66.67	0.01
616 nm	0.52	0.17	67.31	0.00	0.52	0.16	69.87	0.01
662 nm	0.30	0.12	61.11	0.01	0.30	0.12	60.00	0.00
666nm	0.28	0.11	60.71	0.00	0.28	0.12	57.14	0.00

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเขย่า (105,120) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเขย่า (105 นาที)				ระยะเวลาเขย่า (120 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.58	0.17	70.11	0.01	0.58	0.15	74.14	0.00
420 nm	0.54	0.18	66.05	0.01	0.54	0.18	67.28	0.01
434 nm	0.53	0.14	72.96	0.01	0.53	0.13	74.84	0.01
546 nm	0.41	0.13	67.48	0.01	0.41	0.12	69.92	0.01
588 nm	0.49	0.14	70.75	0.01	0.49	0.13	72.79	0.01
594 nm	0.50	0.14	71.33	0.01	0.50	0.13	73.33	0.01
616 nm	0.52	0.14	73.08	0.00	0.52	0.13	74.36	0.01
662 nm	0.30	0.11	63.33	0.00	0.30	0.09	68.89	0.01
666nm	0.28	0.10	63.10	0.01	0.28	0.09	66.67	0.01

ตารางผนวกที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (0, 30) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (0 นาที)				ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (30 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.05	91.03	0.01	0.52	0.06	89.10	0.01
420 nm	0.52	0.02	96.15	0.00	0.52	0.03	94.87	0.01
434 nm	0.49	0.03	93.88	0.00	0.49	0.03	93.20	0.01
546 nm	0.37	0.01	98.20	0.01	0.37	0.00	99.10	0.01
588 nm	0.45	0.01	97.04	0.01	0.45	0.01	97.04	0.01
594 nm	0.47	0.01	97.87	0.00	0.47	0.02	96.45	0.01
616 nm	0.50	0.01	98.00	0.00	0.50	0.01	97.33	0.01
662 nm	0.28	0.00	100.00	0.00	0.28	0.01	97.62	0.01
666nm	0.27	0.01	96.30	0.00	0.27	0.01	97.53	0.01

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (60, 90) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (60 นาที)				ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (90 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.06	89.10	0.01	0.52	0.06	89.10	0.01
420 nm	0.52	0.04	92.95	0.01	0.52	0.05	89.74	0.01
434 nm	0.49	0.04	91.16	0.01	0.49	0.04	92.52	0.01
546 nm	0.37	0.00	99.10	0.01	0.37	0.01	98.20	0.01
588 nm	0.45	0.01	97.04	0.01	0.45	0.02	96.30	0.01
594 nm	0.47	0.02	96.45	0.01	0.47	0.02	96.45	0.01
616 nm	0.50	0.01	98.67	0.01	0.50	0.02	96.00	0.00
662 nm	0.28	0.00	98.81	0.01	0.28	0.00	98.81	0.01
666nm	0.27	0.00	98.77	0.01	0.27	0.00	100.00	0.00

ตารางผนวกที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (120) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (120 นาที)			S.D.
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	
400 nm	0.52	0.05	89.74	0.01
420 nm	0.52	0.06	88.46	0
434 nm	0.49	0.05	90.48	0.01
546 nm	0.37	0.01	96.4	0.01
588 nm	0.45	0.01	97.04	0.01
594 nm	0.47	0.02	95.04	0.01
616 nm	0.5	0.01	97.33	0.01
662 nm	0.28	0	100	0
666nm	0.27	0.01	97.53	0.01

ตารางผนวกที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (0, 30) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (0 นาที)				ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (30 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.55	0.13	75.76	0.01	0.55	0.11	80.61	0.01
420 nm	0.58	0.16	71.84	0.01	0.58	0.14	75.29	0.02
434 nm	0.52	0.14	72.44	0.01	0.52	0.12	77.56	0.01
546 nm	0.40	0.12	70.83	0.01	0.40	0.11	73.33	0.01
588 nm	0.49	0.13	72.79	0.01	0.49	0.12	74.83	0.01
594 nm	0.50	0.14	72.67	0.01	0.50	0.11	77.33	0.01
616 nm	0.53	0.14	73.58	0.00	0.53	0.12	77.36	0.00
662 nm	0.29	0.09	67.82	0.01	0.29	0.09	70.11	0.01
666nm	0.27	0.09	65.43	0.01	0.27	0.08	69.14	0.01

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (60, 90) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (60 นาที)				ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (90 นาที)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.55	0.13	76.36	0.00	0.55	0.12	77.58	0.01
420 nm	0.58	0.15	73.56	0.01	0.58	0.14	75.29	0.01
434 nm	0.52	0.09	82.05	0.01	0.52	0.09	83.33	0.01
546 nm	0.40	0.11	73.33	0.01	0.40	0.11	73.33	0.01
588 nm	0.49	0.12	76.19	0.01	0.49	0.11	78.23	0.01
594 nm	0.50	0.13	74.67	0.01	0.50	0.11	77.33	0.01
616 nm	0.53	0.13	76.10	0.01	0.53	0.12	77.36	0.00
662 nm	0.29	0.10	66.67	0.01	0.29	0.09	67.82	0.01
666nm	0.27	0.09	66.67	0.01	0.27	0.09	65.43	0.01

ตารางผนวกที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (120) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (120 นาที)			S.D.
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	
400 nm	0.55	0.12	78.79	0.01
420 nm	0.58	0.14	76.44	0.01
434 nm	0.52	0.07	85.90	0.01
546 nm	0.40	0.10	75.00	0.00
588 nm	0.49	0.10	78.91	0.01
594 nm	0.50	0.11	78.67	0.01
616 nm	0.53	0.12	77.99	0.01
662 nm	0.29	0.09	70.11	0.01
666nm	0.27	0.09	66.67	0.00

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสม (10, 20) กับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นสารละลาย สีข้อมผสม (10 มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นสารละลาย สีข้อมผสม (20 มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.
400 nm	0.10	0.05	50.00	0.00	0.21	0.05	77.78	0.01
420 nm	0.09	0.03	62.96	0.01	0.20	0.03	85.00	0.00
434 nm	0.09	0.03	62.96	0.01	0.19	0.03	82.46	0.01
546 nm	0.09	0.01	85.19	0.01	0.14	0.03	80.95	0.01
588 nm	0.07	0.01	90.48	0.01	0.16	0.02	85.42	0.01
594 nm	0.09	0.01	85.19	0.01	0.18	0.02	88.89	0.00
616 nm	0.09	0.01	88.89	0.00	0.19	0.01	96.49	0.01
662 nm	0.05	0.02	66.67	0.01	0.11	0.06	45.45	0.00
666nm	0.05	0.02	66.67	0.01	0.10	0.03	66.67	0.01

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสม (30, 40) กับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมทัลลิมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นสารละลาย สีข้อมผสม (30 มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นสารละลาย สีข้อมผสม (40 มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.
400 nm	0.30	0.05	82.22	0.01	0.42	0.06	86.51	0.01
420 nm	0.30	0.03	90.00	0.00	0.42	0.03	93.65	0.01
434 nm	0.28	0.03	89.29	0.00	0.40	0.02	94.17	0.01
546 nm	0.21	0.00	98.41	0.01	0.29	0.01	95.40	0.01
588 nm	0.24	0.01	94.44	0.01	0.35	0.01	98.10	0.01
594 nm	0.27	0.02	93.83	0.01	0.37	0.01	98.20	0.01
616 nm	0.28	0.01	96.43	0.00	0.38	0.04	90.35	0.01
662 nm	0.18	0.01	92.59	0.01	0.23	0.02	92.75	0.01
666nm	0.15	0.00	100.00	0.00	0.23	0.01	97.10	0.01

ตารางผนวกที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีข้อมผสม (50) กับร้อยละการดูดซับสีข้อมด้วยผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นสารละลาย สีข้อมผสม (50 มิลลิกรัมต่อลิตร)			S.D.
	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	
400 nm	0.53	0.08	85.53	0.01
420 nm	0.53	0.04	92.45	0.00
434 nm	0.50	0.04	92.00	0.00
546 nm	0.36	0.02	95.37	0.01
588 nm	0.41	0.00	100.00	0.00
594 nm	0.47	0.02	95.74	0.00
616 nm	0.44	0.02	94.70	0.01
662 nm	0.29	0.02	94.25	0.01
666nm	0.28	0.01	97.62	0.01

ตารางผนวกที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีย้อมผสม (10, 20) กับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านปิทมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นสารละลาย สีย้อมผสม (10 มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นสารละลาย สีย้อมผสม (20 มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.
400 nm	0.11	0.06	42.42	0.01	0.22	0.09	60.61	0.01
420 nm	0.13	0.08	35.90	0.01	0.23	0.08	63.77	0.01
434 nm	0.10	0.05	46.67	0.01	0.21	0.07	65.08	0.01
546 nm	0.07	0.03	52.38	0.01	0.15	0.05	64.44	0.01
588 nm	0.09	0.03	66.67	0.00	0.19	0.06	70.18	0.01
594 nm	0.09	0.04	55.56	0.00	0.19	0.06	70.18	0.01
616 nm	0.10	0.04	60.00	0.00	0.20	0.05	76.67	0.01
662 nm	0.06	0.04	33.33	0.00	0.12	0.05	58.33	0.00
666nm	0.05	0.04	20.00	0.00	0.11	0.05	57.58	0.01

ตารางผนวกที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีย้อมผสม (30, 40) กับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นสารละลาย สีย้อมผสม (30 มิลลิกรัมต่อลิตร)				ความเข้มข้นสารละลาย สีย้อมผสม (40 มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	S.D.
400 nm	0.33	0.10	68.69	0.01	0.44	0.14	68.94	0.01
420 nm	0.35	0.11	67.62	0.01	0.46	0.15	68.12	0.01
434 nm	0.31	0.09	72.04	0.01	0.42	0.12	70.63	0.01
546 nm	0.28	0.06	77.38	0.01	0.31	0.10	66.67	0.01
588 nm	0.31	0.07	77.42	0.00	0.38	0.11	71.93	0.01
594 nm	0.29	0.07	74.71	0.01	0.39	0.11	71.79	0.00
616 nm	0.31	0.07	76.34	0.01	0.40	0.12	70.83	0.01
662 nm	0.15	0.07	53.33	0.00	0.23	0.10	57.97	0.01
666nm	0.22	0.05	75.76	0.01	0.21	0.08	61.90	0.00

ตารางผนวกที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายสีย้อมผสม (50) กับร้อยละการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านบิโตนัมัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นสารละลาย สีย้อมผสม (50 มิลลิกรัมต่อลิตร)			S.D.
	เริ่มต้น	หลังการ ดูดซับ	ร้อยละการ ดูดซับ	
400 nm	0.57	0.18	67.84	0.01
420 nm	0.58	0.19	66.67	0.01
434 nm	0.54	0.17	67.90	0.01
546 nm	0.39	0.14	63.25	0.01
588 nm	0.48	0.15	68.06	0.01
594 nm	0.49	0.15	68.71	0.01
616 nm	0.52	0.17	67.31	0.00
662 nm	0.29	0.13	56.32	0.01
666nm	0.27	0.11	58.02	0.01

ตารางผนวกที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (1, 2) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ปริมาณตัวดูดซับ (1 กรัม)				ปริมาณตัวดูดซับ (2 กรัม)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.50	0.07	85.33	0.02	0.48	0.10	79.86	0.01
420 nm	0.53	0.06	88.68	0.01	0.53	0.07	86.79	0.00
434 nm	0.47	0.04	90.78	0.01	0.47	0.08	82.98	0.01
546 nm	0.40	0.02	95.00	0.01	0.36	0.02	95.37	0.01
588 nm	0.48	0.01	97.22	0.01	0.45	0.01	98.52	0.01
594 nm	0.49	0.04	91.16	0.01	0.51	0.05	90.20	0.01
616 nm	0.50	0.03	94.67	0.01	0.52	0.02	96.79	0.01
662 nm	0.25	0.00	100.00	0.00	0.28	0.01	96.43	0.00
666nm	0.24	0.01	94.44	0.01	0.25	0.01	96.00	0.01

ตารางผนวกที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (3, 4) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ปริมาณตัวดูดซับ (3 กรัม)				ปริมาณตัวดูดซับ (4 กรัม)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.49	0.16	66.67	0.02	0.56	0.24	57.14	0.02
420 nm	0.52	0.12	77.56	0.01	0.52	0.16	68.59	0.01
434 nm	0.49	0.13	74.15	0.02	0.51	0.18	64.05	0.03
546 nm	0.38	0.07	81.58	0.02	0.41	0.10	74.80	0.03
588 nm	0.47	0.04	91.49	0.01	0.47	0.07	85.82	0.02
594 nm	0.50	0.06	88.67	0.02	0.52	0.09	83.33	0.02
616 nm	0.53	0.04	91.82	0.01	0.52	0.07	87.18	0.01
662 nm	0.28	0.03	89.29	0.01	0.28	0.06	79.76	0.01
666nm	0.26	0.03	87.18	0.02	0.27	0.06	76.54	0.02

ตารางผนวกที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (5, 6) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ปริมาณตัวดูดซับ (5 กรัม)				ปริมาณตัวดูดซับ (6 กรัม)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.36	31.41	0.02	0.52	0.36	30.77	0.02
420 nm	0.52	0.22	57.69	0.02	0.52	0.23	56.41	0.01
434 nm	0.54	0.2	62.96	0.02	0.54	0.21	61.11	0
546 nm	0.42	0.16	61.9	0.04	0.42	0.16	61.11	0.03
588 nm	0.48	0.08	82.64	0.03	0.48	0.09	81.25	0.02
594 nm	0.49	0.13	74.15	0.03	0.49	0.13	73.47	0.03
616 nm	0.5	0.12	75.33	0.03	0.5	0.13	74	0.03
662 nm	0.28	0.11	60.71	0.02	0.28	0.12	55.95	0.01
666nm	0.29	0.11	62.07	0.03	0.29	0.13	55.17	0.01

ตารางผนวกที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีของผงเมล็ดมะรุม

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ปริมาณตัวดูดซับ (7 กรัม)				ปริมาณตัวดูดซับ (8 กรัม)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.37	29.49	0.02	0.52	0.38	27.56	0.01
420 nm	0.52	0.24	54.49	0.01	0.52	0.24	53.85	0.00
434 nm	0.54	0.22	59.88	0.01	0.54	0.22	58.64	0.01
546 nm	0.42	0.18	57.14	0.02	0.42	0.21	50.79	0.01
588 nm	0.48	0.09	80.56	0.02	0.48	0.10	78.47	0.01
594 nm	0.49	0.14	71.43	0.03	0.49	0.13	74.15	0.03
616 nm	0.50	0.13	73.33	0.02	0.50	0.16	68.00	0.00
662 nm	0.28	0.13	52.38	0.01	0.28	0.15	47.62	0.01
666nm	0.29	0.14	50.57	0.01	0.29	0.16	43.68	0.01

ตารางผนวกที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (1, 2) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านปิทมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ปริมาณตัวดูดซับ (1 กรัม)				ปริมาณตัวดูดซับ (2 กรัม)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.33	0.22	32.32	0.01	0.33	0.17	47.47	0.01
420 nm	0.33	0.23	31.31	0.01	0.33	0.16	50.51	0.01
434 nm	0.31	0.23	26.88	0.01	0.31	0.17	46.24	0.01
546 nm	0.23	0.15	33.33	0.01	0.23	0.12	46.38	0.01
588 nm	0.28	0.18	35.71	0	0.28	0.14	51.19	0.01
594 nm	0.3	0.2	33.33	0	0.3	0.15	48.89	0.01
616 nm	0.31	0.2	34.41	0.01	0.31	0.16	47.31	0.01
662 nm	0.18	0.12	35.19	0.01	0.18	0.09	48.15	0.01
666nm	0.18	0.12	31.48	0.01	0.18	0.1	42.59	0.01

ตารางผนวกที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (3, 4) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านปิทมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ปริมาณตัวดูดซับ (3 กรัม)				ปริมาณตัวดูดซับ (4 กรัม)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.33	0.13	61.62	0.01	0.33	0.13	61.62	0.01
420 nm	0.33	0.12	64.65	0.01	0.33	0.12	64.65	0.01
434 nm	0.31	0.13	59.14	0.01	0.31	0.13	59.14	0.01
546 nm	0.23	0.09	59.42	0.01	0.23	0.09	59.42	0.01
588 nm	0.28	0.10	65.48	0.01	0.28	0.10	63.10	0.01
594 nm	0.30	0.13	57.78	0.01	0.30	0.12	61.11	0.01
616 nm	0.31	0.12	61.29	0.00	0.31	0.11	63.44	0.01
662 nm	0.18	0.08	57.41	0.01	0.18	0.08	53.70	0.01
666nm	0.18	0.09	48.15	0.01	0.18	0.09	50.00	0.00

ตารางผนวกที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (5, 6) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านปิทมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ปริมาณตัวดูดซับ (5 กรัม)				ปริมาณตัวดูดซับ (6 กรัม)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.33	0.12	64.65	0.01	0.33	0.11	66.67	0.00
420 nm	0.33	0.10	68.69	0.01	0.33	0.10	69.70	0.00
434 nm	0.31	0.11	63.44	0.01	0.31	0.11	64.52	0.00
546 nm	0.23	0.08	65.22	0.00	0.23	0.08	65.22	0.00
588 nm	0.28	0.09	67.86	0.00	0.28	0.08	70.24	0.01
594 nm	0.30	0.11	64.44	0.01	0.30	0.10	66.67	0.00
616 nm	0.31	0.10	67.74	0.00	0.31	0.09	69.89	0.01
662 nm	0.18	0.07	61.11	0.00	0.18	0.07	61.11	0.00
666nm	0.18	0.09	48.15	0.01	0.18	0.10	46.30	0.01

ตารางผนวกที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ (7, 8) กับร้อยละการดูดซับสีของด้วยถ่านบิหมินัสเชิงพาณิชย์

ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)								
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	เริ่มต้น	ปริมาณตัวดูดซับ (7 กรัม)			เริ่มต้น	ปริมาณตัวดูดซับ (8 กรัม)		
		หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.		หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.33	0.08	75.76	0.00	0.33	0.11	67.68	0.01
420 nm	0.33	0.06	80.81	0.01	0.33	0.10	70.71	0.01
434 nm	0.31	0.08	73.12	0.01	0.31	0.10	66.67	0.01
546 nm	0.23	0.05	76.81	0.01	0.23	0.06	73.91	0.02
588 nm	0.28	0.07	76.19	0.01	0.28	0.08	72.62	0.01
594 nm	0.30	0.07	75.56	0.01	0.30	0.09	70.00	0.00
616 nm	0.31	0.06	79.57	0.01	0.31	0.08	74.19	0.00
662 nm	0.18	0.05	70.37	0.01	0.18	0.07	59.26	0.01
666nm	0.18	0.08	57.41	0.01	0.18	0.08	53.70	0.01

ตารางผนวกที่ 39 ไอโซเทอร์มการดูดซับของผงเมล็ดมะรุม

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	C_0	C_1	$C_0 - C_1$	V(L)	q	1/q	1/ C_1	$\log C_1$	$\log q$
1	30	0.12	29.88	0.05	1.49	0.67	8.47	0.93	0.17
2	30	1.01	28.99	0.05	0.73	1.38	0.99	0.01	-0.14
3	30	0.82	29.18	0.05	0.49	2.06	1.22	0.08	-0.31
4	30	0.17	29.83	0.05	30.37	0.03	6.02	0.78	1.48
5	30	3.00	27.00	0.05	0.27	3.70	0.33	0.48	-0.57
6	30	3.78	26.22	0.05	0.22	4.59	0.26	0.58	-0.66
7	30	4.64	25.36	0.05	0.18	5.52	0.22	0.67	-0.74
8	30	5.63	24.37	0.05	0.15	6.58	0.18	0.75	-0.82

ตารางผนวกที่ 40 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านหินมินัสเซิงพาณิชย์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	C_0	C_1	$C_0 - C_1$	$V(L)$	q	$1/q$	$1/C_1$	$\log C_1$	$\log q$
1	30	0.18	29.82	0.05	1.49	0.67	5.44	-0.74	0.17
2	30	0.28	29.72	0.05	0.74	1.35	3.52	-0.55	-0.13
3	30	0.33	29.67	0.05	0.50	2.02	3.07	-0.48	-0.31
4	30	0.43	29.57	0.05	0.37	2.70	2.32	-0.37	-0.43
5	30	0.87	29.13	0.05	0.29	3.44	1.15	-0.06	-0.54
6	30	0.56	29.44	0.05	0.25	4.08	1.78	-0.25	-0.61
7	30	0.48	29.52	0.05	0.21	4.74	2.10	-0.32	-0.68
8	30	0.68	29.32	0.05	0.18	5.46	1.46	-0.17	-0.74

ตารางผนวกที่ 41 ประสิทธิภาพของผงเมล็ดมะรุมในการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ (7 ชั่วโมง)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.52	0.06	87.91	0.01
420 nm	0.51	0.04	91.32	0.01
434 nm	0.47	0.05	89.67	0.00
546 nm	0.37	0.01	98.46	0.01
588 nm	0.46	0.00	99.69	0.00
594 nm	0.49	0.01	98.54	0.00
616 nm	0.49	0.00	99.71	0.00
662 nm	0.25	0.01	95.43	0.00
666nm	0.23	0.02	91.93	0.00

ตารางผนวกที่ 42 ประสิทธิภาพของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ (7 ชั่วโมง)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.33	0.08	75.32	0.01
420 nm	0.33	0.08	76.19	0.01
434 nm	0.31	0.07	77.88	0.01
546 nm	0.24	0.07	72.62	0.01
588 nm	0.28	0.07	76.53	0.01
594 nm	0.30	0.07	78.10	0.01
616 nm	0.31	0.07	78.80	0.01
662 nm	0.18	0.06	67.46	0.01
666nm	0.17	0.06	63.03	0.00

ตารางผนวกที่ 43 ประสิทธิภาพของผงจากเมล็ดมะรุมในการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า (7 ชั่วโมง)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.75	0.45	40.19	0.01
420 nm	0.64	0.35	45.31	0.01
434 nm	0.54	0.33	38.36	0.01
546 nm	0.24	0.15	36.31	0.01
588 nm	0.20	0.13	35.00	0.01
594 nm	0.20	0.12	42.14	0.01
616 nm	0.18	0.11	40.48	0.01
662 nm	0.16	0.10	37.50	0.01
666nm	0.15	0.10	31.43	0.00

ตารางผนวกที่ 44 ประสิทธิภาพของถ่านบิโหมินัสเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีข้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานข้อมผ้า (7 ซ้ำ)

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	เริ่มต้น	หลังการดูดซับ	ร้อยละการดูดซับ	S.D.
400 nm	0.85	0.45	46.55	0.01
420 nm	0.70	0.40	43.06	0.01
434 nm	0.61	0.35	41.92	0.01
546 nm	0.26	0.18	29.67	0.01
588 nm	0.21	0.15	26.53	0.01
594 nm	0.21	0.15	29.25	0.01
616 nm	0.20	0.14	32.14	0.01
662 nm	0.16	0.11	33.04	0.00
666nm	0.17	0.12	28.57	0.01

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวจิตติรัตน์ ปิยะพานุวัฒน์
เกิดวันที่	วันที่ 27 ตุลาคม 2528
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลวชิระ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ศึกษาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่น	นำเสนอผลงานทางวิชาการ ในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ครั้งที่ 5 (กลุ่มวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี) เรื่องการเปรียบเทียบการจัดสีย้อมผ้า ในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาद्यตุง อัน เนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วยผงเมล็ดมะรุมและถ่านบิฑู มินัสเชิงพาณิชย์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อม แหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2553)