



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง ด้วยไม้ยางพารา
และถ่านไม้ยางพารา

Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater by *Hevea*
brasiliensis and *Hevea brasiliensis* Charcoal

นามผู้วิจัย นางสาวกัญติยา สดใส

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณาภิรักษ์, วท.ม.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน พ.ศ.

สืบสันทิ มตาวิตยาสัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจัดสีข้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานข้อมผ้า โครงการพัฒนาอยตุง ด้วยไม้อยางพาราและถ่านไม้
ยางพารา

Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater by *Hevea brasiliensis*
and *Hevea brasiliensis* Charcoal

โดย

นางสาวกัญติยา สดใส

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

กัญติยา ศดโส 2555: การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา
คอยตุง ด้วยไม้อย่างพาราและถ่านไม้อย่างพารา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์พนธ์ ดังคนานุรักษ์, Ph.D. 147 หน้า

การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยไม้อย่างพาราและถ่านไม้อย่างพารา เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถ
แก้ไขปัญหาสีย้อมผ้าที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงย้อมผ้าคอยตุงได้ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่
มีผลต่อการดูดซับได้แก่ ผลของพีเอช ความเร็วรอบในการเขย่า ระยะเวลาในการเขย่า เวลาที่ใช้เข้าสู่
สู่ภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐาน และปริมาณตัวดูดซับ จากผลการศึกษา
พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยไม้อย่างพาราและถ่านไม้อย่างพาราแตกต่างกัน โดย
สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตรด้วย
ไม้อย่างพารา ปริมาณ 3 กรัม คือที่พีเอช 2 ความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาใน
การเขย่าเท่ากับ 60 นาที เวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 0 นาที ในขณะที่ถ่านไม้อย่างพารา ปริมาณ
2 กรัม คือที่พีเอช 2 ไม่ต้องทำการเขย่า และเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 10 นาที จากสภาวะที่
เหมาะสมข้างต้นประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าของตัวดูดซับทั้งสองชนิดในสารละลายสีย้อม
มาตรฐานผสม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าได้ทั้ง 9 ชนิด 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, 2% Br.Blue LS-G มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 73.85 และ 80.03 ตามลำดับ
และในน้ำเสียจากโรงย้อมผ้าคอยตุงเท่ากับร้อยละโดยเฉลี่ย 68.08 และ 70.98 ตามลำดับ การดูด
ซับสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของตัวดูดซับทั้งสองสอดคล้องตามสมการไอโซเทอรัมของแลงเมียร์
นอกจากนี้ตัวดูดซับทั้งสองชนิดสามารถบำบัดมลสารอื่นๆได้ ได้แก่ ซีโอดี ความขุ่น น้ำมันและ
ไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ

Kantiya Sodsai 2012: Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater by *Hevea brasiliensis* and *Hevea brasiliensis* Charcoal. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 147 pages.

The dyes adsorption by *Hevea brasiliensis* and *Hevea brasiliensis* Charcoal was the one of alternative system that might be suitable and could remove the dyes from textile wastewater from Doi Tung Development Project. The extent of adsorption was studied as a function of pH value of solution, agitation rate, agitation time, contact time, concentration of standard dyes solution and adsorbent dosage. The results showed that the capacity of *Hevea brasiliensis* and *Hevea brasiliensis* Charcoal were different. The optimal conditions for dyes adsorption from 10 mg/L of standard dyes solution by *Hevea brasiliensis* 3 g were pH 2, agitation rate 50 rpm, agitation time 60 min and no contact time, whereas *Hevea brasiliensis* Charcoal 2 g were pH 2 , no agitation, contact time 10 min. Under these conditions, the average highest dyes removal efficiency of both adsorbents in standard dyes solution (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, 2% Br.Blue LS-G) were 73.85% and 80.03% respectively and in textile wastewater from Doi Tung Development Project were 68.08% and 70.98% respectively. The adsorption of dyes on both adsorbents demonstrated the conformity according to Langmuir isotherm equation. In addition, the COD, turbidity, oil and grease, total solids, suspended solids and total dissolved solids can be removed by two types of adsorbents.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนเสนอแนะแนวทางการทดลองตั้งแต่เริ่มดำเนินงานจนแล้วเสร็จ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์คณิดา ดังคนานุรักษ์ กรรมการร่วมที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการศึกษา วิจัย และทดลอง รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาคอตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้ออนุเคราะห์ตัวอย่างสีย้อมผ้าสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงย้อมผ้าคอตุง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ ครอบครัวสไต ที่คอยเป็นแรงผลักดัน ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง ขอขอบคุณพี่ๆน้องๆและเพื่อนๆ ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กัญติยา สดใส

พฤศจิกายน 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	53
อุปกรณ์	53
วิธีการ	55
ผลและวิจารณ์	61
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	96
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	97
ภาคผนวก	99
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	147

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี	14
2	ค่าทีแอลวีของสาร	20
3	ความเป็นพิษของสารที่ค่าแอลดี 50 ต่างๆ	21
4	ค่าแอลดี 50 ของสีย้อมเปรียบเทียบกับไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารพิษร้ายแรง	21
5	เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี	23
6	คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิดของไม้ยางพารา	26
7	สีย้อมมาตรฐาน (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออย ตุง 9 ชนิด และค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด	54
8	สมการเชิงเส้นถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสีย้อม 9 ชนิด	63
9	สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยไม้ ยางพารา	76
10	สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยไม้ ยางพารา	76
11	สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยถ่านไม้ ยางพารา	78
12	สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยถ่านไม้ ยางพารา	78
13	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยไม้ ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา	80
14	คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการออยตุง	81
15	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนา ออยตุง ด้วยไม้ยางพารา (ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง แบบเบสซ์)	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยตุง ด้วยถ่านไม้ยางพารา (ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการ ทดลองแบบเบดซ์)	84
17	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมโดย การนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา	86
18	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยตุง โดยการประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยไม้ยางพารา	87
19	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยตุง โดยการประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยถ่านไม้ยางพารา	89
20	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดย การประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพ แล้ว	91
21	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดย การประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟู สภาพแล้ว	93
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วย ไม้ยางพารา	101
2	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับสารสีย้อมโดยการดูดซับ ด้วยถ่านไม้ยางพารา	104
3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีย้อม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	107
4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีย้อม โดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา	110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีข้อม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	112
6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูดซับ สีข้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	114
7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูดซับ สีข้อมโดยการดูดซับด้วยถ่าน ไม้ยางพารา	116
8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมกับ ร้อยละการดูดซับสีข้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	118
9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมกับ ร้อยละการดูดซับสีข้อมโดยการดูดซับด้วยถ่าน ไม้ยางพารา	121
10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสีข้อมโดย การดูดซับด้วยไม้ยางพารา	128
11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสีข้อมโดย การดูดซับด้วยถ่าน ไม้ยางพารา	126
12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแกลเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยไม้ยางพารา	129
13 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแกลเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยไม้ยางพารา	129
14 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแกลเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยไม้ยางพารา	130
15 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแกลเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยไม้ยางพารา	130
16 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแกลเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยไม้ยางพารา	131
17 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแกลเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G ด้วยไม้ยางพารา	131

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
18 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B ด้วยไม้ยางพารา	132
19 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ด้วยไม้ยางพารา	132
20 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ด้วยไม้ยางพารา	133
21 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	133
22 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยถ่านไม้ยางพารา	134
23 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	134
24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยถ่านไม้ยางพารา	135
25 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยถ่านไม้ยางพารา	135
26 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	136
27 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B ด้วยถ่านไม้ยางพารา	136
28 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ด้วยถ่านไม้ยางพารา	137
29 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	137
30 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสี ย้อม	138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
31	ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพต้นไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสีขี้เถ้า	138
32	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	139

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีไคเร็กซ์	8
2 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอทีฟ (Reactive Blue 4)	8
3 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิก	9
4 สูตรโครงสร้างของสีแอซิด (Acid Red 266)	10
5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีมอร์แดนท์ (Mordant Yellow 30)	10
6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแวกซ์	11
7 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีซัลเฟอร์	11
8 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีดิสเพิร์ส (Disperse Blue 14)	12
9 ด้ายยาร	24
10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	29
11 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	31
12 แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	31
13 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	32
14 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	34
15 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ	34
16 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	38
17 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	41
18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	42
19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนดิช	44
20 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช	45
21 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ	45
22 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m	46
23 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	48
25	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	49
26	ไม้ยางพารา	61
27	ถ่านไม้ยางพารา	62
28	กราฟมาตรฐานของสี่เหลี่ยม 9 ชนิด	63
29	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	65
30	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา	66
31	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	67
32	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา	68
33	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	69
34	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	70
35	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา	71
36	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมกับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	72
37	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมกับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา	73
38	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยม โดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสีข้อมโดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา	75
40	ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟพื้นฟูสภาพไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสีข้อม	90
41	ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟพื้นฟูสภาพถ่านไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสีข้อม	92

ภาพผนวกที่

1	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยไม้ยางพารา	141
2	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยไม้ยางพารา	141
3	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยไม้ยางพารา	141
4	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยไม้ยางพารา	142
5	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยไม้ยางพารา	142
6	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G ด้วยไม้ยางพารา	142
7	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B ด้วยไม้ยางพารา	143
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ด้วยไม้ยางพารา	143
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ด้วยไม้ยางพารา	143

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	144
11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยถ่านไม้ยางพารา	144
12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	144
13 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยถ่านไม้ยางพารา	145
14 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยถ่านไม้ยางพารา	145
15 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	145
16 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B ด้วยถ่านไม้ยางพารา	146
17 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ด้วยถ่านไม้ยางพารา	146
18 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ด้วยถ่านไม้ยางพารา	146

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)

การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง ด้วยไม้ยางพารา และถ่านไม้ยางพารา

Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater by *Hevea brasiliensis* and *Hevea brasiliensis* Charcoal

คำนำ

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งหมด เป็นสิ่งใกล้ตัว และอยู่ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการพัฒนาเศรษฐกิจขั้นพื้นฐานต่อการพัฒนาประเทศทั้งในด้านการเกษตร อุตสาหกรรม ประมง สาธารณูปโภค และการคมนาคมขนส่ง ตลอดจนเป็นแหล่งรองรับของเสียจากกิจกรรมของมนุษย์ด้วย ในปัจจุบันได้มีการเพิ่มปริมาณของประชากรอย่างรวดเร็ว และมีการนำทรัพยากรต่างๆ มาใช้อย่างมากมายในการกระบวนการผลิตและจัดการสาธารณูปโภคต่างๆ ให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการกระบวนการผลิตนี้ย่อมจะก่อให้เกิดของเสีย และของเสียเหล่านี้ส่วนหนึ่งได้ระบายลงสู่แหล่งน้ำที่นับวันจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำ ดังนั้นหากแหล่งน้ำเกิดมลพิษก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ตามมา

ปัญหามลพิษทางน้ำที่สำคัญปัญหาหนึ่ง คือ ปัญหาสีปนเปื้อนในแหล่งน้ำ จากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งถือเป็นต้นกำเนิดสำคัญที่ทำให้มีการปนเปื้อนสีในแหล่งน้ำ เช่นเดียวกับโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีปัญหาสีปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ที่อาจเกิดจากกระบวนการต่างๆ ของอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วย การผลิตเส้นใย การปั่นด้าย การทอผ้า และการฟอกย้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำ และจัดว่าเป็นมลพิษตัวหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียนั้นหรือสถานะแวดล้อม เนื่องจากสีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลงเป็นตัวกั้นการส่องแสงแดดในแหล่งน้ำส่งผลให้สถานะของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ตลอดจนเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความน่ารังเกียจกับแหล่งน้ำนั้นด้วย

โครงการพัฒนาออยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ เป็นพื้นที่ที่มีการประกอบกิจการโรงงานย้อมผ้าที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมและเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สามารถสร้างรายได้จำนวนมากแก่ชุมชนในพื้นที่ โดยทั่วไปสีย้อมที่ใช้มักมีความคงตัวและมีความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้ยากแก่การบำบัดด้วยวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี ซึ่งวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีนี้นิยมใช้ในการบำบัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนสีที่มีความสามารถในการละลายน้ำยังมียู๋ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว ดังนั้นการกำจัดโดยวิธีการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพที่ใช้ในการบำบัดสีย้อมที่มีความสามารถในการละลาย ซึ่งการบำบัดสีในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีเทคโนโลยีไม่ยุ่งยาก ประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำไม่มีปัญหาเรื่องสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อจำกัดเรื่องค่าใช้จ่ายที่สูง หากตัวดูดซับเป็นวัสดุธรรมชาติก็จะยิ่งช่วยลดต้นทุนได้มากยิ่งขึ้น และตัวดูดซับจากวัสดุธรรมชาติอาจมีประสิทธิภาพมากเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุธรรมชาติที่หาได้ง่ายอีกด้วย โดยการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้นำยางพาราซึ่งเป็นไม้ยืนต้น สกุล *Hevea* ที่เกิดจากการหักและโคนล้มจำนวนมากเนื่องจากอิทธิพลจากธรรมชาติ เช่น ลม การชะล้างพังทลายของดิน เป็นต้น เพื่อเป็นการนำใช้ประโยชน์ให้เกิดประโยชน์จึงนำไม้ยางพารามาเผาให้เป็นถ่านใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าออยตุงในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งและสารมลพิษของโรงงานฟอกย้อมอื่นต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าจากโรงย้อมผ้าลอยตุ่งในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยไม้อยางพาราและถ่านไม้อยางพารา
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าลอยตุ่งของไม้อยางพาราและถ่านไม้อยางพาราโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง



การตรวจเอกสาร

1. สีในน้ำทิ้ง

สีของน้ำตามธรรมชาติเป็นผลจากการที่น้ำนั้นไหลผ่านสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น ใบไม้ ใบหญ้า ซากสัตว์ ซึ่งมีลักษณะเป็นองค์ประกอบ เมื่อสลายตัวจะให้สารพวกแทนนิน กรดฮิวมิก และฮิวเมต ซึ่งเป็นสารที่มีสี และจากไอออนของโลหะในน้ำ เช่น เหล็ก แมงกานีสรวมทั้งจากแพลงตอนและการปะปนของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำซึ่งมีสีซึ่งเกิดจากการนำเปื้อนของพวกผักหญ้า ในบึง หนอง ไม่ถือน้ำสีที่จะทำให้ผู้บริโภคน้ำนั้นเปลี่ยนไปใช้น้ำจากแหล่งอื่นที่ใสกว่า แต่อาจจะมีพิษ ดังนั้น U.S. Public Health Service จึงได้กำหนดว่าน้ำที่จะใช้บริโภคไม่ควรมีสีเกิน 15 หน่วย (กรรณิการ์, 2525) สีของน้ำเกิดจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการคือ

1) เกิดจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ (organic matter) สีของน้ำที่เกิดจากอินทรีย์วัตถุ เช่น ต้นหญ้า ใบไม้เน่าเปื่อย ฯลฯ โดยมากมักจะมสีน้ำตาลปนเหลือง หรือสีน้ำชา ทั้งนี้เนื่องจากเกิดสารประกอบของพวก tannin acid ขึ้น

2) เกิดจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (industrial waste) สีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มักจะมีสีตามขบวนการผลิตของโรงงาน

จะเห็นว่าสีที่เกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์พวกต้นไม้อื่นๆ เป็นสีแท้จริงของน้ำ (true color) ส่วนสีที่เกิดจากตะกอนดินและเกิดจากการสะท้อนแสงของสารแขวนลอย ในน้ำนั้นเป็นสีปรากฏ (apparent color) ซึ่งสามารถแยกสีแท้จริงของน้ำและสีปรากฏได้โดยการตกตะกอนเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) (กรรณิการ์, 2525) ซึ่งสอดคล้องกับ มั่นสิน (2543) ได้แบ่งสีของน้ำออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) สีแท้หรือสีจริง (true color) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ สีแท้เกิดจากสารอินทรีย์ ซึ่งย่อยสลายยากประเภทฮิวมิกและฟัลวิก (humic acid and fluvic acid) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการย่อยสลายพืชต่างๆ กรดอินทรีย์เหล่านี้เป็นสารที่มีความคงตัวสูงมากจนไม่สลายตัวอีกต่อไปแล้ว

2) สีปรากฏ (apparent color) หมายถึง สีของน้ำที่กำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ เช่น ตกตะกอน หรือกรอง เป็นต้น การกำจัดสีปรากฏออกไปจะทำให้เกิดสีแท้ของน้ำ (ถ้ามี) การหาสีปรากฏหาได้โดยไม่ต้องผ่านการเซนตริฟิวล์

สีของน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป จะมีสีแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อม ชนิดปริมาณ ความเข้มข้นของสารละลาย และสารแขวนลอย รวมทั้งคุณภาพของแสง เช่น แหล่งน้ำที่มีหินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ปะปนอยู่มากจะมีสีเขียว หรือมีสีแดงหากมีออกไซด์ปะปนอยู่

นอกจากนี้แล้วในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสีของน้ำในลักษณะอื่นๆ ได้มีนักวิชาการหลายท่าน สรุปไว้หลายกรณี กล่าวคือ มั่นสิน (2543) อ้างถึงมาตรฐานของน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกว่า สีระดับสูงสุดที่ควรมีได้ 5 หน่วย (ในรูปแพลตตินัม-โคบอลต์ pt – co) และระดับสูงสุดที่ยอมให้มีได้ 50 หน่วย มาตรฐานน้ำประปานครหลวงได้กำหนดค่าสีที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม 20 หน่วย สีของน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปอาจจะมีค่าตั้งแต่ ค่าน้อยกว่า 1 หน่วย ถึง มากกว่า 200 หน่วย แหล่งน้ำธรรมชาติของประเทศไทยมีค่าสีอยู่ระหว่าง 10-25 หน่วย U.S. Public Health Service ได้กำหนดไว้ว่าน้ำที่บริโภคไม่ควรมีสีเกิน 15 หน่วย ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานคุณภาพน้ำประปานครหลวงที่กำหนดโดยกรมควบคุมมลพิษ (2538)

2. สีย้อมผ้า

2.1 คุณลักษณะของสีย้อม

สีย้อม (dyestuff) คือสีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมวัสดุสิ่งทอสีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียดที่สร้างมาเพื่อดูดซึมหรือดูดซับแสงโดยการทำให้อยู่บนหรือในผิวหน้าของวัตถุ แล้วเกิดการแพร่แทรกซึมเข้าสู่ภายในโครงสร้างของวัตถุ เพื่อที่จะทำให้อัตราการมีสีขึ้นมาสีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก(ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์(covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาว

คลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน แสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆกันไปซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาออกมาเป็นต่างกันไป ซึ่งความคงทนจะต่างกันออกไปตามแต่ละประเภท และการยืดยาวของสีประเภทนั้นๆ ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกระดังงา สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์ห่าน เป็นต้น

2) สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี ตัวอย่างเช่น Direct dye , Reactive dye , Acid dye , Disperse dye , Basic dye , Vat dye , Sulphur dye เป็นต้น

สีย้อมผ้ามีมากมายหลายชนิด การนำสีย้อมผ้ามาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีความมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสภาวะนี้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมผ้ามีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวกัน ในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยได้ดีคือ

1. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)
2. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waal's Forces)
3. แรงไอออน (Ionic Forces)
4. พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

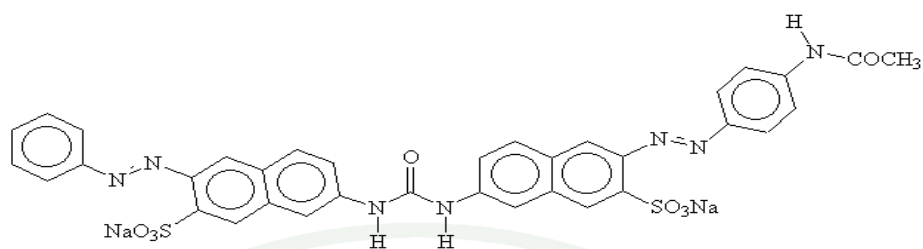
การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมผ้ากับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกันไป แรงดึงดูดทางเคมีที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ นอกจากอิทธิพลของแรงทั้ง 4 แล้ว อิทธิพลของรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีย้อมผ้าก็มีผลต่อการยึดติด หรือมีผลกระทบต่อการใช้กันอย่างมากมาย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมผ้ามีขนาดเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีย้อมผ้าดีขึ้นหรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมผ้ามีลักษณะแบนและมีความกว้างหรือความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีย้อมผ้ามีความคงทนสูงมากขึ้น

2.2 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมใช้ในการกระบวนการฟอกย้อม สามารถจำแนกได้หลายวิธี ดังนี้

2.2.1 จำแนกตามวิธีการใช้งาน

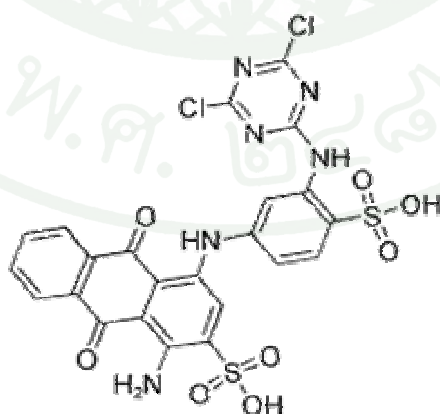
2.2.1.1 สีย้อมตรง (Direct Dyes) หรือเรียกว่าสีย้อมฝ้าย เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมจากน้ำละลายสีย้อมโดยตรงให้ซึมเข้าไปภายในเซลล์ลอส สามารถย้อมผ้าได้ทันทีโดยไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดเหมือนสีย้อมตัวอื่นๆ จึงเรียกว่า สีย้อมตรง หรือ สีย้อมโดยตรง สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีย้อมสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ ดังภาพที่ 1 นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเนื่องจากสีย้อมจะติดเส้นใยได้ด้วยโมเลกุลของสีย้อมจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน รวมทั้งการย้อมสีย้อมประเภทนี้จะอาศัยเกลือเพื่อช่วยเร่งการดูดซึมของสีย้อม แต่สีย้อมชนิดนี้จะไม่ทนต่อการซักน้ำและสีตกง่าย อย่างไรก็ตาม ในการย้อมสีย้อมตรงจะต้องมีการใส่สารพวกอเล็กโตรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟต ซึ่งมีสมบัติในการช่วยลดประจุบนผิวหน้าผ้าเส้นใย



ภาพที่ 1 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของสีไคเร็กซ์

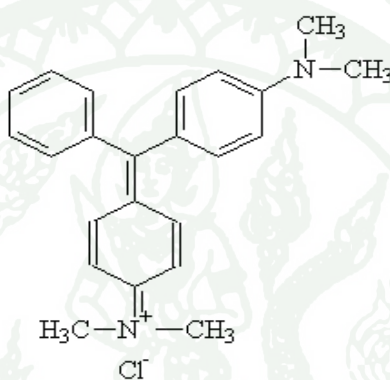
2.2.1.2 สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำ จะมีสมบัติเป็นเบส ใช้ย้อมใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กลายเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีคุณสมบัติละลายน้ำและดูดติดเส้นใย ทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยาดั้วสีจะยึดติดเส้นใย

สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ (1) กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70 – 75 องศาเซลเซียส และ (2) กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟจะให้สีที่สดใสและสีติดทนในทุกสภาวะเนื่องจากสีรีแอคทีฟ มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างเล็กจึงทำให้สีแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ดี อีกทั้งยังมีความคงทนต่อแสงและการซักได้ดี



ภาพที่ 2 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของสีรีแอคทีฟ (Reactive Blue 4)

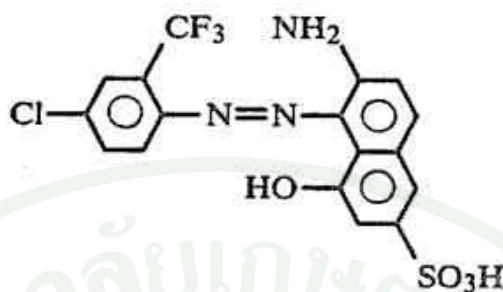
2.2.1.3 สีเบสิก (Basic Dyes) เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) สามารถละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนบางครั้งเรียกว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) สีประเภทนี้มีความคงทนต่ำสามารถใช้ย้อมใยอะคริลิกได้ จึงไม่สมควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เพราะจะไม่ทนต่อการซักและแสงแดด นิยมใช้กันในประเทศแถบตะวันออก ที่นิยมความสดใสของสีมากกว่าความคงทนของสี การเกาะติดของสีย้อมในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนสี ย้อมกับประจุลบบนเส้นใย สีกลุ่มนี้มักมีหมู่เอมีน (Amine Group) ในโมเลกุล



ภาพที่ 3 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของสีเบสิก

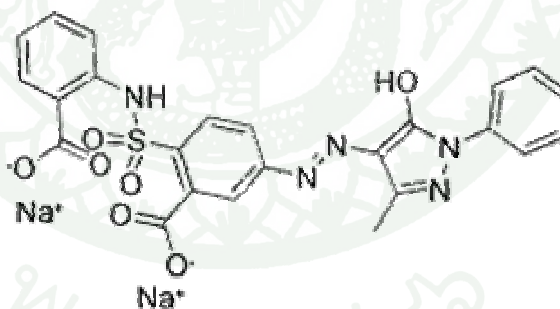
2.2.1.4 สีแอซิด (Acid Dyes) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ โมเลกุลสีมีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีกรดเกือบทุกตัวเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี สีในกลุ่มนี้ต้องย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด สีแอซิดดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บรักษาจึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าสีดูดความชื้นเข้าไป จะทำให้เสื่อมสภาพเร็ว ตัวสีประเภทนี้จะดูดติดใยโปรตีนโดยตรง จึงนิยมใช้ในการย้อมพวขนสัตว์และไหม

สำหรับการเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนโมเลกุลของสีกับประจุบวกบนโมเลกุลของเส้นใย และสีกลุ่มนี้มักมี กลุ่มซัลโฟนิค (Sulfonic Groups) ซึ่งเป็นตัวให้ประจุลบในน้ำ ดังภาพที่ 4 สีแอซิดบางประเภทสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ และไหม แต่ข้อจำกัดของสีแอซิดจะไม่ทนต่อการซักและไม่ทนต่อเหงื่อ



ภาพที่ 4 สูตร โครงสร้างของสีแอซิด (Acid Red 266)

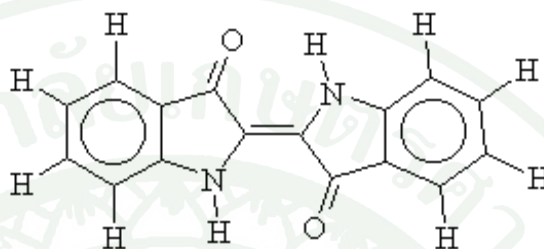
2.2.1.5 สีมอร์แดน (Mordant Dyes) หรือ สีโครม เป็นสีที่มีโครงสร้างเหมือนกับสีแอซิด เพียงแต่จะสามารถเชื่อมโยงกับโครเมียมเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนทที่ถาวรขึ้น สารประกอบโคออร์ดิเนทใหม่นี้จะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า จึงทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำเพิ่มขึ้น สีมอร์แดนมีคุณสมบัติ ในการเชื่อมเหมือนกับสีแอซิด แต่ใช้เป็นสีแอซิดไม่ได้ เพราะว่าถ้ายังไม่ได้ให้ตัวสีทำปฏิกิริยากับโครเมียม สีจะไม่คงทนต่อแสง



ภาพที่ 5 สูตร โครงสร้างโมเลกุลของสีมอร์แดนท์ (Mordant Yellow 30)

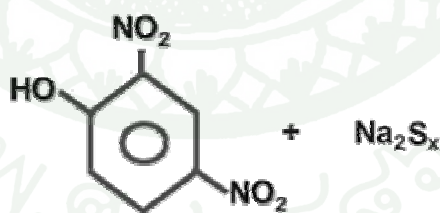
2.2.1.6 สีวัต (Vat Dyes) ได้ชื่อมาจากการที่ตัวมันเองไม่ละลายน้ำ ต้องอาศัยรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยในการละลาย สีวัตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงสามารถยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลสได้ โครงสร้างของสีประเภทนี้แตกต่างกันมาก สารประเภทเชิงซ้อนของสีทุกตัวจะต้องมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl, C=O) อย่างน้อยหนึ่งหมู่รวมอยู่ด้วยเสมอ ส่วนใหญ่ใช้เชื่อมในเส้นใยฝ้าย

สีย้อม มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีย้อมอินทรีย์ และสีย้อมอนินทรีย์-ควิโนน อย่างไรก็ตามสีย้อมทุกชนิดควรใช้น้ำอ่อนในการละลาย ถ้าในน้ำมีไอออนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมจะทำให้การละลายของสีไม่ดี



ภาพที่ 6 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของสีแว้ด

2.2.1.7 สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) หรือ สีย้อมถ่านเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบในส่วนที่เป็นโครโมฟอร์และส่วนของสายโซ่พอลิซัลไฟด์ดังภาพที่ 7 เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบในโครเจน สีย้อมชนิดนี้ย้อมง่าย มีราคาถูก และมีความคงทนต่อน้ำดี แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

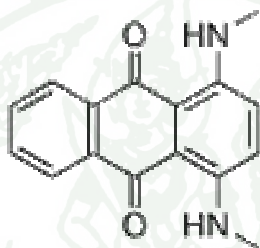


ภาพที่ 7 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของสีย้อมซัลเฟอร์

2.1.1.8 สีย้อมดิสเพิร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำต่ำ สามารถย้อมเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยอะซิเตท เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดีในสถานะที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี ซึ่งการย้อมจะใช้สารพาเพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง และการย้อมจะใช้ในรูปแขวนลอย ซึ่งในรูปนี้สามารถใช้กับ

เส้นใยที่ไม่ชอบดูดซึมสีที่ไม่ชอบน้ำได้ การทำให้สีอยู่ในรูปแขวนลอยหรือกระจายตัวนั้น ได้มาจากการบดผงสีในน้ำที่มีสารทำให้กระจายตัวที่มีปะจุลบจนกระทั่งขนาดของสีประมาณ 1-3 ไมครอน

สีดิสเพิร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในตัวสี ซึ่งมีได้แก่ สีอะโซ (Azo Dyes) และสีอะมิโนแอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanolamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกันดังภาพที่ 8 ทั้งนี้ สีดิสเพิร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรไดออกไซด์ เป็นต้น



ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้าง โมเลกุลของสีดิสเพิร์ส (Disperse Blue 14)

2.2.2 จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

สีอะโซที่จำหน่ายตามท้องตลาดในปัจจุบันมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่เป็นโครงสร้างหลักๆ อยู่มากกว่า 30 ชนิด แต่ที่ใช้งานกันมากจริงๆ มีอยู่ไม่ถึง 10 ชนิด ซึ่งโครงสร้างที่สำคัญ ได้แก่

2.2.2.1 สีอะโซ (Azo Dyes) เป็นสีอะโซที่มีกลุ่มอะโซ ($\text{N}=\text{N}$) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล สีอะโซกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 50 ของสีอะโซที่ใช้ทั้งหมด คุณสมบัติที่สำคัญของสีอะโซกลุ่มนี้ คือ มีสีให้เลือกครบทุกโทนสีแต่โดยทั่วไปจะมีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และดำ มีกรรมวิธีการสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใสและความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี และราคาไม่แพง

2.2.2.2 สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone Dyes) เป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล และส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้โดยอาศัยแอนทราควิโนนเป็นสารเริ่มต้น สีย้อมกลุ่มนี้มีความสำคัญเป็นอันดับสองรองจากสีอะโซ โดยครอบคลุมประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมดสีที่มีความสำคัญ คือ สีม่วง ฟ้ำ เขียว และแดงสด เป็นสีที่มีความสว่างสดใสดี และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มของสีน้อยกว่าสีอะโซ และยังมีราคาแพงอีกด้วย

2.2.2.3 สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes) เป็นสีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีย้อมนี้เป็นสีที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในบรรดาสีย้อมทั้งหมด เนื่องจากเป็นสีที่มีราคาถูกจึงนิยมใช้ย้อมสีทึบๆ ที่ต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ น้ำตาล และน้ำเงิน สีย้อมนี้มีให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีทึบไม่สดใส

2.2.2.4 สีย้อมอินดิโกอยด์ (Indigoid Dyes) เป็นสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน (Indigotin) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของสีอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

2.2.3 จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี โดยทั่วไปสีย้อมเหมาะสำหรับการย้อมเส้นใยประเภทโปรตีนไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เส้นใยประเภทเซลลูโลส สีย้อมที่เหมาะสมกับการย้อมไหม ขนสัตว์ ฝ้าย และเรยอน (Rayon) ส่วนใหญ่จะไม่สามารถย้อมเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นมาได้ สีดิสเพิร์สเหมาะสำหรับเส้นใยประเภทอะซิเตต (Acetate) หรือ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และไม่เหมาะที่จะนำมาย้อมฝ้ายหรือขนสัตว์ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

เส้นใย	ประเภทของสี
ฝ้าย	Direct, Sulphur, Azo, Vat, Reactive
ลินิน	Direct, Sulphur, Azo, Vat, Reactive
ขนสัตว์	Acid, Metal-complex, Mordant, Reactive
ไหม	Acid, Direct, Reactive, Basic
เรยอน	Direct, Reactive
อะซิเตต	Disperse
ไนลอน	Acid, Modified basic, Metal-complex
โพลีเอสเตอร์	Disperse
อะคริลิก	Modified basic, Modified acids

ที่มา : นิรนาม (2537)

2.2.4 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สีชนิดละลายน้ำ และสีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ

2.2.4.1 สีชนิดที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ สีแอซิด สีเบสิก สีไคเรท และสีรีแอคทีฟ

2.2.4.2 สีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ สีอะโซ สีคิสเพิร์ส สีวัต สีฟิกเมนต์ สีซัลเฟอร์ และสีเมทัลคอมเพล็กซ์

3. หลักการย้อมผ้า

กระบวนการย้อมผ้าโดยทั่วไปมักจะนำสีย้อมมาทำให้อยู่ในรูปของสารละลายหรือสารคิสเพิร์ส-ชัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำมาย้อมเส้นใยที่ต้องการ ตามด้วยกระบวนการทำให้สีย้อมติดแน่นกับเส้นใยเพื่อให้มีความทนต่อการซักด้วยน้ำยาต่างๆ การย้อมสีโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยวิธีการ ดังต่อไปนี้

- 1) การทำให้เกิดการแพร่กระจายหรือซึมผ่านบนพื้นผิวของเส้นใย
- 2) การดูดซึมสีของเส้นใย
- 3) การซึมผ่านของโมเลกุลสีผ่านชั้นกั้นทางจลนศาสตร์ เข้าไปสู่ภายในเส้นใย
- 4) การดูดซับ
- 5) การถ่ายสีด้วยแรงทางเชิงกลโดยการอัด
- 6) การกักเก็บเชิงกล
- 7) การสร้างพันธะทางเคมีกับอนุภาคของเส้นใย
- 8) การละลายในเส้นใย เช่น การละลายของสีย้อมชนิดดิสเพิร์สที่เป็นของแข็งในเส้นใย โพลีเอสเตอร์
- 9) ปฏิกริยาเคมีบนเส้นใยโดยปกติแล้ว ขั้นตอนที่สีซึมผ่านเส้นใย จะเป็นขั้นตอนที่ช้า และมีผลต่ออัตราการย้อมสีมากที่สุด

3.1 ตัวแปรที่สำคัญในการย้อมสี

3.1.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมเส้นใยประเภทโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ฝ้าย และเรยอน ส่วนใหญ่จะไม่สามารถย้อมเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ห้ขึ้นมาได้ สีย้อมประเภทดิสเพิร์ส ก็เหมาะสำหรับเส้นใยประเภทอะซิเตต หรือ โพลีเอสเตอร์ และเช่นเดียวกันไม่เหมาะที่จะนำมาย้อมฝ้ายหรือขนสัตว์

3.1.2 การใช้สารช่วยอื่นๆ

สืบเนื่องจากระบบย้อมสี ความสม่ำเสมอของสีขึ้นกับ pH ของน้ำย้อมหรือความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ การใช้สารเพิ่มความสม่ำเสมอใช้ได้กับการย้อมเส้นใยหลายระบบ สารเคมีที่เป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน จะถูกนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณการใช้ออกซิเจนในกระบวนการย้อม สารเคมีที่ใช้สำหรับการขยายตัวจะใช้กับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ เพื่อที่จะช่วยให้เส้นใยดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้น สารช่วยย้อมแบ่งออกเป็น 7 ประเภท

- 1) กรดใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอน เมื่อใช้ย้อมสีแอซิด
- 2) ด่างใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีอะโซวัต และกำมะถัน
- 3) เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมแอซิดและการย้อมเส้นใยเซลลูโลส
- 4) สารช่วยให้สีสม่ำเสมอใช้กับสีวัต
- 5) สารนำ (Carrier) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- 6) สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- 7) สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวซ์สีบางชนิด เพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าเส้นใย

3.1.3 อุณหภูมิในการย้อมสี

ในแต่ละระบบการย้อมสีก็จะมีลักษณะแตกต่างเฉพาะแบบกันออกไป การย้อมที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้การย้อมสีติดมากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้สีย้อมกระจายหรือซึมผ่านได้ดีขึ้น

3.1.4 น้ำย้อม/พื้นผิวสัมผัส

ลักษณะและอัตราการหมุนเวียนของของเหลว เช่น ในเครื่อง Jet เครื่อง Beam หรือ Package จะทำหน้าที่ควบคุมความสม่ำเสมอของสีย้อมให้คงที่

3.1.5 วิธีการต่างๆ และเทคนิคในการย้อมสี

วิธีการและเทคนิคบางอย่างที่ทำให้สีย้อมติดแน่นบนเส้นใยอย่างถาวร แต่ละวิธีจะมีลักษณะเฉพาะของตัวเอง เช่น Mordanting, Vatting และ After-Treatments เป็นต้น

3.1.6 อัตราส่วนของเหลว

อัตราส่วนของเหลวที่ใช้ในขณะย้อมสี มีผลกระทบอย่างมากต่อการใช้สีทุกชนิด อัตราส่วนของเหลวถูกกำหนดโดยชนิดของเครื่องที่ใช้ การใช้อัตราส่วนของเหลวในอัตราที่ต่ำจะทำให้ปริมาณการใช้สีรีแอคทีฟเป็นไปอย่างประหยัด ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในอ่างย้อม

4. น้ำเสียและมลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

4.1 ปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม

หากคิดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตสิ่งทอแล้ว จะพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วในการผลิตน้ำหนัก 1 ปอนด์ จะใช้น้ำในกระบวนการ 20 แกลลอน หรือ ผ้า 1 กิโลกรัม จะใช้น้ำ 167 ลิตร ส่วนปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นคำนวณในแง่ของการใช้น้ำแต่ละกระบวนการและการผลิตภัณฑ์สิ่งทอ นอกจากปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการแล้ว ยังมีการใช้สารเคมีต่างๆ มากมาย เช่น สีย้อม สีพิมพ์ เกลือ สารช่วยย้อม/พิมพ์ เป็นต้น ส่วนที่เหลืออยู่จากกระบวนการผลิตก็จะกลายเป็นมลพิษในน้ำ ซึ่งต้องทำการบำบัดต่อไป

4.2 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

4.2.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม พิมพ์ และ ตักแต่งเสร็จ น้ำส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการจะ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำที่ใช้ในการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะมีความเข้มข้นของสีสูง และน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม โดยน้ำในส่วนนี้จะมีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

4.2.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำ จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง มันจะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย

4.2.3 น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการย้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น และส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4.2.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องและทำความสะอาดโรงงาน

4.3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจะมีลักษณะ ดังต่อไปนี้

4.3.1 มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD และ COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตักแต่ง รวมถึงไขมัน และตัวทำละลายต่างๆ

4.3.2 มีความเป็นด่างสูง สารที่ทำให้น้ำมีความเป็นด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

4.3.3 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (Dissolved Solid) สูง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

4.3.4 มีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า

4.3.5 มีโลหะหนักเจือปน โลหะหนักนี้จะมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะพวกทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี

4.3.6 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในปริมาณมาก

4.4 ความเป็นพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (นันทยา, 2537)

สารเคมีและสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมียู่มากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีความเป็นพิษและทำให้เกิดมลพิษที่แตกต่างกันไป ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติความเป็นพิษ มลพิษของสีย้อม และสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอไว้มากมาย ทำให้ทราบสมบัติความเป็นพิษของสารที่ใช้

4.4.1 การตรวจวัดความเป็นพิษของสาร

ความเป็นพิษของสาร คือ อันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เมื่อสัมผัสกับสารนั้น โดยมนุษย์จะได้รับอันตรายจากสารพิษ 3 ทาง คือ

ก. โดยการสูดดมเข้าไปทางจมูก ในกรณีที่สารนั้นเป็นก๊าซหรือสารระเหย

ข. โดยการสัมผัสทางผิวหนัง

ค. โดยการบริโภค

โดยปกติการตรวจวัดอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น 3 ทางข้างต้น นิยมใช้หนูเป็น สัตว์ทดลอง และได้มีการกำหนดหน่วยวัดที่นิยมนำมาใช้กันมากมีดังนี้

1) ค่าทีแอลวี (TLV)

ค่าทีแอลวี ย่อมาจาก Threshold Limit Value หมายถึงสารที่อาจเกิดจากการ สูดดมเข้าไปทางจมูก และมีความสำคัญโดยเฉพาะกับสารที่ระเหย หรือเป็นแก๊สในบรรยากาศปกติ สารที่มีค่าทีแอลวีต่ำจะมีความเป็นพิษสูง ตัวอย่างค่าทีแอลวีของสารเคมีบางตัว แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าทีแอลวีของสาร

ตัวอย่างสาร	ค่าทีแอลวี (ส่วนในล้านส่วน)
คาร์บอนมอนอกไซด์	50
แอมโมเนีย	25
เบนซีน	10
ฟอร์มาลดีไฮด์	2
กรดซัลฟูริก	1
กลอรีน	1

ที่มา: นันทยา (2537)

2) ค่าแอลดี 50 (LD₅₀)

ค่าแอลดี 50 ย่อมาจาก Lethal Dose หมายถึง ปริมาณสารที่ให้กับหนูทดลอง แล้วทำให้หนูที่ถูกทดลองตายไป 50% ของจำนวนหนูทดลองที่ใช้ทั้งหมด หน่วยวัดนี้สามารถใช้ ประเมินความเป็นพิษของสาร หากมีการบริโภคเข้าไป สารที่มีค่าแอลดี 50 ต่ำจะแสดงความเป็นพิษ สูง

ตารางที่ 3 ความเป็นพิษของสารที่ค่าแอลดี 50 ต่างๆ

ระดับความเป็นพิษ	ความเป็นพิษ	ค่าแอลดี 50 (มก./กก.)	ปริมาณที่จะเป็นอันตราย/คน
1	ต่ำมาก	>15,000	> 1,000 กรัม
2	ต่ำ	5,000 - 1,500	350 – 1,000 กรัม
3	ปานกลาง	1,000 – 1,500	35 – 350 กรัม
4	สูง	300 – 1,000	3.5 – 35 กรัม
5	สูงมาก	50 – 300	0.35 – 3.5 กรัม
6	สูงมากเป็นพิเศษ	> 250	0.35 กรัม

ที่มา : นันทยา (2537)

4.4.2 ความเป็นพิษของสีข้อม

โดยทั่วไปสีข้อมเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่ได้มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศ ไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกข้อมและพิมพ์ผ้ามีอันตราย ตายหรือเจ็บป่วยสูงกว่าอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีข้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางดังกล่าวข้างต้น ตัวอย่างค่าแอลดี 50 ของสีข้อมแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ค่าแอลดี 50 ของสีข้อมเปรียบเทียบกับไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารพิษร้ายแรง

สารตัวอย่าง	ค่าแอลดี 50 (มก. /กก.)
สีข้อม < 1%	>5,000
สีข้อม < 10%	2,000 – 5,000
สีข้อม < 82%	>250
ไซยาไนด์	15

ที่มา : นันทยา (2537)

4.5 มลพิษที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม มีดังนี้

4.5.1 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (Toxic to Stream Life) น้ำเสียจากน้ำย้อมผ้ามักมีสารที่มีพิษ ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น สารประกอบอะนิลีน เป็นต้น

4.5.2 การลดของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Oxygen Depletion in Stream Water) น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ และใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสีย้อมบางประเภท

4.5.3 ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง (Physical Impairment of Stream Condition) น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น ทำให้สภาพลำน้ำไม่น่าดู นอกจากนี้สีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น

5. การกำจัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมเนื่องจากการย้อมผ้านั้น ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและถูกปล่อยลงในแหล่งน้ำ แม้จะมีการโต้เถียงว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่ก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนจะถูกปล่อยออกนอกโรงงานจะต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการต่างๆ ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งที่ใช้อยู่ ในปัจจุบันมี 5 ประเภทหลัก ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี

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

ที่มา : นิรนาม (2536)

6. ต้นยางพารา

ไม้ยางพารา (Pará rubber wood หรือนิยมใช้ว่า rubberwood หรือ parawood) หรือบางครั้งเรียกอย่างย่อว่า ไม้ยาง มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis*

6.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ต้นยางพาราเป็นต้นไม้ขนาดใหญ่ มีอายุยาวนานเป็นร้อย ๆ ปี ลักษณะของต้นยางพารานั้นมีลักษณะเป็นต้นไม้ที่สูง ซึ่งลำต้นสามารถสูงได้มากกว่า 30 เมตร มีลักษณะส่วนต่างๆ ดังนี้ ราก เป็นระบบรากแก้ว ลำต้นกลมตรง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ เนื้อไม้ ยางพารา จัดเป็นไม้เนื้ออ่อน เนื้อไม้มีสีขาวยปนเหลืองอยู่ด้านในกลางลำต้น เชื้อเจริญ เป็นเชื้อบางๆ อยู่โดยรอบเนื้อไม้มีหน้าที่สร้างความเจริญเติบโตให้กับต้นยาง และเปลือกไม้ เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากเชื้อเจริญออกมาด้านนอกสุด ช่วยป้องกันอันตรายที่จะมากระทบต้นยาง เปลือกของต้นยางนี้มีความสำคัญต่อเกษตรกรชาวสวนยางมาก เนื่องจากท่อน้ำยางจะอยู่ในส่วนนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเปลือกด้านในที่ติดอยู่เชื้อเจริญจะมีท่อน้ำยางอยู่มากที่สุด ใบเป็นใบประกอบโดยทั่วไป 1 ก้านใบจะ

มีใบย่อย 3 ใบ มีหน้าที่หลักในการปรุงอาหารหายใจและคายน้ำ ใบยางจะแตกออกมาเป็นชั้นๆ เรียกว่า "ฉัตร" ระยะเวลาเริ่มแตกฉัตรจนถึงใบในฉัตรนั้นแก่เต็มที่จะใช้เวลาประมาณ 2-3 เดือน ยางจะผลัดใบในฤดูแล้งของทุกปี ยกเว้นยางต้นเล็กที่ยังไม่แตกกิ่งก้านสาขาหรือมีอายุไม่ถึง 3 ปี จะไม่ผลัดใบ ดอกมีลักษณะเป็นช่อมีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกยางทำหน้าที่ผสมพันธุ์โดยการผสมแบบเปิด ดอกยางจะออกตามปลายกิ่งของยางหลังจากที่ต้นยางผลัดใบ ผลมีลักษณะเป็นพู่โดยปกติจะมี 3 พู่ ในแต่ละพู่จะมีเมล็ดอยู่ภายใน ผลอ่อนมีสีเขียวผลแก่มีสีน้ำตาลและแข็ง เมล็ดมีสีน้ำตาลลายขาวคล้ายสีของเมล็ดคะนง ยาวประมาณ 2-2.5 เซนติเมตร กว้างประมาณ 1.5-2.5 เซนติเมตร หนักประมาณ 3-6 กรัม เมล็ดยางเมื่อหล่นใหม่ๆ จะมีเปอร์เซ็นต์ความงอกสูงมาก แต่เปอร์เซ็นต์ ความงอกนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในสภาพปกติเมล็ดยางจะรักษาความ งอกไว้ได้ประมาณ 20 วันเท่านั้น และน้ำยางเป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลืองข้นขึ้น อยู่ในท่อน้ำยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง ในน้ำยางจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วนคือส่วนที่เป็น "เนื้อยาง" และส่วนที่ "ไม่ใช่ยาง" ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางแห้งประมาณ 25-45 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 9 ต้นยางพารา

6.2 คุณสมบัติทางเคมี

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นกลม สูงปานกลาง เปลือกสีเทาดำ มองทางด้านหน้าตัดจะเห็นท่อน้ำยาง (Latex Vessel) ต่อกันเป็นวงตามแนวด้านสัมผัส (tangential) เนื้อไม้มีสีขาวอมเหลืองเมื่อสด และจะมีสีขาวจางเมื่อแห้ง เนื้อหยาบปานกลาง เส้นตรง วงรอบปีไม่เห็นชัด ไม่มีแกน เรย์ (Ray) มีขนาดเล็กมากและมีสีอ่อนกว่าเนื้อไม้ พอร์ (Pore) เป็นแบบ radial multiple ซึ่งการเรียงตัวจะตัดกันระหว่างเรย์ กับ metatracheal parenchyma ทำให้มองเห็นเนื้อไม้คล้ายตาข่าย มีความหนาแน่นพื้นฐาน (Basic density) 0.56-0.65 กรัม/ลบ.ซม. สำหรับที่ความชื้น 15% มีความ

หนาแน่นประมาณ 0.67-0.74 กรัม/ลบ.ซม. โดยมีค่าใกล้เคียงกับไม้ Soft Maple ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของยางพารานั้นๆ สำหรับขนาดของเส้นใยไม้ยางพาราประมาณ 1.26 มม. โดยมีความกว้างประมาณ 0.021 มม. คุณสมบัติทางเคมีของไม้ยางพาราสดโดยคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง ประกอบด้วย สารแทรก (Extractives) 13.28% (สำหรับสารแทรกแบ่งเป็นสารที่สามารถละลายในน้ำรวม 10.36% และละลายได้ในสารละลายรวม 23.24%) เซลลูโลส (Cellulose) 50.63% (Holocellulose 78.72%, Alpha cellulose 49.41%) เพนโตซาน (Pentosan) 17.17% ลิกนิน (Lignin) 18.06% และเถ้า (Ash) 0.86% บางรายงานพบว่าคุณสมบัติทางเคมีของไม้ยางพาราแตกต่างกันไปจากนี้ โดยเฉพาะสัดส่วนของสารแทรก (5.59%) ซึ่งเข้าใจว่าขึ้นอยู่กับพันธุ์ของยางพาราและวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สารแทรกแม้เป็นองค์ประกอบเพียงส่วนน้อยแต่จะมีบทบาทสำคัญ คือ การมีปริมาณสารแทรกชนิดต่างๆ อยู่เล็กน้อยไม่เท่ากันจะทำให้ไม้มีสีคล้ำหรือมีสีแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังทำให้มีความทนทานต่อการทำลายของแมลงและเห็ดราแตกต่างกันด้วย การมีปริมาณสารแทรกอยู่มากนั้นมีส่วนสำคัญที่ทำให้ไม้มีการคงรูปดีขึ้น การหดตัวเมื่อแห้งจะน้อยกว่าปกติและหลังจากแห้งแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างน้อย แม้ว่าจะถูกนำไปใช้งานในสภาวะอากาศที่มีความรุนแรง

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิดของไม้ยางพารา

Proximate analysis	ไม้ยางพารา
Moisture, %	45.00
Ash, %	1.59
Volatile Matter, %	45.70
Fixed Carbon, %	7.71
Ultimate Analysis	
Carbon, %	25.58
Hydrogen, %	3.19
Oxygen, %	24.48
Nitrogen, %	0.14
Sulfur, %	0.02
Chlorine, %	0.01
Ash, %	1.60
Moisture, %	45.00

ที่มา: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (2553)

6.3 ลักษณะทางนิเวศวิทยา

ต้นยางพาราชอบขึ้นในดินร่วน ซึ่งมีการระบายน้ำได้ดีผิวดินดี และดินนั้นควรมีความเป็นกรดมี pH ระหว่าง 4-5.5 ต้องการฝนพอสมควร ขนาดปีละประมาณ 2,00-2,500 มิลลิเมตร หรือประมาณ 80-100 นิ้ว เติบโตได้ดีสม่ำเสมอทุกเดือนได้มากเท่าใดยิ่งดี เพราะยางพาราต้องการความชื้นสูง อุณหภูมิอยู่ในระดับ 75-80 องศาฟาเรนไฮต์ จึงเหมาะที่จะปลูกในระหว่างเส้นขนาน 28 องศาเหนือ และ 28 องศาใต้ เช่นเดียวกับพื้นที่ขึ้นอยู่ในอเมริกากลางและอเมริกาใต้ อันเป็นถิ่นเดิม ไม่ควรปลูกในที่สูงกว่าระดับน้ำทะเล 1,000 ฟุต

6.4 ประโยชน์

เป็นไม้ที่นิยมนำมาใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ไม้คุณภาพสูง เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของไม้ยางที่ เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ เช่น ความหนาแน่นของเนื้อไม้ สีสันที่สวยงาม การหดตัว น้อย และสามารถตกแต่งผิวได้ง่าย นอกจากนี้ไม้ยางพารายังได้ชื่อว่าเป็นไม้ที่เป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม้ยางพารานั้นได้มีการนำส่วนต่างๆ ของต้นยางมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนประกอบทั้งหมดสามารถนำมาใช้ได้ทุกส่วน ตั้งแต่ยางของต้นไม้ จนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่ตัดไม้ ออกมาทำเป็นเฟอร์นิเจอร์

7. การดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดย โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่ เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การ จัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัว ดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ นั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพ สมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถ นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัว ถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่าง ของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับใน ดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การ

ใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (Landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ

7.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

7.1.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ
- 2) การแพร่ผ่านภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
- 3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

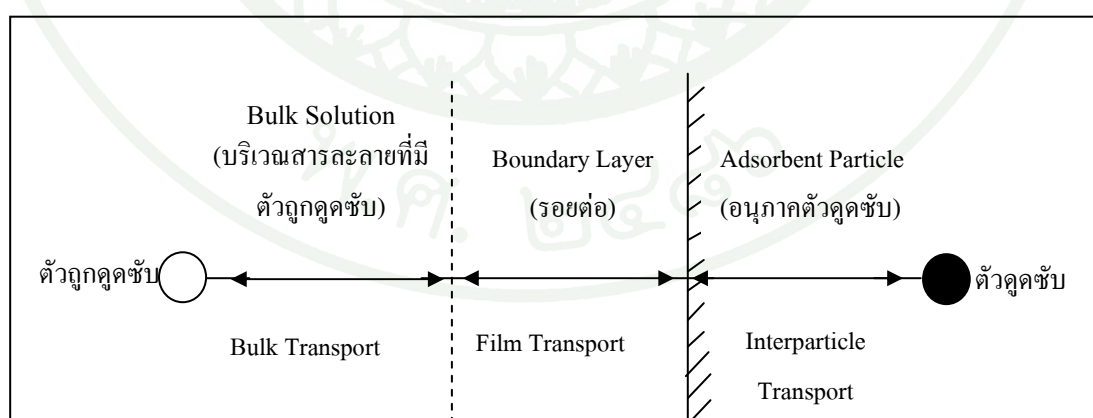
7.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

1) การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวเข้าสู่สภาวะสมดุลน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้น

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



ภาพที่ 10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

7.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

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

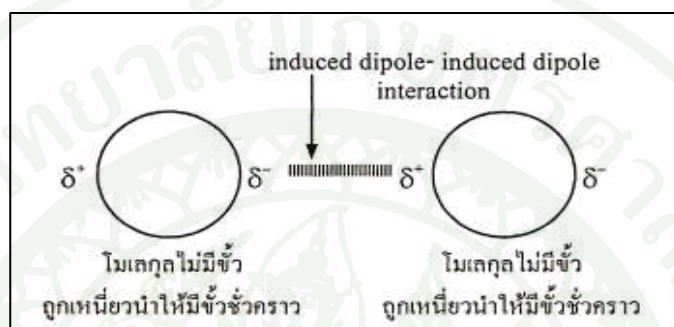
7.2.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและ โมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภทดังนี้

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

แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่ง จะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุล

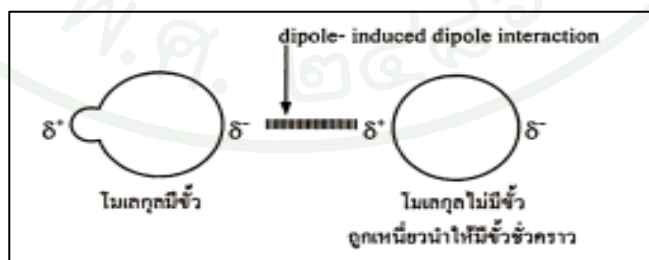
แล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อนอิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

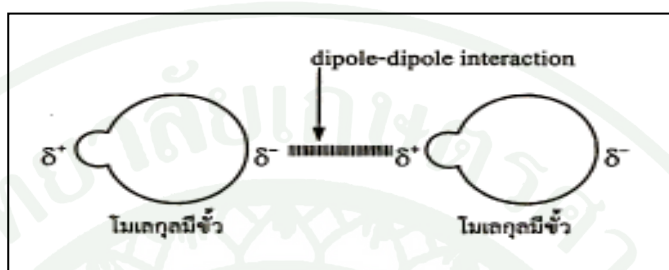
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Dipole-Induced Dipole Attraction) ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Attraction) ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

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

แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลของคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01 – 0.1 ของพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้น การดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือเกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (Desorption) อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างถูกดูดซับและตัวดูดซับ

7.2.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

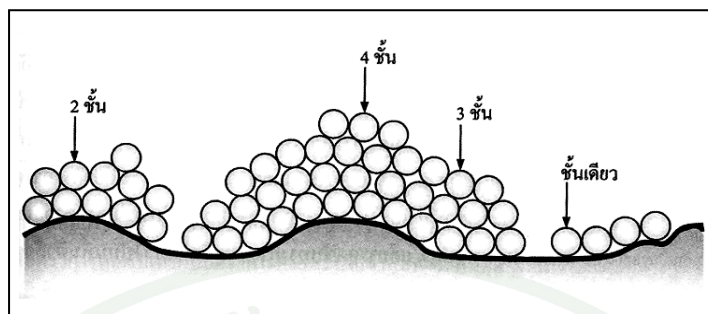
แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโคเวเลนต์ การใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันโดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible Process) จึงไม่เกิดการคาย

7.3 รูปแบบของการดูดซับ

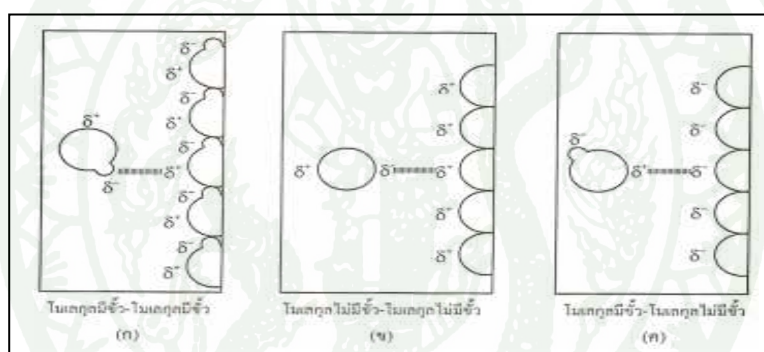
สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

7.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption or Physical Adsorption or Van Der Waals Adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 14 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 15 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ

- หมายเหตุ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
- (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่
- (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

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

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ ประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรี ต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรี ต่อโมลของตัวถูกดูดซับ

7.4 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 ขี้เลื่อย เปลือกกุ้ง (นำมาทำเป็นไบโอดีซาน) กากกาแฟที่ใช้แล้ว กากชาที่ใช้แล้ว กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ ถ่านจากการเผาต้นพุทธรักษา ต้นรูปยาสูบ ช้างข้าวโพด ต้นยางพารา ต้นกกกลบ และเถาเถาเป็นต้น

5) สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรียยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

7.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับ จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้ รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้มากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

3) ขนาดและลักษณะของสารดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในโพรง (พอดีเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

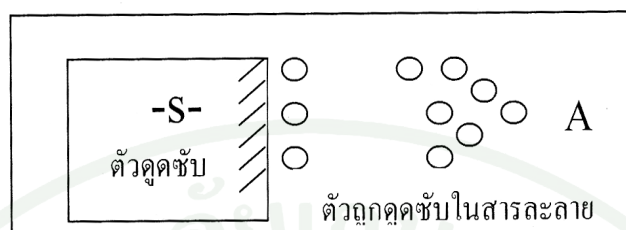
4) ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

5) พิเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของสารดูดซับได้ดี

6) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบกระบวนการคายความร้อน

7) เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

7.6 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 16 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

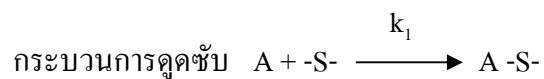
เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ ภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

S - เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$(1-q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย 1

$$r_2 = k_2(q)$$

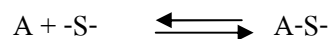
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล

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

q = เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ
หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมลต่อกิโลกรัม (mol.kg^{-1})
หรือ โมลต่อกรัม (mol.g^{-1})

W = เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กรัม หรือกิโลกรัม

V = เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร
(cm^3) หรือลูกบาศก์เดซิเมตร (dm^3)

C = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความ
เข้มข้น เช่น โมลต่อลิตร

q อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (Adsorption Capacity)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

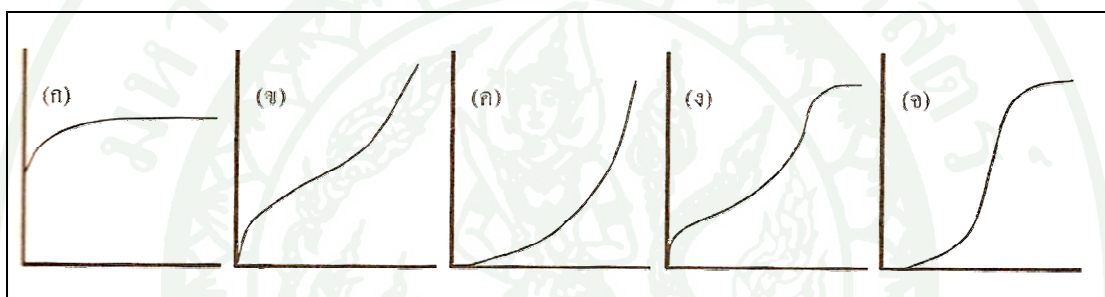
ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

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

7.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

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

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

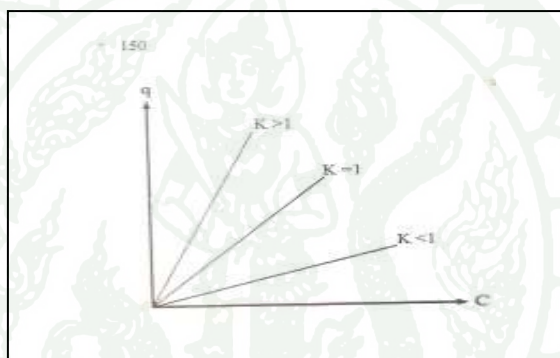
สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

7.7.1 สมการการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และค่า C ตามสมการ

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

จะได้ $q = KC$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัด แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแรงแบบแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

7.7.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Adsorption Surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

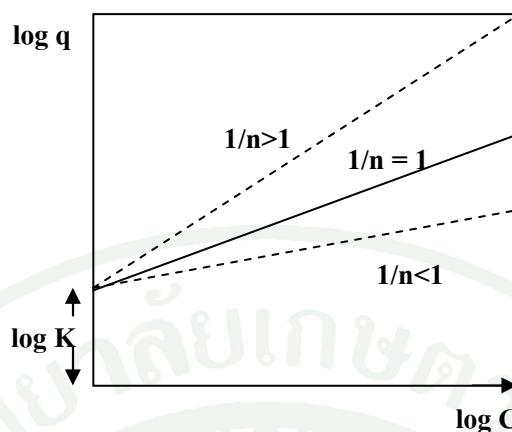
$$q = KC^{1/n} \dots\dots\dots(4)$$

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 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนดิช

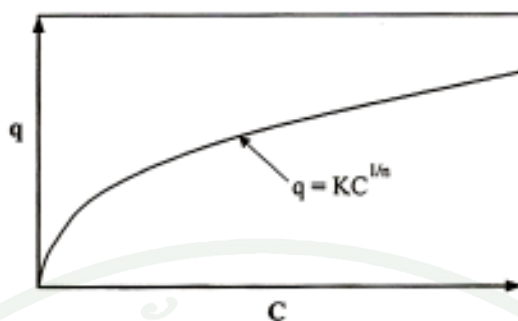
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

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

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

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

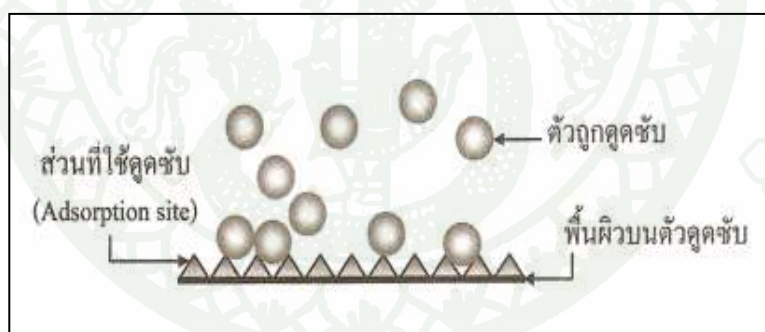
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (4) ดังภาพที่ จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้



ภาพที่ 20 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

7.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดย นักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932

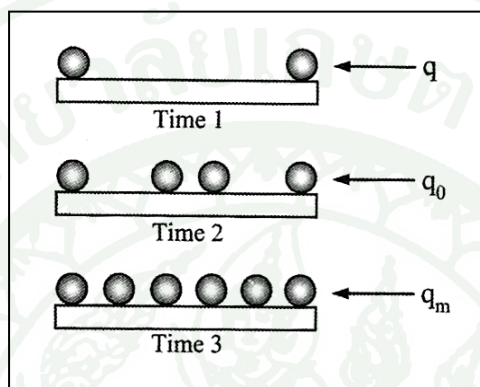


ภาพที่ 21 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับ

ไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

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

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

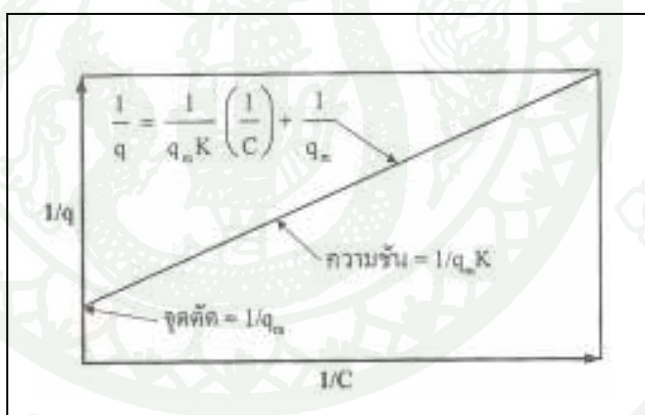
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

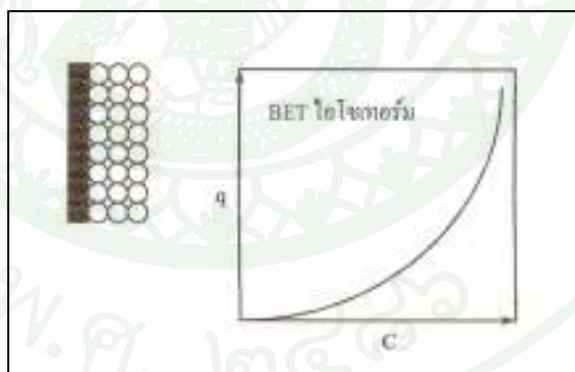
7.7.4 สมการการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett Teller หรือ BET Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่าน ในปี ค.ศ.1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

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

สมการการดูดซับแบบเบทถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



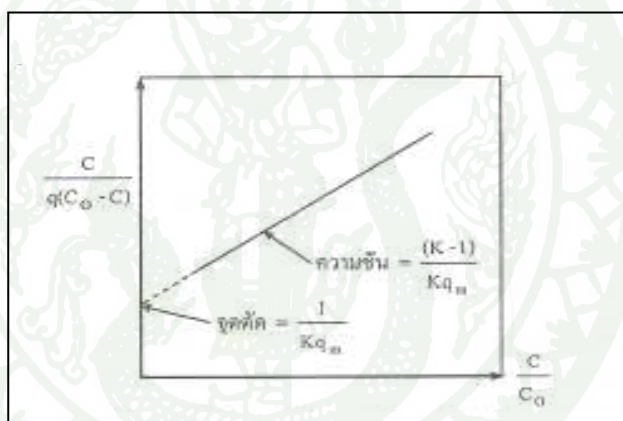
ภาพที่ 24 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับค่า $\frac{C}{C_0}$ จะได้กราฟเส้นตรง
มีความชันเท่ากับ $\frac{(K-1)}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$



ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากที่กล่าวมาทั้งหมด พอสรุปได้ว่า สมดุลการดูดซับเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ที่สภาวะสมดุลอิทธิพลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับจะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งจะบอกด้วยอัตราส่วนปริมาณของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้น ได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างแพร่หลายและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

รัตน (2543) ศึกษาถึงการดูดซับของสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตซาน พบว่า ตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสีแอซิด สีรีแอทิก และสีไคเร็กต์ ได้ดีในสารละลายกรดที่มีค่าพีเอช 5 หรือต่ำกว่า โดยไคโตซานจะดูดซับสีย้อมดังกล่าวได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและเปลือกกุ้ง และสีเบสิกจะถูกดูดซับได้ดีในสารละลายเบสที่มีค่าพีเอช 10 หรือสูงกว่า โดยเปลือกกุ้งจะดูดซับสีเบสิกได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและไคโตซานมาก ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวดูดซับมีขนาดเพิ่มขึ้น ปริมาณของสีทุกชนิดที่ถูกดูดซับยกเว้นสีเบสิก จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่าดีกรีโอฟดีอะเซทิลเลชันของไคโตซานเพิ่มขึ้นยกเว้นสีเบสิก แรงปฏิกิริยาระหว่างประจุเป็นแรงสำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องในการดูดซับของสีย้อมบนตัวดูดซับ

กิติโรจน์ และคณะ (2550) ศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าว พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินมีอัตราเร็วของการดูดซับสูงกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ความสามารถในการดูดซับยังมีค่าสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง แม้เพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมความสามารถในการดูดซับไม่เพิ่มขึ้นตาม นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการดูดซับดีที่สารละลายสีมีค่าเป็นกรดอ่อน ขนาดของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดที่อยู่ในช่วง 125 – 150 ไมโครเมตร เหมาะสมกับการดูดซับสีย้อม แบบจำลองของการดูดซับโดยทฤษฎีของแลงเมียร์สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดี ซึ่งคำนวณค่าการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าวได้เท่ากับ 222.22 และ 158.73 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ เมื่อใช้เกลือแอมโมเนียมในการปรับสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินในสถานะที่ดูดซับที่เหมาะสม ดังนั้นสามารถใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ในการดูดซับสีย้อมทดแทนถ่านกัมมันต์จากถ่านหินได้ ถึงแม้ว่าอัตราการดูดซับจะช้ากว่าเล็กน้อย

ขนิษฐา (2550) ศึกษาการดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยตะกอนจุลินทรีย์ พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตกับจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตมีความแตกต่างกัน ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตมีความสามารถในการดูดซับสีได้สูงกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว และยังพบอีกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสี่พระยาที่มีความสามารถในการดูดซับสีได้มากกว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานฟอกย้อม สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียรวมสี่พระยาจะใช้เวลาในการสัมผัส 6 ชั่วโมง ในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานฟอกย้อมใช้ระยะเวลาในการสัมผัสเพียง 3 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับที่มากที่สุดเท่ากับ 6.12 มิลลิกรัมต่อกรัม-เซลโดยที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมกับตะกอนจุลินทรีย์มีชีวิตเท่ากับ 7 ในขณะที่ตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตพบว่าสภาวะความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะต่ำลง

จินตนา (2550) ศึกษาถึงการเติมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีไคเร็กซ์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ซึ่งพบว่า ผงตัวดูดซับสามารถกำจัดสีไคเร็กซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นไปตามกลไกของสมการการดูดซับของฟรันทซ์และแลงเมียร์ โดยใช้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นผงและปรับสภาพและไม่ปรับสภาพ ซึ่งทำการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของค่าพีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาการปั่นกววน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นสีไคเร็กซ์โดยทำการทดลองแบบแบตช์

จิรารัชต์ (2553) ศึกษาการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยกระบวนการดูดซับด้วยเปลือกชั้นในเมล็ดกาแฟและกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีปนเปื้อนในน้ำทิ้ง ซึ่งได้แก่ พีเอช ความเร็วรอบการปั่นกววน ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสารละลายสีมาตรฐาน และปริมาณตัวดูดซับ ผลการวิจัยพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีในน้ำทิ้งด้วยถ่านเปลือกชั้นในเมล็ดกาแฟปริมาณ 60 กรัม/ลิตร คือ ที่พีเอช 2 ความเร็วรอบการปั่นกววนเท่ากับ 150 รอบ/นาที ระยะเวลาปั่นกววนเท่ากับ 45 นาที ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีมาตรฐาน 10 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถถูกดูดซับได้ร้อยละ 99.5 สำหรับการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่า ใช้สารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 โมลต่อลิตร จำนวน 200 มิลลิลิตร สารละลายพอลิอะคริลาไมด์ ชนิดประจุลบ ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 จำนวน 40 มิลลิลิตร ที่พีเอช 9 เป็นสภาวะที่เหมาะสม

วรรัตน์ (2554) ศึกษาการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟบลู จากน้ำเสียโรงงานย้อมผ้าด้วยถ่านจากกากกาแฟและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ จากการศึกษาพบว่า สีย้อมผ้ารีแอคทีฟบลู ถูกดูดซับได้ดี การใช้ถ่านจากกากกาแฟ ดูดซับสีย้อมผ้าสีน้ำเงินในช่วงพีเอช 2.0 - 11.0, ความเร็วรอบในการปั่นกวน 100 รอบ/นาที, ระยะเวลาในการปั่นกวน 90 นาที, ระยะเวลาในการสัมผัส 10 นาที พบว่าสามารถดูดซับสีได้ร้อยละ 99.12 ซึ่งมากกว่าการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่สามารถดูดซับได้ร้อยละ 97.37

Leechart *et al.* (2007) ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ถ่านจากขี้เถ้าเพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโครงสร้างแบบอะโซ พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบที่ใช้คือ 150 รอบต่อนาที และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมที่ใช้ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านจากขี้เถ้าสามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟได้

Santhy (2005) ศึกษาถึงการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งโดยใช้ถ่านจากกะลามะพร้าว พบว่าระยะเวลาในการสัมผัสที่สามารถกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งได้ดีที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาแต่จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ดีที่สุดคือ ร้อยละ 90 และค่าพีเอชที่ดีที่สุดคือ 1 โดยปริมาณของคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด คือ 4 กรัมต่อลิตร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 pH meter รุ่น Model 410 บริษัท Thermo Orion Co.,Ltd.

1.2 เครื่องเขย่า (Orbit Shaker) Model UM – S4050

1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 1 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.1 g รุ่น PB1501-S

1.4 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman

1.5 ตู้อบ (Oven) รุ่น OF-11E บริษัท JEIO TECH, KOREA

1.6 เครื่องแก้วที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด

1.7 เดสซิเคเตอร์ (dessicator)

1.8 ขวดรูปชมพู่ที่มีจุกปิด

1.9 เครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) Spectrum รุ่น SP-1105

2. สารเคมี

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

2.2 สารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

2.3 สีย้อม (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง 9 ชนิด คือ 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 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สีย้อมจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง 9 ชนิด และค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด

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

3. วัสดุดูดซับ

3.1 ไม้ยางพารา

3.2 ถ่านไม้ยางพารา

วิธีการ

1. การเตรียมตัวดูดซับ

นำเศษของไม้ยางพาราที่หักและโค่นตามธรรมชาติที่เก็บได้นำไปตากแดดให้แห้ง แล้วหั่นเป็นชิ้นๆยาว 1 -2 นิ้ว นำไม้ยางพาราที่หั่นเป็นชิ้นๆแล้วนั้น ส่วนหนึ่งนำไปตากแดด อีกส่วนหนึ่งไปเผาแบบภูมิปัญญาชาวบ้านโดยนำปื๊บมาหนึ่งใบใส่ไม้ยางพาราที่หั่นเป็นชิ้นๆลงไปประมาณครึ่งปื๊บแล้วนำเศษยางรถจักรยานยนต์มาจุดไฟให้ติดแล้วใส่ลงไปในปี๊บรจนไฟติดไม้สักครู่ แล้วนำไม้ยางพาราที่หั่นเป็นชิ้นๆ ใส่ลงไปอีกจนเกือบเต็มรอให้ไฟติดสักครู่แล้วปิดฝาปื๊บให้สนิท เพื่อไล่อากาศเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ล้างถ่านไม้ยางพาราด้วยน้ำสะอาด นำไปตากแดด แล้วนำทั้งสองส่วนมาอบ ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากการนั้นเก็บไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพาราไว้ใช้ในการศึกษา

2. การเตรียมสารละลาย

2.1 การเตรียมสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม (สีผสม 9 ชนิด เข้มข้นสีละ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยชั่งสีย้อมมาตรฐานแต่ละสี 0.05 กรัม (มีทั้งหมด 9 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 7) ใส่ในแต่ละบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร จากนั้นตวงสารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละสี มาปริมาตรเท่าๆกัน กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

2.2 การเตรียมสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยดูดสารละลายสีย้อมมาตรฐานที่เตรียมไว้มาจำนวน 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อม

นำสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 2.2 ไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆของสารละลายสีย้อมมาตรฐาน โดยเทียบกับน้ำกลั่นซึ่งเป็นแบลนด์ในการศึกษาครั้งนี้ แล้วนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงในแกน Y และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานในแกน X

4. การวางแผนการทดลอง

4.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมด้วยไม้อย่างพาราและถ่านไม้อย่างพารา โดยทำการทดลองแบบแบตช์

4.1.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

ซึ่งไม้อย่างพารา ปริมาณ 2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ 6 ใบ เติมสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 และปรับพีเอชให้มีพีเอชที่ต่างกันคือ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ลงในแต่ละขวด ปริมาตรขวดละ 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที และเวลาที่ใช้เพื่อเข้าภาวะสู่สมดุล 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของไม้อย่างพารา โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ $\lambda_{\max}$ ของแต่ละสี ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

นำถ่านไม้อย่างพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้อย่างพารา

4.1.2 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการเขย่า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1.1 โดยใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่เท่ากับพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 โดยแปรผันความเร็วรอบในการเขย่าที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0, 50, 100 และ 150 รอบ/นาที

นำถ่านไม้อย่างพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้อย่างพารา

4.1.3 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเขย่า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 โดยแปรผันระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 30, 60, 90 และ 120 นาที

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

4.1.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้เพื่อเข้าภาวะสู่สมดุล

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1.1, 4.1.2 และ 4.1.3 นำไปเขย่าด้วยระยะเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.3 โดยแปรผันระยะเวลาที่ใช้เพื่อเข้าภาวะสู่สมดุล 0, 10, 30 และ 60 นาที

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

4.1.5 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสีย้อม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 และ 4.1.4 ในระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.4 โดยแปรผันความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

4.1.6 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อม

ชั่งไม้ยางพารา ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่มีความเข้มข้นที่ได้เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.5 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4 และ 4.1.5 และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

4.1.7 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 7 ซ้ำ

ซึ่งไม้ยางพารา เท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.6 ต่อสารละลายสีข้อมมาตรฐานที่มีความเข้มข้นที่ได้เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ตามระยะเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.3 ตั้งทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.4 กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมของไม้ยางพารา โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ $\lambda_{\max}$ ของแต่ละสี

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

4.2 วิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างน้ำ

นำตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดู มาวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ความเค็ม ออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่าความสกปรกของน้ำ และวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีข้อมในน้ำเสีย โดยเปรียบเทียบจากกราฟมาตรฐานที่เตรียมได้จากข้อ 3

4.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดู ด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบดซ์

นำน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดู มาทดลอง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบดซ์ของไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมของไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา ตามลำดับ โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ $\lambda_{\max}$ ของแต่ละสี พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการดูดซับ ทำซ้ำ 3 ครั้ง

4.4 ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ดังนี้

4.4.1 น้ำเสียสังเคราะห์

บรรจุไม้ยางพาราลงในถุงตาข่ายพลาสติกแล้วนำไปแช่ในถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร กวนด้วยใบพัดที่ต่อกับมอเตอร์เป็นระยะเวลาเท่ากับที่ศึกษาได้จากการทดลองแบบแบตช์ แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำและประสิทธิภาพในการดูดซับสี

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

4.4.2 น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्य

บรรจุไม้ยางพาราลงในถุงตาข่ายพลาสติกแล้วนำไปแช่ในถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร บรรจุน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า ปริมาตร 10 ลิตร กวนด้วยใบพัดที่ต่อกับมอเตอร์เป็นระยะเวลาเท่ากับที่ศึกษาได้จากการทดลองแบบแบตช์ แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำและประสิทธิภาพในการดูดซับสี

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

4.5 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ทำการทดลองโดยนำไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้วจากการประยุกต์ใช้งานจริงในข้อ 4.4.1 หรือ 4.4.2 มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ตากให้แห้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไม้ยางพาราที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเปรียบเทียบกับไม้ยางพาราที่ยังไม่ผ่านการใช้งานอีกครั้ง ทำการทดลองโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเช่นเดียวกับข้อ 4.4.1 หรือ 4.4.2 ทำการทดลองจนตัวดูดซับไม่ดูดซับสีจากน้ำเสีย

นำถ่านไม้ยางพารามาทำการทดลองเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

5. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง 10 เดือน ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2554

ผลและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยดูง โดยการใช้อย่างพาราและถ่าน้อย่างพาราเป็นตัวดูดซับ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกทำการทดลองแบบแบดซ์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ความเร็วรอบในการเขย่า ระยะเวลาในการเขย่า ระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของ สีย้อม ปริมาณตัวดูดซับและวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟ รุนดิช และส่วนที่สองเป็นการทดลองโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง พร้อมกับการฟื้นฟูไม ้อย่างพาราและถ่าน้อย่างพาราเพื่อศึกษาอายุการใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

1.1 ไม้ย่างพารา

ไม้ย่างพาราที่ผ่านการอบไล่ความชื้น พร้อมทั้งจะนำไปใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ไม้ย่างพารา

1.2 ถ่านไม้ยางพารา

ถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการอบไล่ความชื้น พร้อมที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 27



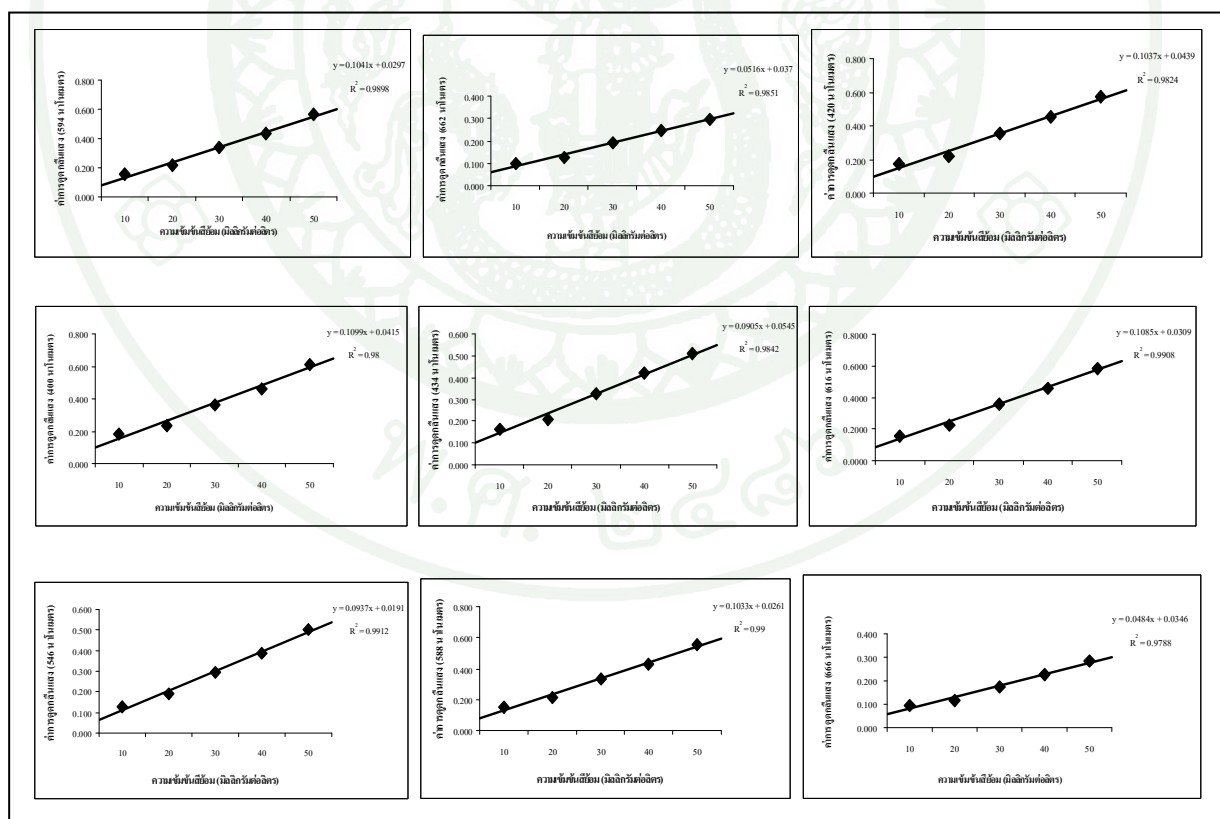
ภาพที่ 27 ถ่านไม้ยางพารา

2. กราฟมาตรฐานของสารละลายสีข้อมมาตรฐาน 9 ชนิด

จากการทดลองข้อ 3 พบว่า ผลของการวัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายสีข้อมมาตรฐานแต่ละชนิด ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาเขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมมาตรฐาน (แกนนอน) มีรายละเอียดเป็นดังตารางที่ 8 และภาพที่ 28

ตารางที่ 8 สมการเชิงเส้นถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสีย้อม 9 ชนิด

สีย้อม	สมการเชิงเส้นถดถอย	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
6% Super Black G (λ 594)	$y = 0.1041x + 0.0297$	0.9898
2% Turquoise H-GN (λ 662)	$y = 0.0516x + 0.037$	0.9851
2% Yellow LS-4G (λ 420)	$y = 0.1037x + 0.0439$	0.9824
2% Yellow LS-R-01 (λ 400)	$y = 0.1099x + 0.0415$	0.9800
2% Orange LS-BR (λ 434)	$y = 0.0905x + 0.0545$	0.9842
4% Navy LS-G (λ 616)	$y = 0.1085x + 0.0309$	0.9908
2% Red LS-B (λ 546)	$y = 0.0937x + 0.0191$	0.9912
2% Blue LS-3R (λ 588)	$y = 0.1033x + 0.0261$	0.9900
2% Br.Blue LS-G (λ 666)	$y = 0.0484x + 0.0346$	0.9788



ภาพที่ 28 กราฟมาตรฐานของสีย้อม 9 ชนิด

จากรายงานจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ของสีย้อมทั้ง 9 ชนิด มีค่า R^2 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.0200)

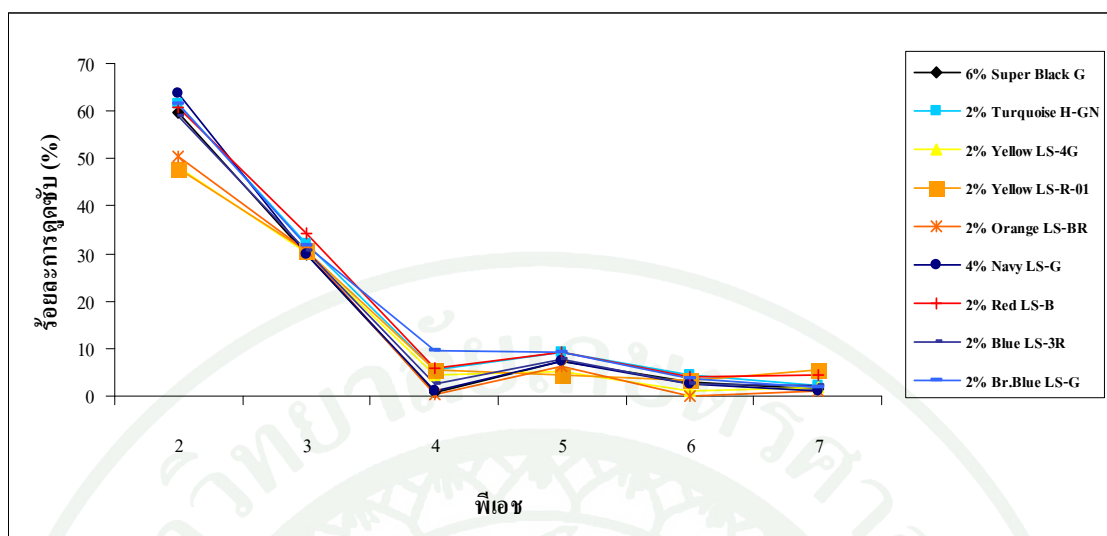
3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ด้วยไม้อยางพาราและถ่านไม้อยางพาราโดยวิธีแบบเบตซ์

1) อิทธิพลของพีเอช

จากการทดลองในข้อ 4.1.1 โดยการศึกษาที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มีผลการทดลองเป็นดังนี้

1.1) ไม้อยางพารา

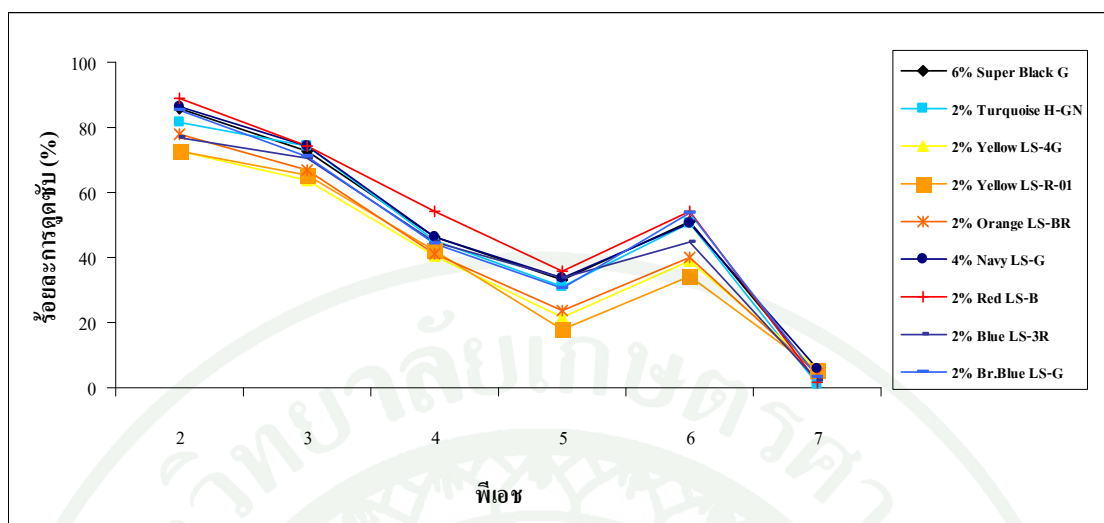
จากการทดลองพบว่า ไม้อยางพารามีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมในสารละลายที่พีเอชเป็นกรดได้ดีกว่าสารละลายที่พีเอชเป็นเบส โดยสามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดที่พีเอช 2 คือ ไม้อยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด โดยมีร้อยละการดูดซับของสีแต่ละชนิด ดังนี้ 6% Super Black G 59.51, 2% Turquoise H-GN 61.59, 2% Yellow LS-4G 48.12, 2% Yellow LS-R-01 47.84, 2% Orange LS-BR 50.57, 4% Navy LS-G 63.56, 2% Red LS-B 60.73, 2% Blue LS-3R 58.89 และ 2% Br.Blue LS-G 61.64 คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 56.94 และประสิทธิภาพการดูดซับจะลดต่ำลงเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเป็นเบส โดยดูดซับได้ต่ำที่สุดที่ค่าพีเอช 7 ดังภาพที่ 29 เนื่องจากการดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด (pH ต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น (นิพนธ์ และคณะ, 2550) ในที่นี้อธิบายได้ว่าโมเลกุลของโครงสร้างสีย้อม เมื่อละลายน้ำมีประจุเป็นลบจึงถูกดูดซับด้วยพื้นผิวของไม้อยางพาราที่มีประจุบวกได้ดี



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิเอชกับร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา

2.2) ถ่านไม้ยางพารา

จากการทดลองพบว่า ถ่านไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมในสารละลายที่ฟิเอชเป็นกรดได้ดีกว่าสารละลายที่ฟิเอชเป็นเบสได้เช่นเดียวกับไม้ยางพารา โดยที่ฟิเอช 2 สามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด โดยมีร้อยละการดูดซับของสีแต่ละชนิด ดังนี้ 6% Super Black G 85.77, 2% Turquoise H-GN 81.45, 2% Yellow LS-4G 72.76, 2% Yellow LS-R-01 72.45, 2% Orange LS-BR 78.10, 4% Navy LS-G 86.07, 2% Red LS-B 88.93, 2% Blue LS-3R 76.69 และ 2% Br.Blue LS-G 85.07 คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 80.81 และประสิทธิภาพการดูดซับจะลดต่ำลงเมื่อสารละลายมีค่าฟิเอชเป็นเบส โดยดูดซับได้ต่ำที่สุดที่ค่าฟิเอช 7 ดังภาพที่ 30 ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับไม้ยางพารา



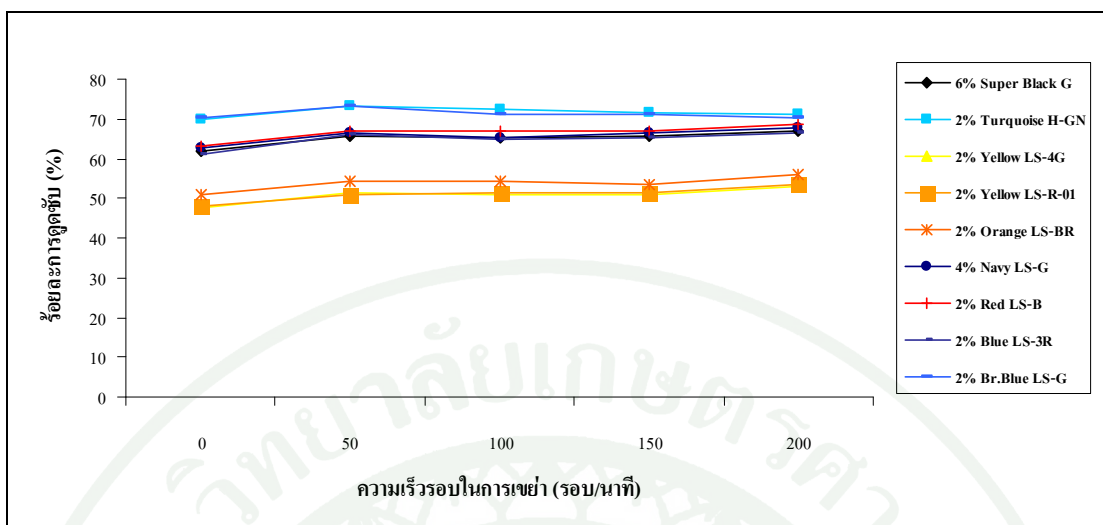
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิเอชกับร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสี้อมโดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา

2) อิทธิพลของความเร็วรอบในการเขย่า

จากการทดลองในข้อ 4.1.2 มีการแปรผันความเร็วรอบเป็น 0, 50, 100 และ 150 รอบ/นาที ให้ผลการทดลองเป็นดังนี้

2.1) ไม้ยางพารา

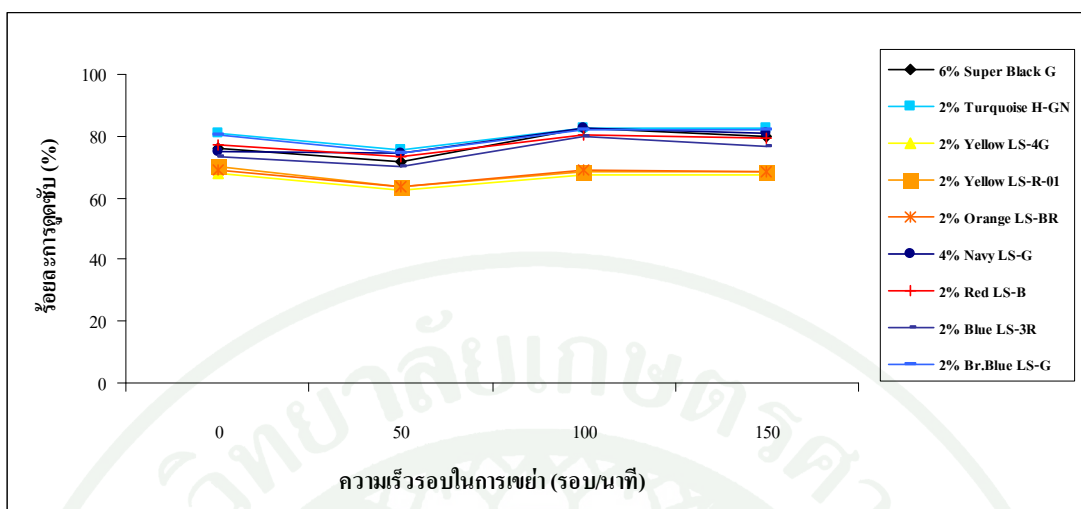
จากการทดลองพบว่า ไม้ยางพาราสามารถดูดซับสี้อมจากสารละลายสี้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิดได้ดีที่สุด ที่ความเร็วรอบในการเขย่า 50 รอบ/นาที ได้ร้อยละการดูดซับของสีแต่ละชนิดดังนี้ ได้แก่ 6% Super Black G 65.73, 2% Turquoise H-GN 73.07, 2% Yellow LS-4G 51.28, 2% Yellow LS-R-01 51.11, 2% Orange LS-BR 54.22, 4% Navy LS-G 66.51, 2% Red LS-B 66.83, 2% Blue LS-3R 65.34 และ 2% Br.Blue LS-G 73.10 คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 63.02 อธิบายได้ว่า การเพิ่มความเร็วรอบในการเขย่า ทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบพื้นผิวตัวดูดซับลดลง และทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้เพิ่มจำนวนรอบในการเขย่า และเมื่อความเร็วรอบของการเขย่าเพิ่มขึ้น ร้อยละการดูดซับค่อนข้างคงที่ เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับส่วนใหญ่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของสี้อม (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา

2.2) ถ่านไม้ยางพารา

จากการทดลองพบว่า ความเร็วยรอบในการเขย่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับน้อย เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและลดขั้นตอนในการบำบัดสีย้อม ผู้วิจัยจึงเลือกที่ไม่ต้องเขย่าสารละลาย โดยพบว่า ถ่านไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิดได้ร้อยละการดูดซับของสีแต่ละชนิดดังนี้ 6% Super Black G 76.00, 2% Turquoise H-GN 81.16, 2% Yellow LS-4G 68.13, 2% Yellow LS-R-01 69.53, 2% Orange LS-BR 68.81, 4% Navy LS-G 74.74, 2% Red LS-B 76.35, 2% Blue LS-3R 73.39 และ 2% Br.Blue LS-G 79.80 คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 74.21 ดังภาพที่ 32



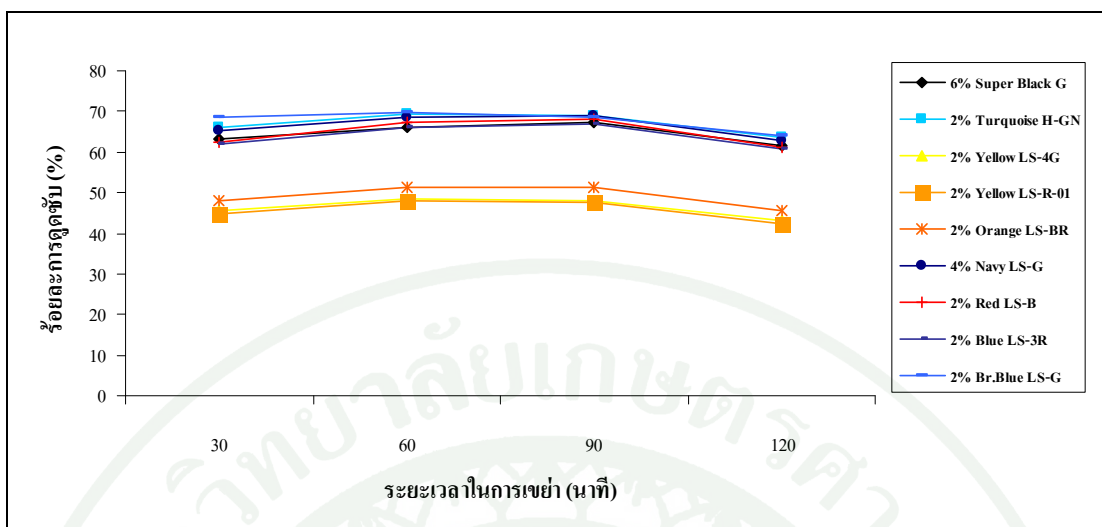
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสีด้วยถ่านไม้ยางพารา

3) อิทธิพลของระยะเวลาในการเขย่า

จากการทดลองในข้อ 4.1.3 มีการแปรผันระยะเวลาในการเขย่าเป็น 30, 60, 90 และ 120 นาที ให้ผลการทดลองเป็นดังนี้

3.1) ไม้ยางพารา

โดยทำการทดลองเฉพาะกับไม้ยางพาราพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีของสารละลายสีของมาตรฐานผสมของไม้ยางพารา ระยะเวลาในการเขย่าในการดูดซับได้เหมาะสมที่เวลา 60 นาที สามารถดูดซับสีของสารละลายสีของมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด ได้ร้อยละการดูดซับของสีแต่ละชนิดดังนี้ 6% Super Black G 66.01, 2% Turquoise H-GN 69.27, 2% Yellow LS-4G 48.40, 2% Yellow LS-R-01 48.09, 2% Orange LS-BR 51.19, 4% Navy LS-G 68.23, 2% Red LS-B 67.35, 2% Blue LS-3R 66.17 และ 2% Br.Blue LS-G 69.42 คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 61.57 ดังภาพที่ 33 การเขย่าเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลสีของเคลื่อนที่ได้มากขึ้น และช่วยลดความหนาของชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณะ, 2550)



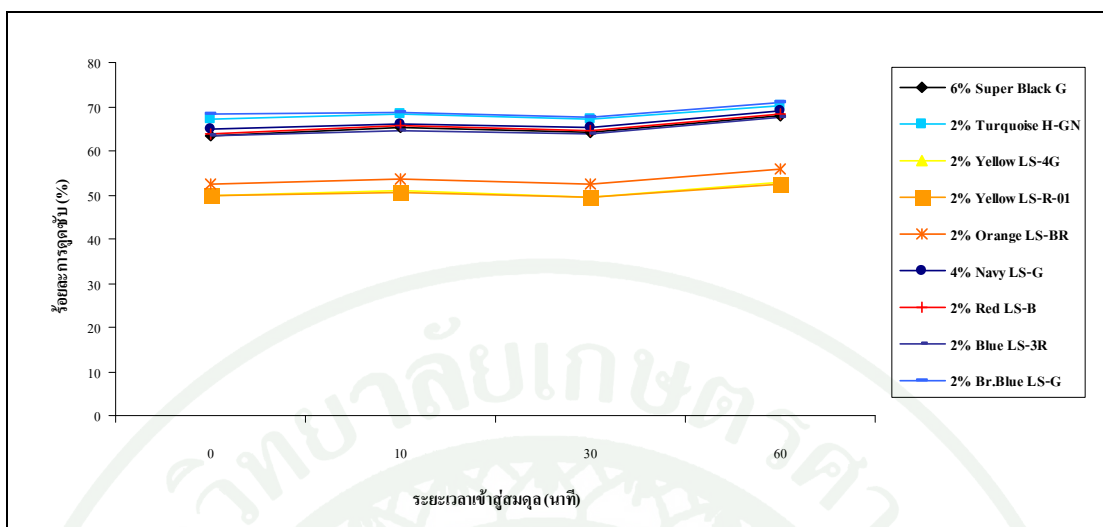
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีของโมโนการดูดซับด้วยไม้อย่างพารา

4.) อิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุล

จากการทดลองในข้อ 4.1.4 โดยมีการแปรผันระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเป็น 0, 10, 30 และ 60 นาที มีผลการทดลองเป็นดังนี้

4.1) ไม้อย่างพารา

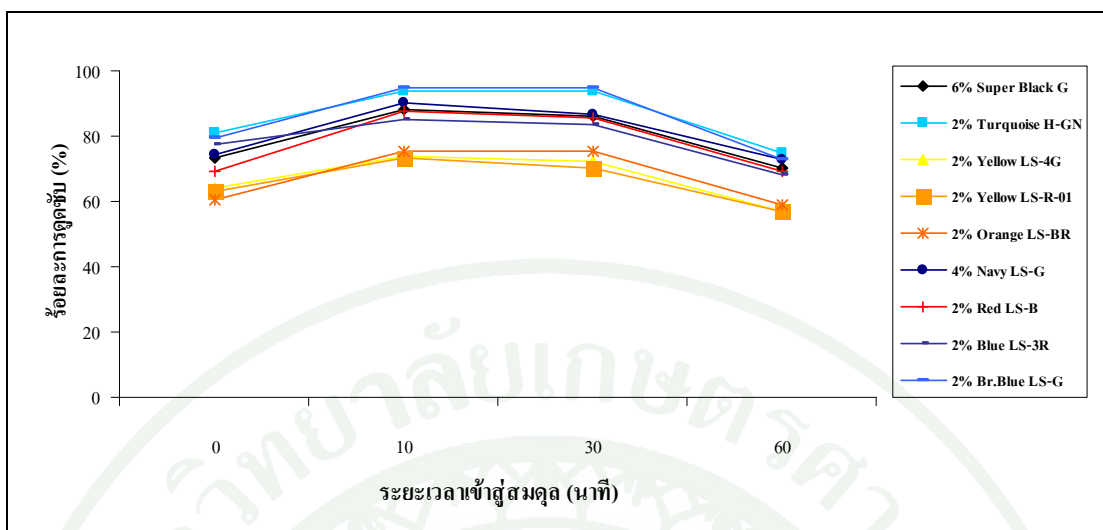
จากการทดลองพบว่า สำหรับไม้อย่างพาราระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีของแต่ละชนิดน้อย ดังแสดงในภาพที่ 34 ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการบำบัด ผู้วิจัยจึงไม่คำนึงถึงปัจจัยนี้ โดยเมื่อนำสารละลายไปเขย่าตามเวลาที่ศึกษาได้แล้วจะทำการกรองสารละลายในลำดับต่อไป ซึ่งในแต่ละระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 0, 10, 30 และ 60 นาที มีร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 60.28, 61.42, 60.46 และ 63.89 ตามลำดับ



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูดซับสีของ染料 โดยการใช้ไม้อย่างพารา

4.2) ถ่านไม้อย่างพารา

จากการทดลองพบว่า ถ่านไม้อย่างพารามีประสิทธิภาพการดูดซับสีของ染料ในสารละลายสีของ染料มาตรฐานผสมที่เวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่ภาวะสมดุล 10 นาที สามารถดูดซับสีของ染料จากสารละลายสีของ染料มาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิดดังนี้ 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 มีค่าเท่ากับร้อยละ 87.75, 92.71, 73.68, 73.07, 71.05, 89.62, 86.94, 85.06 และ 93.79 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 83.74 ดังภาพที่ 35 อธิบายได้ว่าในระยะเวลาเริ่มต้นนี้พื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่มากทำให้มีอัตราการดูดซับมีมากขึ้น จนถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับลดลง (Uddin et al. 2007) และเกิดการคายซับ (desorption)



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูซ้ำสียอม โดยการดูซ้ำด้วยถ่านไม้ยางพารา

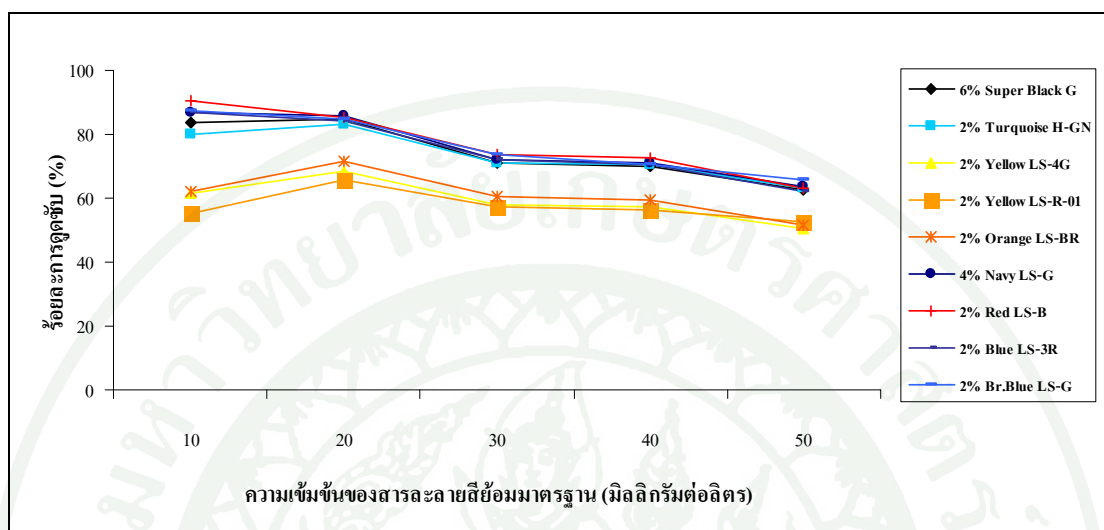
5) อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายสียอมมาตรฐานผสม

จากการทดลองในข้อ 4.1.5 มีการแปรผันความเข้มข้นของสารละลายสียอมมาตรฐานเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

5.1) ไม้ยางพารา

จากการทดลองพบว่า ไม้ยางพาราสามารถดูซ้ำสียอมจากสารละลายสียอมมาตรฐานผสม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ไม้ยางพาราสามารถดูซ้ำสียอมจากสารละลายสียอมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิดได้ดีที่สุด ให้ร้อยละการดูซ้ำ ดังนี้ 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 มีค่าเท่ากับร้อยละ 84.49, 82.20, 68.34, 65.92, 71.51, 85.63, 86.50, 84.47 และ 84.19 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการดูซ้ำเฉลี่ย 79.25 ดังภาพที่ 36 จากผลการศึกษาในสภาวะที่เหมาะสมของความเข้มข้นสียอมจากสารละลายสียอมมาตรฐานผสม จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูซ้ำลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงจะมีจำนวนโมเลกุลมาก ในขณะที่พื้นผิวของตัวดูซ้ำมีจำนวนจำกัด ตัวถูก

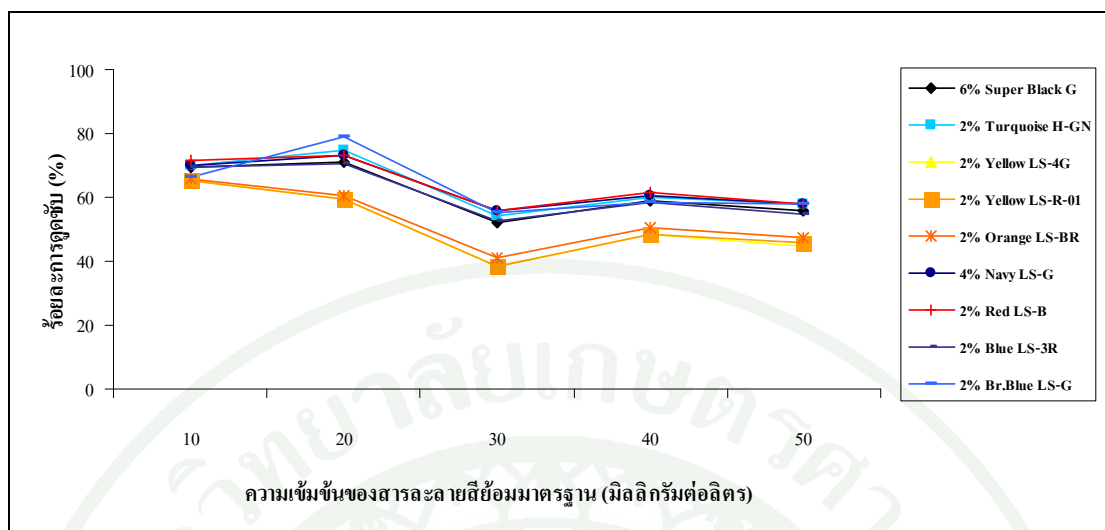
ดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมกับร้อยละการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา

5.2) ถ่านไม้ยางพารา

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมของถ่านไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร เช่นเดียวกับไม้ยางพารา ซึ่งถ่านไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิดได้ดีที่สุด ให้ร้อยละการดูดซับ ดังนี้ 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 มีค่าเท่ากับร้อยละ 70.96, 74.64, 59.22, 59.60, 60.64, 73.26, 72.98, 70.27 และ 78.97 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 68.95 ดังภาพที่ 37 ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับไม้ยางพารา



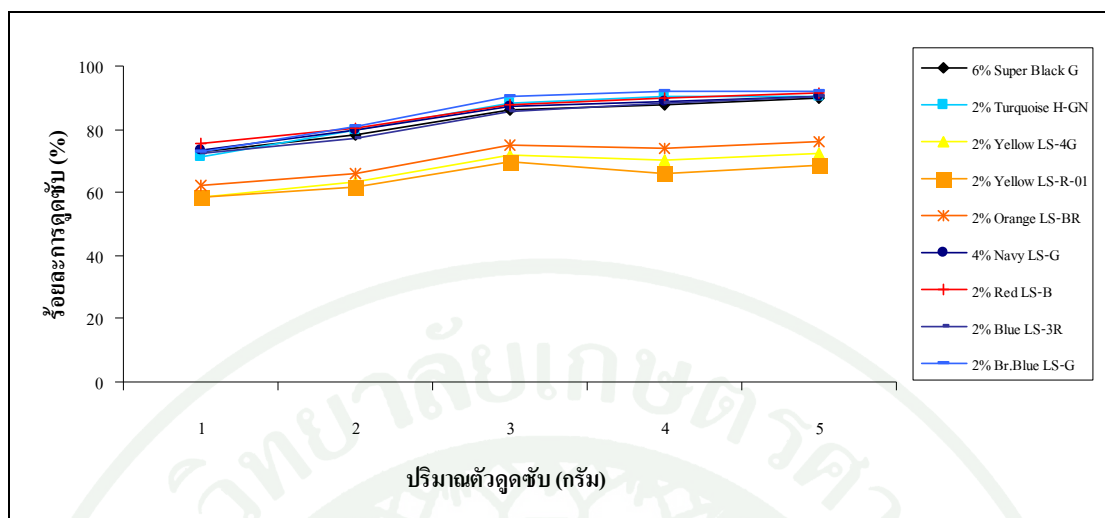
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมกับร้อยละการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา

6) อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

จากการทดลองในข้อ 4.1.5 โดยแปรผันปริมาณตัวดูดซับเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีผลการทดลองเป็นดังนี้

6.1) ไม้ยางพารา

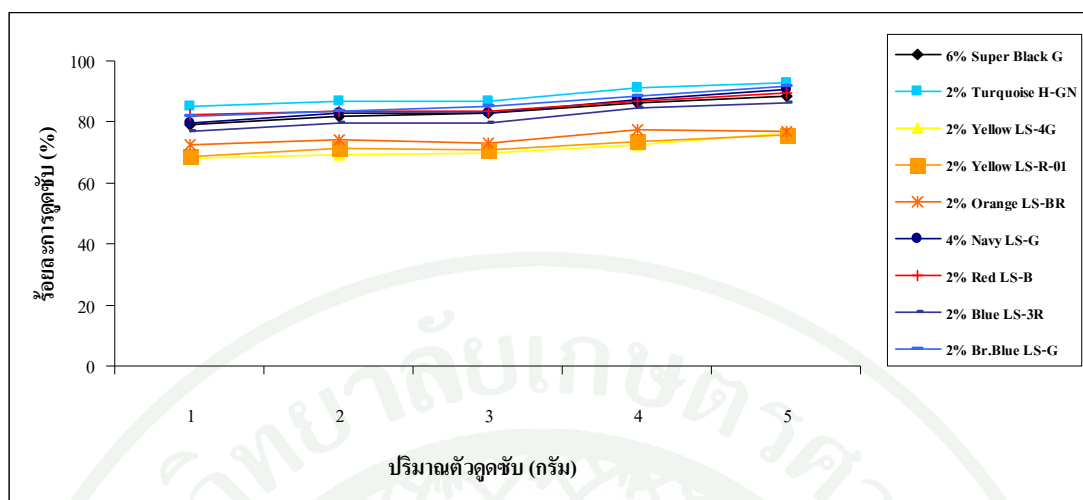
จากการทดลองพบว่า ไม้ยางพาราปริมาณ 3 กรัม เป็นน้ำหนักที่สามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิดได้ดีที่สุด ให้ร้อยละการดูดซับดังนี้ คือ 6% Super Black G, 2% Turquoise H-GN, 2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 2% Orange LS-BR, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R และ 2% Br.Blue LS-G มีค่าเท่ากับร้อยละ 85.78, 87.70, 71.54, 69.60, 74.39, 86.58, 88.03, 85.71 และ 89.64 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 82.11 ดังภาพที่ 38 อธิบายได้ว่าการใช้ถ่านในปริมาณมาก จะส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเท่ากัน ดังนั้นถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจึงสามารถดูดซับได้มากกว่าถ่านที่มีพื้นที่ผิวน้อย (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสีของสารสีย้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา

6.2) ถ่านไม้ยางพารา

จากการทดลองพบว่า ถ่านไม้ยางพาราปริมาณ 2 กรัม เป็นน้ำหนักที่สามารถสามารถดูดซับสีของสารสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิดได้ดีที่สุด ให้ร้อยละการดูดซับดังนี้ คือ 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 มีค่าเท่ากับร้อยละ 82.57, 86.27, 68.82, 71.14, 73.71, 82.29, 83.02, 79.51 และ 83.06 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 78.82 ดังภาพที่ 39 ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับไม้ยางพารา



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสีของสีย้อมโดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา

7) ผลของไอโซเทอร์มในการดูดซับสีของ

7.1) ไม้ยางพารา

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีของสารละลายสีของสีย้อมมาตรฐานผสมของไม้ยางพารา โดยการนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในการดูดซับสีของสารละลายสีของสีย้อมมาตรฐานผสมได้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังแสดงในตารางที่ 9-10 และลักษณะไอโซเทอร์ม ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 1-9 พบว่า กลไกการดูดซับสีของทุกชนิดด้วยไม้ยางพารามีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับสมการการดูดซับของแลงเมียร์มากกว่า ฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับ พื้นผิวตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะ ไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

ตารางที่ 9 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์ของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยไม้อย่างพารา

สีย้อม	สมการไอโซเทอร์ม	R^2	K
6% Super Black G	$1/q = 0.4034 + 1.0341(1/c)$	0.9988	0.3901
2% Turquoise H-GN	$1/q = 0.4019 + 1.0164(1/c)$	0.9989	0.3954
2% Yellow LS-4G	$1/q = 0.4572 + 1.2898(1/c)$	0.9970	0.3545
2% Yellow LS-R-01	$1/q = 0.2952 + 2.4079(1/c)$	0.9955	0.2097
2% Orange LS-BR	$1/q = 0.2249 + 1.1701(1/c)$	0.9989	0.1922
4% Navy LS-G	$1/q = 0.3672 + 1.0339(1/c)$	0.9994	0.3552
2% Red LS-B	$1/q = 0.3595 + 1.0217(1/c)$	0.9989	0.3519
2% Blue LS-3R	$1/q = 0.4467 + 1.0199(1/c)$	0.9981	0.4379
2% Br.Blue LS-G	$1/q = 0.3800 + 1.0028(1/c)$	0.9984	0.3789

ตารางที่ 10 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดิชของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยไม้อย่างพารา

สีย้อม	สมการไอโซเทอร์ม	R^2	1/n
6% Super Black G	$\log q = -0.0601 + (-0.1461) \log c$	0.9467	-0.1461
2% Turquoise H-GN	$\log q = -0.0613 + (-0.1439) \log c$	0.9580	-0.1439
2% Yellow LS-4G	$\log q = -0.1495 + (-0.1466) \log c$	0.9530	-0.1466
2% Yellow LS-R-01	$\log q = -0.1402 + (-0.1544) \log c$	0.9534	-0.1544
2% Orange LS-BR	$\log q = -0.0465 + (-0.1575) \log c$	0.9441	-0.1575
4% Navy LS-G	$\log q = -0.0517 + (-0.1472) \log c$	0.9516	-0.1472
2% Red LS-B	$\log q = -0.0431 + (-0.1480) \log c$	0.9470	-0.1480
2% Blue LS-3R	$\log q = -0.0673 + (-0.1441) \log c$	0.9430	-0.1441
2% Br.Blue LS-G	$\log q = -0.0513 + (-0.1445) \log c$	0.9588	-0.1445

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมของ
 แลงเมียร์ โดยทั่วไปคือ $q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$ เมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad \dots\dots\dots(10)$$

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่า สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ของสี่ข้อมแต่ละชนิด
 พบว่า สี่ข้อมทุกชนิดให้ค่า K น้อยกว่า 1 แสดงถึงปริมาณสี่ข้อมถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นที่ผิวของ
 ไม้ยางพารา (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

สำหรับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม
 ของฟรุนดลิช มีรูปแบบสมการ คือ $q = KC^{1/n}$ เมื่อนำสมการมาจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่
 ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots(11)$$

จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่า สมการไอโซเทอร์มของฟรุนดลิชของสี่ข้อมแต่ละ
 ชนิด พบว่า สี่ข้อมทุกชนิดให้ค่า $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของไม้ยางพารา
 ดูดซับได้ต่ำ หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนไม้ยางพารามีในปริมาณจำกัดในการดูดซับ (นิพนธ์
 และคณิตา, 2550)

7.2) ถ่านไม้ยางพารา

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมของ
 ถ่านไม้ยางพารา โดยการนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐาน
 ผสม ได้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังแสดงในตารางที่ 11-12 และลักษณะ
 ไอโซเทอร์ม ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 10-18 ซึ่งกลไกการดูดซับเป็นเช่นเดียวกับไม้ยางพารา

ตารางที่ 11 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์ของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยถ่านไม้ยางพารา

สีย้อม	สมการไอโซเทอร์ม	R^2	K
6% Super Black G	$1/q = 0.2345 + 1.0951(1/c)$	0.9984	0.2141
2% Turquoise H-GN	$1/q = 0.1839 + 1.0530(1/c)$	0.9982	0.1746
2% Yellow LS-4G	$1/q = 0.3058 + 1.2788(1/c)$	0.9959	0.2391
2% Yellow LS-R-01	$1/q = 0.2363 + 1.2874(1/c)$	0.9979	0.1835
2% Orange LS-BR	$1/q = 0.3790 + 1.2416(1/c)$	0.9972	0.3053
4% Navy LS-G	$1/q = 0.2715 + 1.0679(1/c)$	0.9966	0.2542
2% Red LS-B	$1/q = 0.2039 + 1.0901(1/c)$	0.9974	0.1870
2% Blue LS-3R	$1/q = 0.2531 + 1.1241(1/c)$	0.9975	0.2251
2% Br.Blue LS-G	$1/q = 0.2463 + 1.0573(1/c)$	0.9975	0.2329

ตารางที่ 12 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดิชของสีย้อม 9 ชนิด ด้วยถ่านไม้ยางพารา

สีย้อม	สมการไอโซเทอร์ม	R^2	1/n
6% Super Black G	$\log q = -0.0601 + (-0.1461) \log c$	0.9397	-0.1577
2% Turquoise H-GN	$\log q = -0.0613 + (-0.1439) \log c$	0.9364	-0.1606
2% Yellow LS-4G	$\log q = -0.1495 + (-0.1466) \log c$	0.9290	-0.1581
2% Yellow LS-R-01	$\log q = -0.1402 + (-0.1544) \log c$	0.9378	-0.1600
2% Orange LS-BR	$\log q = -0.0465 + (-0.1575) \log c$	0.9414	-0.1511
4% Navy LS-G	$\log q = -0.0517 + (-0.1472) \log c$	0.9341	-0.1563
2% Red LS-B	$\log q = -0.0431 + (-0.1480) \log c$	0.9328	-0.1606
2% Blue LS-3R	$\log q = -0.0673 + (-0.1441) \log c$	0.9356	-0.1577
2% Br.Blue LS-G	$\log q = -0.0513 + (-0.1445) \log c$	0.9340	-0.1575

จากตารางที่ 11-12 จะเห็นได้ว่า สมการไอโซเทอร์มของแสงเมียร์และสมการไอโซเทอร์มไอโซเทอร์มของฟรอนดิชของสีย้อมแต่ละชนิด สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับไม้ยางพารา

8) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยไม้ยางพารา และถ่านไม้ยางพารา จำนวน 7 ชนิด ด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบดซ์

จากการทดลองในข้อ 4.1.7 มีผลการทดลองเป็นดังนี้

8.1) ไม้ยางพารา

จากการทดลอง พบว่า จากสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบดซ์ คือ ไม้ยางพารา ปริมาณ 3 กรัม ที่พีเอช 2 ความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 60 นาที เวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 0 นาที ในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด ดังตารางที่ 13

8.2) ถ่านไม้ยางพารา

จากการทดลอง พบว่า จากสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบดซ์ คือ ถ่านไม้ยางพารา ปริมาณ 2 กรัม ที่พีเอช 2 ไม่ต้องทำการเขย่า และเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 10 นาที ในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา

Dyes	ร้อยละการดูดซับ (%)	
	ไม้ยางพารา	ถ่านไม้ยางพารา
6% Super Black G	78.84	83.33
2% Turquoise H-GN	80.23	86.36
2% Yellow LS-4G	61.42	72.22
2% Yellow LS-R-01	59.17	71.42
2% Orange LS-BR	63.74	72.10
4% Navy LS-G	80.25	84.35
2% Red LS-B	80.51	83.43
2% Blue LS-3R	79.73	82.28
2% Br.Blue LS-G	80.76	84.81
เฉลี่ย	73.85	80.03

จากตารางจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา คิดเป็น 0.2461 และ 0.4002 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งถ่านไม้ยางพารามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าไม้ยางพารา เนื่องจากถ่านไม้ยางพารา มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับประมาณ 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้ถ่านไม้ยางพาราเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ

4. ผลการศึกษาวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง

จากการตรวจคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 พบว่า คุณภาพน้ำเสียนั้นมีค่าเกินเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการคอตตง

พารามิเตอร์	น้ำทิ้งจาก โรงงานย้อมผ้า	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
ค่าพีเอช	9.74	5.5-9.0
ซีโอดี (มก./ล.)	128	ไม่เกิน 120 (มก./ล.)
ค่าความขุ่น (NTU)	68.87	ไม่ได้กำหนด
น้ำมัน-ไขมัน (มก./ล.)	14.15	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	7,600	ไม่ได้กำหนด
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	568	ไม่เกิน 50 (มก./ล.)
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (มก./ล.)	7,032	ไม่เกิน 3,000 (มก./ล.)
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	5.54	ไม่ได้กำหนด
ความเค็ม	3	ไม่ได้กำหนด
DO ₀ (มก./ล.)	7.71	ไม่ได้กำหนด
DO ₅ (มก./ล.)	2.4	ไม่ได้กำหนด
บีโอดี(มก./ล.)	53.1	ไม่เกิน 20 (มก./ล.)
	6% Super Black G	0.289
	2% Turquoise H-GN	0.219
	2% Yellow LS-4G	0.838
	2% Yellow LS-R-01	1.079
ความเข้มข้นของสีย้อม (มก./ล)	2% Orange LS-BR	0.738
	4% Navy LS-G	0.260
	2% Red LS-B	0.347
	2% Blue LS-3R	0.295
	2% Br.Blue LS-G	0.214

5. ผลของศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย ด้วยสถานะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบตซ์

5.1) ไม้ยางพารา

จากสถานะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบตซ์ คือ ไม้ยางพารา ปริมาณ 3 กรัม ที่
พีเอช 2 ความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 60 นาที เวลาที่ใช้
เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 0 นาที ในสารละลายสีย้อมมาตรฐานที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จาก
การทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งด้วยไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อม
จากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 68.09 อีกทั้งยัง
มีประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ค่าน้ำมันและไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็ง
แขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ เท่ากับ ร้อยละ 75, 36.35, 71.2, 30.36, 13.55 และ 31.72
ตามลำดับ ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย ไม้
ยางพารา (ปรับสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์)

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำทิ้ง เริ่มต้น	คุณภาพหลัง การบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)
ซีไอดี (มก./ล.)	128	32	75
ค่าความขุ่น (NTU)	68.87	43.83	36.35
น้ำมัน-ไขมัน (มก./ล.)	14.15	13.23	71.2
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	7,600	5,292	30.36
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	568	491	13.55
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (มก./ล.)	7,032	4,801	31.72

ตารางที่ 15 (ต่อ)

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำทิ้ง เริ่มต้น	คุณภาพหลัง การบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)
ความเข้มข้นสีข้อม (มก/ล)			
6% Super Black G	0.046	0.019	56.52
2% Turquoise H-GN	0.040	0.021	47.50
2% Yellow LS-4G	0.124	0.012	90.32
2% Yellow LS-R-01	0.154	0.030	80.51
2% Orange LS-BR	0.107	0.050	92.52
4% Navy LS-G	0.051	0.016	66.66
2% Red LS-B	0.052	0.020	61.53
2% Blue LS-3R	0.470	0.016	65.95
2% Br.Blue LS-G	0.039	0.020	51.28

5.2) ถ่านไม้ยางพารา

จากสถานะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบดซ์ คือ ถ่านไม้ยางพารา ปริมาณ 2 กรัม ที่พีเอช 2 ไม่ต้องทำการเขย่า และเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 10 นาที ในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งด้วยถ่านไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 70.98 อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ค่าน้ำมันและไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ เท่ากับ ร้อยละ 37.5, 54.5, 93.31, 67.65, 24.47 และ 71.14 ตามลำดับ ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यดุง ด้วยถ่านไม้ยางพารา (ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบดซ์)

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำทิ้ง เริ่มต้น	คุณภาพหลัง การบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)
ซีไอดี (มก./ล.)	128	80	37.5
ค่าความขุ่น (NTU)	68.87	31.33	54.5
น้ำมัน-ไขมัน (มก./ล.)	14.15	3.07	93.31
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	7,600	2,458	67.65
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	568	429	24.47
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (มก./ล.)	7,032	2,029	71.14
ความเข้มข้นสีย้อม (มก/ล)			
6% Super Black G	0.046	0.018	58.69
2% Turquoise H-GN	0.040	0.020	50.00
2% Yellow LS-4G	0.124	0.008	93.54
2% Yellow LS-R-01	0.154	0.024	84.41
2% Orange LS-BR	0.107	0.004	96.26
4% Navy LS-G	0.051	0.016	68.62
2% Red LS-B	0.052	0.019	63.46
2% Blue LS-3R	0.470	0.014	70.21
2% Br.Blue LS-G	0.039	0.018	53.84

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารามีประสิทธิภาพดูดซับที่ลดลงจากการทดลองแบบเบดซ์เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า ดอยดุง มีการปนเปื้อนของสารอื่นๆ ที่ไปคั่งบังรูปของไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา หรือสารอื่นๆ นั้นถูกดูดซับด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อมลดลง

6. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

6.1) น้ำเสียสังเคราะห์

6.1.1) ไม้ยางพารา

การทดลองใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ที่พีเอช 2 ปริมาณไม้ยางพารา 49.22 กรัม บรรจุใส่ในถุงตาข่าย ทำการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 51.94 ดังตารางที่ 17

6.1.2) ถ่านไม้ยางพารา

การทดลองใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ที่พีเอช 2 ปริมาณถ่านไม้ยางพารา 80.04 กรัม บรรจุใส่ถุงตาข่าย ทำการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีและนำสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ถ่านไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 54.85 ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา

Dyes	ร้อยละการดูดซับ (%)	
	ไม้ยางพารา	ถ่านไม้ยางพารา
6% Super Black G	43.63	47.87
2% Turquoise H-GN	45.51	48.96
2% Yellow LS-4G	50.38	55.72
2% Yellow LS-R-01	58.51	53.19
2% Orange LS-BR	55.55	58.33
4% Navy LS-G	55.33	59.82
2% Red LS-B	53.44	56.03
2% Blue LS-3R	52.11	57.74
2% Br.Blue LS-G	53.03	56.06
เฉลี่ย	51.94	54.85

จากตาราง จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารามีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงจากการทดลองแบบเบตซ์ เนื่องจากเกิดมาจากการกวนด้วยใบพัดที่ต่อมอเตอร์มีความเร็วรอบที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งความเร็วรอบที่ใช้อาจเพิ่มขึ้นจากการทดลองแบบเบตซ์ หรืออาจเกิดจากระยะเวลาที่ใช้ในการกวนนานกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแบบเบตซ์ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมลดต่ำลงได้

6.2) น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง

6.1.1) ไม้ยางพารา

การทดลองใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง ที่พีเอช 2 ปริมาตร 10 ลิตร ปริมาณไม้ยางพารา 49.22 กรัม บรรจุใส่ถุงตาข่าย ทำการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้ง ไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 43.12 อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ค่า น้ำมันและไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ เท่ากับ ร้อยละ 75.00, 46.52, 32.65, 22.96, 30.75 และ 22.33 ตามลำดับ ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง โดยการประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยไม้ยางพารา

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำทิ้ง เริ่มต้น	คุณภาพหลังการ บำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)
ซีไอดี (มก./ล.)	128	32	75
ค่าความขุ่น (NTU)	68.87	36.83	46.52
น้ำมัน-ไขมัน (มก./ล.)	14.15	9.53	32.65
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	7,600	5,855	22.96
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	568	393.33	30.75
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (มก./ล.)	7,032	5,461	22.33

ตารางที่ 18 (ต่อ)

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำทิ้ง เริ่มต้น	คุณภาพหลังการ บำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)
ความเข้มข้นสีข้อม (มก/ล)			
6% Super Black G	0.247	0.135	45.34
2% Turquoise H-GN	0.199	0.105	47.23
2% Yellow LS-4G	0.605	0.380	37.19
2% Yellow LS-R-01	0.732	0.486	33.60
2% Orange LS-BR	0.540	0.331	38.70
4% Navy LS-G	0.234	0.120	48.71
2% Red LS-B	0.291	0.164	43.64
2% Blue LS-3R	0.254	0.139	45.27
2% Br.Blue LS-G	0.194	0.100	48.45

6.1.2) ถ่านไม้ยางพารา

การทดลองใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง ปริมาตร 10 ลิตร ที่พีเอช 2 ปริมาณถ่านไม้ยางพารา 80.04 กรัม บรรจุลงในถุงตาข่าย ทำการกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีและนำสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม ถ่านไม้ยางพาราสามารถดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมได้ทั้งหมด 9 ชนิด คิดเป็น ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 47.41 อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ค่าน้ำมัน และไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ เท่ากับ ร้อยละ 32.5, 70.82, 15.33, 26.05, 51.52 และ 23.97 ตามลำดับ ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง โดยการประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยถ่านไม้ยางพารา

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำทิ้ง เริ่มต้น	คุณภาพหลัง การบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)
ซีไอดี (มก./ล.)	128	86.4	32.5
ค่าความขุ่น (NTU)	68.87	20.09	70.82
น้ำมัน-ไขมัน (มก./ล.)	14.15	11.98	15.33
ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)	7,600	5,620	26.05
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	568	275.33	51.52
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (มก./ล.)	7,032	5,344.67	23.97
ความเข้มข้นสีย้อม (มก/ล)			
6% Super Black G	0.247	0.126	48.98
2% Turquoise H-GN	0.199	0.098	50.75
2% Yellow LS-4G	0.605	0.353	41.65
2% Yellow LS-R-01	0.732	0.435	40.57
2% Orange LS-BR	0.54	0.296	45.18
4% Navy LS-G	0.234	0.114	51.28
2% Red LS-B	0.291	0.156	46.39
2% Blue LS-3R	0.254	0.130	48.81
2% Br.Blue LS-G	0.194	0.091	53.09

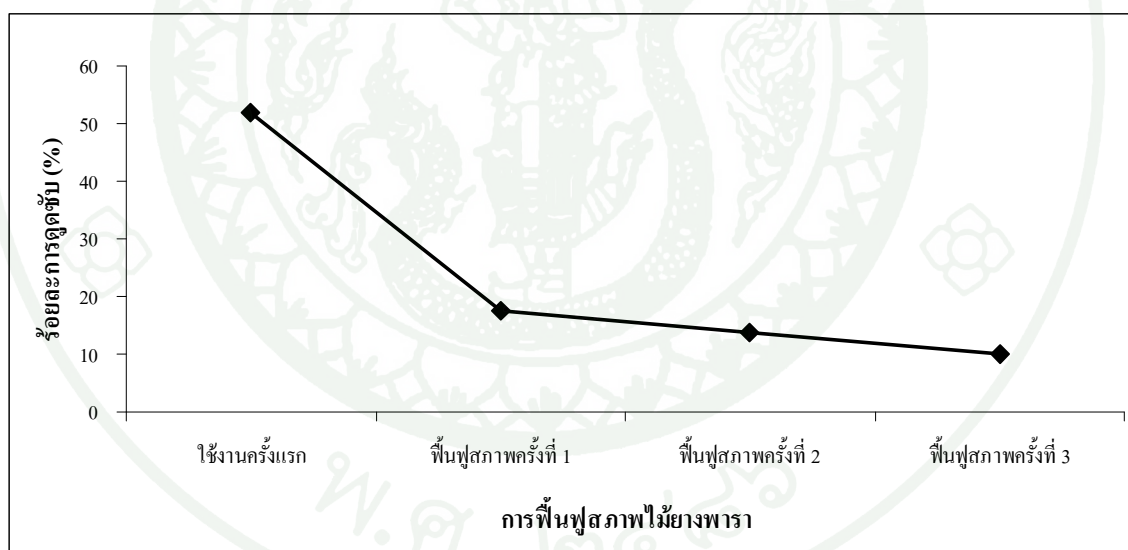
จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารามีประสิทธิภาพดูดซับที่ลดลงจากการทดลองแบบเบตซ์เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า อดยตุง มีการปนเปื้อนของสารอื่นๆ ที่ไปคบบังรพุนของไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา หรือสารอื่นๆ นั้นถูกดูดซับด้วยไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพารา ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อมลดลง

7. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของไม้ยางพาราและถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้ว

จากการทดลองในข้อ 4.6 มีผลการทดลองดังนี้

7.1) ไม้ยางพารา

การทดลองนี้การทดลองใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ที่พีเอช 2 โดยนำไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้วจากการประยุกต์ใช้งานจริงและผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับครั้งแรกของไม้ยางพารา ทำการทดลองโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยศึกษาการฟื้นฟูของไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้ว 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 40 และตารางที่ 20



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสีย้อม

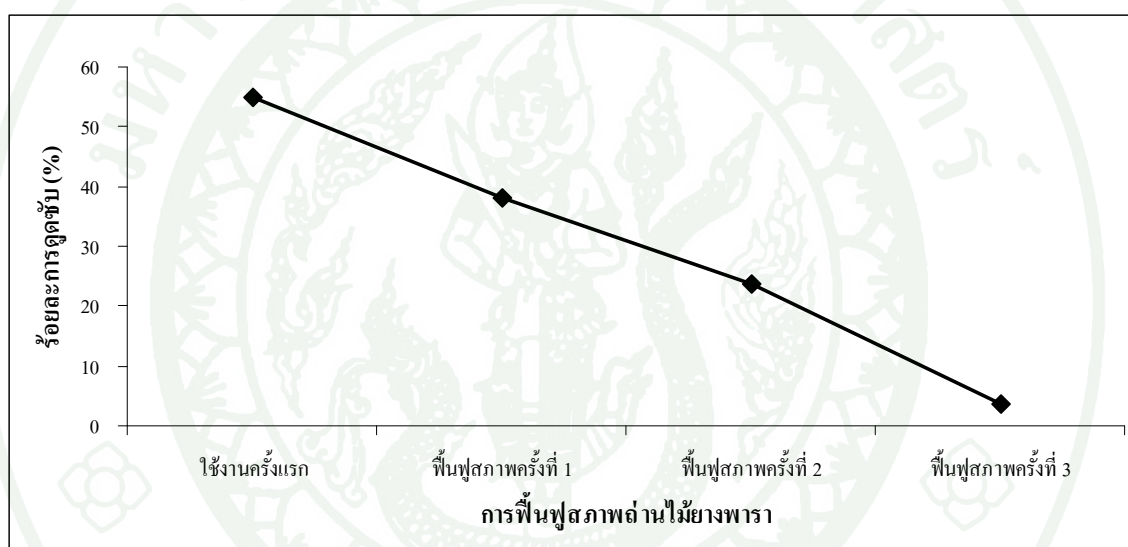
ตารางที่ 20 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยการประยุกต์ใช้
งานจริง ด้วยไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

Dyes	ใช้งานครั้งแรก	ฟื้นฟูสภาพ ครั้งที่ 1	ฟื้นฟูสภาพครั้ง ที่ 2	ฟื้นฟูสภาพครั้ง ที่ 3
6% Super Black G	43.63	22.22	11.11	0.00
2% Turquoise H-GN	45.51	20.00	20.00	20.00
2% Yellow LS-4G	50.38	10.00	10.00	10.00
2% Yellow LS-R-01	58.51	9.09	9.09	9.09
2% Orange LS-BR	55.55	11.11	11.11	0.00
4% Navy LS-G	55.33	30.00	20.00	20.00
2% Red LS-B	53.44	25.00	12.50	0.00
2% Blue LS-3R	52.11	11.11	11.11	11.11
2% Br.Blue LS-G	53.03	20.00	20.00	20.00
เฉลี่ย	51.94	17.62	13.88	10.02

จากผลการทดลองตารางที่ 20 ไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำการฟื้นฟู และทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟู ดังนี้ การฟื้นฟูครั้งที่ 1, 2 และ 3 คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 17.62, 13.88 และ 10.02 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยางพาราที่ใช้งานครั้งแรก ไม้ยางพาราไม่เหมาะสมในการนำมาฟื้นฟูสภาพและกลับมาใช้งานใหม่

7.2) ถ่านไม้ยางพารา

การทดลองนี้การทดลองใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ที่พีเอช 2 โดยนำถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้วจากการประยุกต์ใช้งานจริงและผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วมาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเปรียบเทียบกับไม้ยางพาราที่ยังไม่ผ่านการใช้งานอีกครั้ง ทำการทดลองโดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยศึกษาการฟื้นฟูของถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้ว 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลองดังภาพที่ 41 และตารางที่ 21



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพถ่านไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสีย้อม

ตารางที่ 21 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยการประยุกต์ใช้งานจริง ด้วยถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

Dyes	ใช้งานครั้งแรก	ฟื้นฟูสภาพครั้ง	ฟื้นฟูสภาพครั้ง	ฟื้นฟูสภาพครั้ง
		ที่ 1	ที่ 2	ที่ 3
6% Super Black G	47.87	35.56	22.22	11.11
2% Turquoise H-GN	48.96	40.00	20.00	0.00
2% Yellow LS-4G	55.72	40.00	20.00	0.00
2% Yellow LS-R-01	53.19	27.27	9.09	0.00
2% Orange LS-BR	58.33	33.33	22.22	0.00
4% Navy LS-G	59.82	40.00	40.00	10.00
2% Red LS-B	56.03	42.50	37.50	12.50
2% Blue LS-3R	57.74	44.44	22.22	0.00
2% Br.Blue LS-G	56.06	40.00	20.00	0.00
เฉลี่ย	54.85	38.12	23.70	3.73

จากผลการทดลองตารางที่ 21 ถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำมาทำการฟื้นฟูและทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะลดลงตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟู ดังนี้ การฟื้นฟูครั้งที่ 1, 2 และ 3 คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 38.12, 23.70 และ 3.73 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ยางพาราที่ใช้งานครั้งแรกถ่านไม้ยางพาราสามารถนำมาใช้งานต่อได้อีกแค่ครั้งเดียว

ดังนั้น ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วจะส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลงและทำให้พื้นผิวบางส่วนเกิดการสูญเสียไปในขณะที่ทำการดูดซับก่อนที่จะมีการนำตัวดูดซับมาฟื้นฟู รวมถึงในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับอาจทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวในการดูดซับไปด้วย ซึ่งการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับสามารถทำได้แต่ไม่คุ้มค่าต่อการดำเนินการจากการใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ หากตัวดูดซับมีปริมาณมากและวิธีการจัดเตรียมที่ง่ายจึงไม่สมควรนำมาฟื้นฟูสภาพ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอยตุง ด้วยไม้อยางพาราและถ่านไม้อยางพารา โดยทำการทดลองแบบเบดซ์และแบบต่อเนื่อง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมของไม้อยางพารา คือ ไม้อยางพารา ปริมาณ 3 กรัม ที่พีเอช 2 ความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 60 นาที เวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 0 นาที ในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร สามารถดูดซับสีย้อมคิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 73.85 และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมมาใช้กับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าอยตุง สามารถดูดซับสีย้อมคิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 68.09 และสามารถบำบัดค่าซีโอดี ค่าความขุ่น ค่าน้ำมันและไขมันของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้คิดเป็นร้อยละ 75, 36.35, 71.2, 30.36, 13.55 และ 31.72 ตามลำดับ และ กลไกของกระบวนการดูดซับสีย้อมด้วยไม้อยางพารา โดยการทดลองแบบเบดซ์สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์

การศึกษาประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้งานจริงโดยทดลองกับไม้อยางพาราในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ปริมาณไม้อยางพารา 49.22 กรัม พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 51.94 และเมื่อทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าอยตุง ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 43.12 และสามารถบำบัดค่าซีโอดี ค่าความขุ่น ค่าน้ำมันและไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้คิดเป็นร้อยละ 75.00, 46.52, 32.65, 22.96, 30.75 และ 22.33 ตามลำดับ จากนั้นนำไม้อยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟูสภาพ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับหลังผ่านการใช้งาน พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับของไม้อยางพาราที่ผ่านการใช้งานมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานครั้งแรก โดยการใช้งานครั้งแรก สามารถดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 51.94 หลังจากผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 สามารถดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมได้ คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 17.62, 13.88, 10.02 ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาฟื้นฟูสภาพและกลับมาใช้งานใหม่

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมของถ่านไม้ยางพารา คือ ถ่านไม้ยางพารา ปริมาณ 2 กรัม ที่พีเอช 2 ไม่ต้องทำการเขย่า และเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุล เท่ากับ 10 นาที ในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สามารถดูดซับสีข้อมคิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 80.03 และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมมา ใช้กับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าดอยตุง สามารถดูดซับสีข้อมคิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 70.98 และสามารถบำบัดค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ค่าน้ำมันและไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และ ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้คิดเป็นร้อยละ 37.5, 54.5, 93.31, 67.65, 24.47 และ 71.14 ตามลำดับ กลไกของกระบวนการดูดซับสีด้วยถ่านไม้ยางพาราโดยการทดลองแบบเบดซ์สอตกคล้องกับสมการ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์

การศึกษาประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้งานจริงโดยทดลองกับถ่านไม้ยางพาราในการดูดซับ สีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ปริมาณถ่านไม้ยางพารา 80.04 กรัม โดยการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 54.85 และเมื่อทดลอง กับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าดอยตุง ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 47.41 และสามารถบำบัดค่าซีไอดี ค่าความขุ่น ค่าน้ำมันและไขมัน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้คิดเป็นร้อยละ 32.5, 70.82, 15.33, 26.05, 51.52 และ 23.97 ตามลำดับ จากนั้นนำถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟู สภาพ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับหลังผ่านการใช้งาน พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับของ ถ่านไม้ยางพาราที่ผ่านการใช้งานมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานครั้งแรก โดยการใช้ งานครั้งแรก สามารถดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 47.41 หลังจากผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 สามารถดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อม มาตรฐานผสมได้ คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 38.12, 23.70, 3.73 ซึ่งถ่านไม้ยางพาราสามารถนำ กลับมาใช้ต่อได้อีกครั้ง

สำหรับผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียจริงมีประสิทธิภาพ ที่ลดลงจากการทดลองแบบเบดซ์ เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าดอยตุงมีการปนเปื้อนของสาร อื่นๆ ที่ไปบดบังรูพรุนของตัวดูดซับ หรือตัวถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพใน การดูดซับสีข้อมในน้ำเสียลดลง และจากการศึกษานี้ยังพบอีกว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดนั้น

น้ำเสียมีสภาพความเป็นกรดจึงจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนั้นก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียนั้นควรมีการปรับสภาพให้เป็นกลางก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียนั้น

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ผ่านมาในครั้งนี ทำให้ทราบข้อมูลบางอย่าง เพื่อนำไปปรับปรุงงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ

1. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการดูดซับสารชนิดอื่นด้วย เพื่อจะสามารถใช้ตัวดูดซับได้ประสิทธิภาพสูง
2. ควรมีการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับ
3. ขนาดของตัวดูดซับยังมีขนาดที่ไม่เท่ากัน
4. ควรมีการศึกษาการบำบัดสีย้อมโดยใช้วัสดุดูดซับชนิดอื่นๆที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มาใช้ในการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับและนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดสีย้อมผ้าสังเคราะห์
5. ควรมีการศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างกระบวนการดูดซับและกระบวนการบำบัดชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางเลือกของการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้าสังเคราะห์และสีย้อมชนิดอื่นๆต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรรณิการ์ สิริสิงห์. 2525. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท ประยูร วงศ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

กิติโรจน์ หวันตาหลา, ชยาภาส ทับทอง และ สีนสุภา จุ้ยจุลเจิม. 2550. การดูดซับสีย้อมผ้าด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าว. วารสารวิชาการวิศวกรรมพลังงาน และสิ่งแวดล้อม.มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ : 104-112.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2533. คู่มือเจ้าหน้าที่ส่งเสริมการเกษตร เรื่อง ยางพารา. กลุ่มยางพารา กองส่งเสริมพืชพันธุ์ กรมส่งเสริมการเกษตร, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2538. เกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำ มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

ขนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. 2550. การดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยตะกอนจุลินทรีย์. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 1(1): 7-25.

จิรารัชต์ ปาปะไพ. 2553. การบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตะกอนโดยการดูดซับด้วย เปลือกชั้นในเมล็ดกาแฟและกระบวนการโคแอกกูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จินตนา จุลอุล. 2550. การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรดท์จากน้ำทิ้ง โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์ และคณิตา ดังคนานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2536. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วารสาร TTIS Textile Digest : 20-21

นรินาม. 2537. **อุตสาหกรรมย้อมผ้า**. วารสาร TTIS Textile Digest: 13-16.

นันทยา ยานูเมศ. 2537. **ความเป็นพิษและมลพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ**. วารสารคัลเลอร์เวย์ 1(6): 27-41.

มันสิน ตันทุลเวสน์. 2543. **เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วรรัตน์ วงเข็มมา. 2554. **การเปรียบเทียบการกำจัดสีรีแอคทีฟบลู จากน้ำเสียโรงงานย้อมผ้าด้วยถ่านจากกากกาแฟและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบุลย์. 2549. **ระบบบำบัดน้ำเสีย**. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

สิทธิภัย ตันธนะสฤยดี. 2549. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วรรณศิริ. 2549. **ยางพารา**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, นนทบุรี.

Joseph, M.L. 1986. **Introductory Textile Science**. McGraw-Hill, Inc., New York.

Leechart, P., W. Nakbanpote and P. Thiravetyan. 2009. Application of 'waste' wood-shaving bottom ash for adsorption of azo reactive Dyess. **Journal of Environmental Management** 90: 912-920.

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

Sundstrom, D.W. and H.B.Klei. 1979. **Wastewater Treatment**. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับสีของผ้าขาวโดยการดูดซับด้วยไม้

ยางพารา

พีเอช	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของการดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
2	6% Super Black G	0.172	0.194	0.177	0.181	0.01	59.508
	2% Turquoise H-GN	0.091	0.110	0.094	0.098	0.01	61.589
	2% Yellow LS-4G	0.283	0.317	0.284	0.295	0.02	48.122
	2% Yellow LS-R-01	0.320	0.359	0.324	0.334	0.02	47.842
	2% Orange LS-BR	0.236	0.264	0.234	0.245	0.01	50.572
	4% Navy LS-G	0.147	0.169	0.176	0.164	0.01	63.556
	2% Red LS-B	0.163	0.185	0.168	0.172	0.01	60.731
	2% Blue LS-3R	0.173	0.198	0.179	0.183	0.01	58.894
	2% Br.Blue LS-G	0.082	0.100	0.085	0.089	0.01	61.638
3	6% Super Black G	0.352	0.367	0.342	0.354	0.01	29.828
	2% Turquoise H-GN	0.175	0.187	0.170	0.177	0.01	32.056
	2% Yellow LS-4G	0.433	0.451	0.421	0.435	0.01	30.177
	2% Yellow LS-R-01	0.463	0.483	0.449	0.465	0.01	30.700
	2% Orange LS-BR	0.389	0.408	0.377	0.391	0.01	30.491
	4% Navy LS-G	0.354	0.368	0.341	0.354	0.01	29.974
	2% Red LS-B	0.315	0.327	0.304	0.315	0.01	34.168
	2% Blue LS-3R	0.348	0.363	0.335	0.349	0.01	30.406
	2% Br.Blue LS-G	0.156	0.169	0.153	0.159	0.01	31.617

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

พีเอช	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	6% Super Black G	0.523	0.531	0.519	0.524	0.00	0.694
	2% Turquoise H-GN	0.278	0.283	0.277	0.279	0.00	5.409
	2% Yellow LS-4G	0.595	0.602	0.594	0.597	0.00	4.327
	2% Yellow LS-R-01	0.618	0.625	0.619	0.621	0.00	5.674
	2% Orange LS-BR	0.555	0.555	0.549	0.553	0.00	0.540
	4% Navy LS-G	0.541	0.547	0.539	0.542	0.00	1.214
	2% Red LS-B	0.450	0.455	0.444	0.450	0.00	5.927
	2% Blue LS-3R	0.510	0.519	0.508	0.512	0.00	2.413
	2% Br.Blue LS-G	0.265	0.267	0.263	0.265	0.00	9.504
5	6% Super Black G	0.523	0.538	0.518	0.526	0.01	7.336
	2% Turquoise H-GN	0.274	0.290	0.275	0.280	0.01	9.199
	2% Yellow LS-4G	0.582	0.609	0.578	0.590	0.01	5.046
	2% Yellow LS-R-02	0.602	0.636	0.593	0.610	0.02	4.486
	2% Orange LS-BR	0.537	0.565	0.529	0.544	0.02	6.264
	4% Navy LS-G	0.542	0.553	0.537	0.544	0.01	7.325
	2% Red LS-B	0.448	0.465	0.443	0.452	0.01	9.054
	2% Blue LS-3R	0.513	0.529	0.508	0.517	0.01	7.738
	2% Br.Blue LS-G	0.258	0.269	0.259	0.262	0.00	9.028

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

พีเอช	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
6	6% Super Black G	0.530	0.550	0.544	0.541	0.01	2.813
	2% Turquoise H-GN	0.281	0.297	0.290	0.289	0.01	4.510
	2% Yellow LS-4G	0.600	0.613	0.601	0.605	0.01	1.115
	2% Yellow LS-R-02	0.629	0.636	0.623	0.629	0.01	3.169
	2% Orange LS-BR	0.555	0.567	0.558	0.560	0.01	0.000
	4% Navy LS-G	0.545	0.572	0.563	0.560	0.01	2.609
	2% Red LS-B	0.453	0.477	0.466	0.465	0.01	4.055
	2% Blue LS-3R	0.516	0.544	0.536	0.532	0.01	2.564
	2% Br.Blue LS-G	0.263	0.273	0.268	0.268	0.00	3.597
7	6% Super Black G	0.539	0.523	0.540	0.534	0.01	1.294
	2% Turquoise H-GN	0.293	0.282	0.292	0.289	0.00	2.365
	2% Yellow LS-4G	0.611	0.566	0.611	0.596	0.02	1.880
	2% Yellow LS-R-03	0.639	0.581	0.641	0.620	0.03	5.499
	2% Orange LS-BR	0.567	0.526	0.565	0.553	0.02	1.036
	4% Navy LS-G	0.551	0.539	0.552	0.547	0.01	1.025
	2% Red LS-B	0.464	0.446	0.464	0.458	0.01	4.583
	2% Blue LS-3R	0.527	0.509	0.524	0.520	0.01	2.256
	2% Br.Blue LS-G	0.270	0.265	0.273	0.269	0.00	1.703

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับร้อยละการดูดซับสารสีข้อมโดยการดูดซับด้วยถ่าน
ไม้ยางพารา

พีเอช	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของการดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			
2	6% Super Black G	0.017	0.020	0.019	0.00	61.589
	2% Turquoise H-GN	0.009	0.014	0.012	0.00	48.122
	2% Yellow LS-4G	0.067	0.067	0.067	0.00	47.842
	2% Yellow LS-R-01	0.055	0.064	0.060	0.00	50.572
	2% Orange LS-BR	0.016	0.044	0.030	0.01	63.556
	4% Navy LS-G	0.017	0.017	0.017	0.00	60.731
	2% Red LS-B	0.013	0.016	0.015	0.00	58.894
	2% Blue LS-3R	0.039	0.044	0.042	0.00	61.638
	2% Br.Blue LS-G	0.009	0.011	0.010	0.00	29.828
3	6% Super Black G	0.038	0.036	0.037	0.00	32.056
	2% Turquoise H-GN	0.018	0.018	0.018	0.00	30.177
	2% Yellow LS-4G	0.068	0.075	0.072	0.00	30.700
	2% Yellow LS-R-01	0.068	0.073	0.071	0.00	30.491
	2% Orange LS-BR	0.035	0.034	0.035	0.00	29.974
	4% Navy LS-G	0.031	0.029	0.030	0.00	34.168
	2% Red LS-B	0.034	0.033	0.034	0.00	30.406
	2% Blue LS-3R	0.052	0.057	0.055	0.00	31.617
	2% Br.Blue LS-G	0.009	0.018	0.014	0.00	0.694

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

พีเอช	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของการดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			
4	6% Super Black G	0.071	0.076	0.074	0.00	5.409
	2% Turquoise H-GN	0.038	0.041	0.040	0.00	4.327
	2% Yellow LS-4G	0.117	0.126	0.122	0.00	5.674
	2% Yellow LS-R-01	0.118	0.133	0.126	0.01	0.540
	2% Orange LS-BR	0.069	0.075	0.072	0.00	1.214
	4% Navy LS-G	0.055	0.058	0.057	0.00	5.927
	2% Red LS-B	0.070	0.033	0.052	0.02	2.413
	2% Blue LS-3R	0.103	0.057	0.080	0.02	9.504
	2% Br.Blue LS-G	0.017	0.018	0.018	0.00	7.336
5	6% Super Black G	0.094	0.097	0.096	0.00	9.199
	2% Turquoise H-GN	0.059	0.063	0.061	0.00	5.046
	2% Yellow LS-4G	0.165	0.168	0.167	0.00	4.486
	2% Yellow LS-R-02	0.163	0.167	0.165	0.00	6.264
	2% Orange LS-BR	0.095	0.100	0.098	0.00	7.325
	4% Navy LS-G	0.081	0.084	0.083	0.00	9.054
	2% Red LS-B	0.097	0.101	0.099	0.00	7.738
	2% Blue LS-3R	0.143	0.146	0.145	0.00	9.028
	2% Br.Blue LS-G	0.060	0.064	0.062	0.00	2.813

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

พีเอช	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของการดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			
6	6% Super Black G	0.062	0.060	0.061	0.00	4.510
	2% Turquoise H-GN	0.035	0.031	0.033	0.00	1.115
	2% Yellow LS-4G	0.126	0.105	0.116	0.01	3.169
	2% Yellow LS-R-02	0.119	0.104	0.112	0.01	0.000
	2% Orange LS-BR	0.058	0.059	0.059	0.00	2.609
	4% Navy LS-G	0.052	0.050	0.051	0.00	4.055
	2% Red LS-B	0.058	0.059	0.059	0.00	2.564
	2% Blue LS-3R	0.105	0.092	0.099	0.01	3.597
	2% Br.Blue LS-G	0.036	0.035	0.036	0.00	1.294
7	6% Super Black G	0.117	0.182	0.150	0.03	2.365
	2% Turquoise H-GN	0.114	0.115	0.115	0.00	1.880
	2% Yellow LS-4G	0.254	0.265	0.260	0.01	5.499
	2% Yellow LS-R-03	0.257	0.272	0.265	0.01	1.036
	2% Orange LS-BR	0.177	0.182	0.180	0.00	1.025
	4% Navy LS-G	0.158	0.164	0.161	0.00	4.583
	2% Red LS-B	0.183	0.187	0.185	0.00	2.256
	2% Blue LS-3R	0.234	0.246	0.240	0.01	1.703
	2% Br.Blue LS-G	0.117	0.118	0.118	0.00	1.293

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา

ความเร็วรอบในการเขย่า	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละของการดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
0	6% Super Black G	0.193	0.132	0.164	0.163	0.02	61.827
	2% Turquoise H-GN	0.087	0.053	0.068	0.069	0.01	69.723
	2% Yellow LS-4G	0.298	0.238	0.262	0.266	0.02	47.741
	2% Yellow LS-R-01	0.342	0.276	0.298	0.305	0.03	47.806
	2% Orange LS-BR	0.243	0.189	0.209	0.214	0.02	50.768
	4% Navy LS-G	0.190	0.127	0.162	0.160	0.03	62.520
	2% Red LS-B	0.181	0.123	0.152	0.152	0.02	63.017
	2% Blue LS-3R	0.194	0.135	0.165	0.165	0.02	61.346
	2% Br.Blue LS-G	0.078	0.046	0.058	0.061	0.01	69.967
50	6% Super Black G	0.135	0.144	0.160	0.146	0.01	65.730
	2% Turquoise H-GN	0.057	0.057	0.071	0.062	0.01	73.071
	2% Yellow LS-4G	0.235	0.244	0.265	0.248	0.01	51.277
	2% Yellow LS-R-01	0.273	0.281	0.304	0.286	0.01	51.111
	2% Orange LS-BR	0.189	0.194	0.213	0.199	0.01	54.224
	4% Navy LS-G	0.130	0.142	0.156	0.143	0.01	66.510
	2% Red LS-B	0.126	0.132	0.151	0.136	0.01	66.829
	2% Blue LS-3R	0.136	0.145	0.162	0.148	0.01	65.336
	2% Br.Blue LS-G	0.050	0.051	0.062	0.054	0.01	73.102

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ความเร็ว รอบใน การเขย่า	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละ ของการ ดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
100	6% Super Black G	0.130	0.168	0.146	0.148	0.02	65.340
	2% Turquoise H-GN	0.053	0.076	0.062	0.064	0.01	72.198
	2% Yellow LS-4G	0.231	0.272	0.246	0.250	0.02	50.950
	2% Yellow LS-R-01	0.263	0.310	0.282	0.285	0.02	51.282
	2% Orange LS-BR	0.181	0.219	0.197	0.199	0.02	54.147
	4% Navy LS-G	0.123	0.161	0.143	0.142	0.02	66.588
	2% Red LS-B	0.119	0.155	0.136	0.137	0.01	66.748
	2% Blue LS-3R	0.131	0.166	0.150	0.149	0.01	65.023
	2% Br.Blue LS-G	0.049	0.071	0.054	0.058	0.01	71.287
150	6% Super Black G	0.145	0.144	0.150	0.146	0.00	65.730
	2% Turquoise H-GN	0.064	0.064	0.069	0.066	0.00	71.325
	2% Yellow LS-4G	0.247	0.253	0.251	0.250	0.00	50.819
	2% Yellow LS-R-02	0.281	0.289	0.284	0.285	0.00	51.339
	2% Orange LS-BR	0.198	0.203	0.202	0.201	0.00	53.687
	4% Navy LS-G	0.142	0.142	0.146	0.143	0.00	66.354
	2% Red LS-B	0.136	0.132	0.139	0.136	0.00	66.991
	2% Blue LS-3R	0.147	0.147	0.152	0.149	0.00	65.102
	2% Br.Blue LS-G	0.058	0.057	0.061	0.059	0.00	70.957

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

ความเร็ว รอบใน การเขย่า	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละ ของการ ดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
200	6% Super Black G	0.137	0.146	0.140	0.141	0.00	66.979
	2% Turquoise H-GN	0.062	0.071	0.066	0.066	0.00	71.033
	2% Yellow LS-4G	0.237	0.245	0.237	0.240	0.00	52.914
	2% Yellow LS-R-02	0.269	0.280	0.272	0.274	0.00	53.219
	2% Orange LS-BR	0.188	0.199	0.188	0.192	0.01	55.837
	4% Navy LS-G	0.134	0.142	0.135	0.137	0.00	67.840
	2% Red LS-B	0.125	0.134	0.128	0.129	0.00	68.613
	2% Blue LS-3R	0.141	0.148	0.141	0.143	0.00	66.354
	2% Br.Blue LS-G	0.057	0.064	0.059	0.060	0.00	70.297

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีของผ้า
ดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา

ความเร็ว รอบใน การเขย่า	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
0	6% Super Black G	0.026	0.034	0.030	0.030	0.00	76.000
	2% Turquoise H-GN	0.011	0.015	0.013	0.013	0.00	81.159
	2% Yellow LS-4G	0.046	0.056	0.051	0.051	0.00	68.125
	2% Yellow LS-R-01	0.052	0.062	0.056	0.057	0.00	69.534
	2% Orange LS-BR	0.040	0.049	0.042	0.044	0.00	68.810
	4% Navy LS-G	0.030	0.035	0.032	0.032	0.00	74.740
	2% Red LS-B	0.028	0.031	0.024	0.028	0.00	76.353
	2% Blue LS-3R	0.029	0.038	0.032	0.033	0.00	73.387
	2% Br.Blue LS-G	0.012	0.014	0.014	0.013	0.00	79.798
50	6% Super Black G	0.036	0.027	0.042	0.035	0.01	72.000
	2% Turquoise H-GN	0.017	0.016	0.020	0.018	0.00	74.396
	2% Yellow LS-4G	0.062	0.052	0.066	0.060	0.01	62.500
	2% Yellow LS-R-01	0.073	0.058	0.075	0.069	0.01	63.082
	2% Orange LS-BR	0.051	0.045	0.058	0.051	0.01	63.333
	4% Navy LS-G	0.035	0.026	0.040	0.034	0.01	73.698
	2% Red LS-B	0.032	0.026	0.037	0.032	0.00	72.934
	2% Blue LS-3R	0.038	0.028	0.045	0.037	0.01	70.161
	2% Br.Blue LS-G	0.016	0.016	0.021	0.018	0.00	73.232

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

ความเร็ว รอบใน การเขย่า	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง				S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
100	6% Super Black G	0.022	0.021	0.025	0.023	0.00	81.867
	2% Turquoise H-GN	0.012	0.011	0.014	0.012	0.00	82.126
	2% Yellow LS-4G	0.049	0.051	0.056	0.052	0.00	67.500
	2% Yellow LS-R-01	0.058	0.057	0.064	0.060	0.00	67.921
	2% Orange LS-BR	0.041	0.044	0.046	0.044	0.00	68.810
	4% Navy LS-G	0.020	0.022	0.025	0.022	0.00	82.552
	2% Red LS-B	0.021	0.022	0.026	0.023	0.00	80.342
	2% Blue LS-3R	0.023	0.026	0.028	0.026	0.00	79.301
	2% Br.Blue LS-G	0.011	0.010	0.015	0.012	0.00	81.818
150	6% Super Black G	0.034	0.021	0.022	0.026	0.01	79.467
	2% Turquoise H-GN	0.016	0.011	0.010	0.012	0.00	82.126
	2% Yellow LS-4G	0.061	0.049	0.047	0.052	0.01	67.292
	2% Yellow LS-R-02	0.069	0.055	0.053	0.059	0.01	68.280
	2% Orange LS-BR	0.052	0.041	0.047	0.047	0.00	66.667
	4% Navy LS-G	0.032	0.021	0.021	0.025	0.01	80.729
	2% Red LS-B	0.031	0.022	0.021	0.025	0.00	78.917
	2% Blue LS-3R	0.037	0.025	0.026	0.029	0.01	76.344
	2% Br.Blue LS-G	0.016	0.010	0.010	0.012	0.00	81.818

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเขย่ากับร้อยละการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา

ระยะเวลา ในการ เขย่า	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
30	6% Super Black G	0.173	0.155	0.135	0.154	0.02	61.893
	2% Turquoise H-GN	0.086	0.077	0.066	0.076	0.01	64.985
	2% Yellow LS-4G	0.286	0.261	0.238	0.262	0.02	45.258
	2% Yellow LS-R-01	0.328	0.300	0.272	0.300	0.02	44.649
	2% Orange LS-BR	0.235	0.209	0.188	0.211	0.02	47.984
	4% Navy LS-G	0.173	0.155	0.135	0.154	0.02	61.893
	2% Red LS-B	0.168	0.145	0.125	0.146	0.02	62.564
	2% Blue LS-3R	0.175	0.156	0.134	0.155	0.02	61.250
	2% Br.Blue LS-G	0.076	0.065	0.057	0.066	0.01	65.979
60	6% Super Black G	0.136	0.135	0.142	0.138	0.00	66.008
	2% Turquoise H-GN	0.067	0.064	0.070	0.067	0.00	69.266
	2% Yellow LS-4G	0.245	0.239	0.256	0.247	0.01	48.396
	2% Yellow LS-R-01	0.279	0.273	0.292	0.281	0.01	48.093
	2% Orange LS-BR	0.197	0.190	0.206	0.198	0.01	51.193
	4% Navy LS-G	0.127	0.126	0.133	0.129	0.00	68.230
	2% Red LS-B	0.127	0.121	0.134	0.127	0.01	67.350
	2% Blue LS-3R	0.134	0.131	0.141	0.135	0.00	66.167
	2% Br.Blue LS-G	0.060	0.054	0.064	0.059	0.00	69.416

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

ระยะเวลา ในการ เขย่า	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
90	6% Super Black G	0.121	0.145	0.130	0.132	0.01	67.407
	2% Turquoise H-GN	0.061	0.077	0.068	0.069	0.01	68.502
	2% Yellow LS-4G	0.227	0.269	0.248	0.248	0.02	48.117
	2% Yellow LS-R-01	0.260	0.308	0.283	0.284	0.02	47.663
	2% Orange LS-BR	0.178	0.216	0.199	0.198	0.02	51.193
	4% Navy LS-G	0.115	0.139	0.125	0.126	0.01	68.807
	2% Red LS-B	0.111	0.142	0.124	0.126	0.01	67.778
	2% Blue LS-3R	0.120	0.148	0.131	0.133	0.01	66.750
	2% Br.Blue LS-G	0.053	0.069	0.062	0.061	0.01	68.385
120	6% Super Black G	0.146	0.138	0.183	0.156	0.02	61.564
	2% Turquoise H-GN	0.073	0.069	0.095	0.079	0.01	63.761
	2% Yellow LS-4G	0.266	0.250	0.304	0.273	0.02	42.817
	2% Yellow LS-R-02	0.305	0.288	0.344	0.312	0.02	42.374
	2% Orange LS-BR	0.214	0.198	0.249	0.220	0.02	45.597
	4% Navy LS-G	0.138	0.135	0.177	0.150	0.02	62.963
	2% Red LS-B	0.142	0.133	0.181	0.152	0.02	61.026
	2% Blue LS-3R	0.148	0.141	0.184	0.158	0.02	60.583
	2% Br.Blue LS-G	0.066	0.061	0.084	0.070	0.01	63.746

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูดซับสีย้อม
โดยการดูดซับด้วยไม้อย่างพารา

ระยะเวลา ที่ใช้เข้าสู่ สมดุล	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
0	6% Super Black G	0.164	0.174	0.148	0.162	0.01	63.348
	2% Turquoise H-GN	0.080	0.082	0.076	0.079	0.00	67.082
	2% Yellow LS-4G	0.269	0.280	0.253	0.267	0.01	49.655
	2% Yellow LS-R-01	0.304	0.318	0.288	0.303	0.01	49.696
	2% Orange LS-BR	0.221	0.228	0.206	0.218	0.01	52.433
	4% Navy LS-G	0.160	0.167	0.141	0.156	0.01	64.786
	2% Red LS-B	0.157	0.164	0.142	0.154	0.01	63.856
	2% Blue LS-3R	0.160	0.173	0.150	0.161	0.01	63.657
	2% Br.Blue LS-G	0.071	0.072	0.066	0.070	0.00	68.043
10	6% Super Black G	0.158	0.150	0.155	0.154	0.00	65.083
	2% Turquoise H-GN	0.079	0.075	0.076	0.077	0.00	68.188
	2% Yellow LS-4G	0.263	0.262	0.260	0.262	0.00	50.722
	2% Yellow LS-R-01	0.301	0.298	0.296	0.298	0.00	50.525
	2% Orange LS-BR	0.214	0.214	0.211	0.213	0.00	53.595
	4% Navy LS-G	0.156	0.146	0.152	0.151	0.00	65.839
	2% Red LS-B	0.151	0.145	0.146	0.147	0.00	65.496
	2% Blue LS-3R	0.161	0.153	0.158	0.157	0.00	64.485
	2% Br.Blue LS-G	0.070	0.067	0.067	0.068	0.00	68.807

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

ระยะเวลา ที่ใช้เข้าสู่ สมดุล	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	6% Super Black G	0.174	0.137	0.163	0.158	0.02	64.253
	2% Turquoise H-GN	0.088	0.068	0.072	0.076	0.01	68.465
	2% Yellow LS-4G	0.290	0.247	0.272	0.270	0.02	49.215
	2% Yellow LS-R-01	0.327	0.280	0.312	0.306	0.02	49.198
	2% Orange LS-BR	0.237	0.196	0.224	0.219	0.02	52.288
	4% Navy LS-G	0.172	0.135	0.155	0.154	0.02	65.237
	2% Red LS-B	0.169	0.131	0.155	0.152	0.02	64.481
	2% Blue LS-3R	0.177	0.140	0.165	0.161	0.02	63.732
	2% Br.Blue LS-G	0.079	0.063	0.072	0.071	0.01	67.278
60	6% Super Black G	0.166	0.140	0.122	0.143	0.02	67.722
	2% Turquoise H-GN	0.084	0.071	0.061	0.072	0.01	70.124
	2% Yellow LS-4G	0.280	0.246	0.229	0.252	0.02	52.605
	2% Yellow LS-R-02	0.318	0.280	0.263	0.287	0.02	52.405
	2% Orange LS-BR	0.228	0.197	0.181	0.202	0.02	55.991
	4% Navy LS-G	0.162	0.135	0.116	0.138	0.02	68.924
	2% Red LS-B	0.159	0.133	0.113	0.135	0.02	68.384
	2% Blue LS-3R	0.167	0.142	0.120	0.143	0.02	67.720
	2% Br.Blue LS-G	0.073	0.062	0.054	0.063	0.01	71.101

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลกับร้อยละการดูดซับสีย้อม
โดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา

ระยะเวลา ที่ใช้เข้าสู่ สมดุล	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง					ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.	
0	6% Super Black G	0.033	0.029	0.031	0.031	0.00	73.504
	2% Turquoise H-GN	0.015	0.011	0.011	0.012	0.00	80.729
	2% Yellow LS-4G	0.055	0.049	0.048	0.051	0.00	61.905
	2% Yellow LS-R-01	0.064	0.053	0.053	0.057	0.01	62.472
	2% Orange LS-BR	0.046	0.041	0.048	0.045	0.00	60.526
	4% Navy LS-G	0.034	0.028	0.031	0.031	0.00	74.590
	2% Red LS-B	0.028	0.024	0.039	0.030	0.01	68.729
	2% Blue LS-3R	0.025	0.030	0.024	0.026	0.00	77.299
	2% Br.Blue LS-G	0.014	0.012	0.011	0.012	0.00	79.096
10	6% Super Black G	0.017	0.009	0.017	0.014	0.00	87.749
	2% Turquoise H-GN	0.006	0.002	0.006	0.005	0.00	92.708
	2% Yellow LS-4G	0.036	0.030	0.039	0.035	0.00	73.684
	2% Yellow LS-R-01	0.042	0.036	0.044	0.041	0.00	73.068
	2% Orange LS-BR	0.030	0.030	0.039	0.033	0.00	71.053
	4% Navy LS-G	0.014	0.008	0.016	0.013	0.00	89.617
	2% Red LS-B	0.014	0.007	0.017	0.013	0.00	86.942
	2% Blue LS-3R	0.019	0.011	0.022	0.017	0.00	85.057
	2% Br.Blue LS-G	0.004	0.002	0.005	0.004	0.00	93.785

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

ระยะเวลา ที่ใช้เข้าสู่ สมดุล	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง				S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
30	6% Super Black G	0.020	0.017	0.013	0.017	0.00	85.755
	2% Turquoise H-GN	0.005	0.006	0.002	0.004	0.00	93.229
	2% Yellow LS-4G	0.046	0.038	0.029	0.038	0.01	71.679
	2% Yellow LS-R-01	0.055	0.045	0.036	0.045	0.01	69.978
	2% Orange LS-BR	0.036	0.026	0.022	0.028	0.01	75.439
	4% Navy LS-G	0.021	0.016	0.011	0.016	0.00	86.885
	2% Red LS-B	0.017	0.015	0.010	0.014	0.00	85.567
	2% Blue LS-3R	0.024	0.020	0.015	0.020	0.00	83.046
	2% Br.Blue LS-G	0.004	0.006	0.001	0.004	0.00	93.785
60	6% Super Black G	0.031	0.033	0.041	0.035	0.00	70.085
	2% Turquoise H-GN	0.014	0.014	0.020	0.016	0.00	75.000
	2% Yellow LS-4G	0.051	0.054	0.066	0.057	0.01	57.143
	2% Yellow LS-R-02	0.060	0.060	0.075	0.065	0.01	56.954
	2% Orange LS-BR	0.043	0.042	0.056	0.047	0.01	58.772
	4% Navy LS-G	0.029	0.031	0.040	0.033	0.00	72.678
	2% Red LS-B	0.026	0.026	0.035	0.029	0.00	70.103
	2% Blue LS-3R	0.033	0.035	0.041	0.036	0.00	68.678
	2% Br.Blue LS-G	0.013	0.014	0.021	0.016	0.00	72.881

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมกับร้อยละการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วยไม้ยางพารา

ความเข้มข้น	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของการดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	6% Super Black G	0.012	0.010	0.009	0.010	0.00	83.333
	2% Turquoise H-GN	0.008	0.007	0.004	0.006	0.00	78.161
	2% Yellow LS-4G	0.037	0.031	0.030	0.033	0.00	60.643
	2% Yellow LS-R-01	0.046	0.038	0.039	0.041	0.00	55.435
	2% Orange LS-BR	0.031	0.024	0.023	0.026	0.00	62.319
	4% Navy LS-G	0.011	0.009	0.006	0.009	0.00	85.792
	2% Red LS-B	0.009	0.005	0.006	0.007	0.00	89.247
	2% Blue LS-3R	0.010	0.009	0.006	0.008	0.00	86.339
	2% Br.Blue LS-G	0.005	0.002	0.002	0.003	0.00	87.500
20	6% Super Black G	0.022	0.023	0.029	0.025	0.00	84.486
	2% Turquoise H-GN	0.014	0.015	0.018	0.016	0.00	82.197
	2% Yellow LS-4G	0.060	0.060	0.069	0.063	0.00	68.342
	2% Yellow LS-R-01	0.077	0.071	0.080	0.076	0.00	65.919
	2% Orange LS-BR	0.046	0.048	0.053	0.049	0.00	71.512
	4% Navy LS-G	0.022	0.020	0.027	0.023	0.00	85.625
	2% Red LS-B	0.019	0.020	0.025	0.021	0.00	86.498
	2% Blue LS-3R	0.022	0.024	0.029	0.025	0.00	84.472
	2% Br.Blue LS-G	0.011	0.012	0.014	0.012	0.00	84.188

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ความ เข้มข้น	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	6% Super Black G	0.072	0.072	0.084	0.076	0.01	70.881
	2% Turquoise H-GN	0.037	0.040	0.043	0.040	0.00	71.014
	2% Yellow LS-4G	0.129	0.124	0.145	0.133	0.01	57.614
	2% Yellow LS-R-01	0.147	0.140	0.163	0.150	0.01	57.386
	2% Orange LS-BR	0.103	0.099	0.116	0.106	0.01	60.595
	4% Navy LS-G	0.067	0.069	0.081	0.072	0.01	72.072
	2% Red LS-B	0.064	0.065	0.076	0.068	0.01	73.411
	2% Blue LS-3R	0.070	0.070	0.083	0.074	0.01	71.950
	2% Br.Blue LS-G	0.032	0.033	0.038	0.034	0.00	73.177
40	6% Super Black G	0.123	0.094	0.106	0.108	0.01	69.671
	2% Turquoise H-GN	0.061	0.052	0.057	0.057	0.00	70.175
	2% Yellow LS-4G	0.196	0.164	0.179	0.180	0.01	57.120
	2% Yellow LS-R-02	0.226	0.186	0.203	0.205	0.02	56.290
	2% Orange LS-BR	0.158	0.132	0.146	0.145	0.01	59.630
	4% Navy LS-G	0.118	0.090	0.099	0.102	0.01	70.845
	2% Red LS-B	0.111	0.080	0.092	0.094	0.01	72.336
	2% Blue LS-3R	0.120	0.091	0.103	0.105	0.01	70.265
	2% Br.Blue LS-G	0.053	0.044	0.049	0.049	0.00	69.959

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

ความ เข้มข้น	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	6% Super Black G	0.165	0.161	0.175	0.167	0.01	62.556
	2% Turquoise H-GN	0.084	0.082	0.088	0.085	0.00	64.722
	2% Yellow LS-4G	0.264	0.250	0.276	0.263	0.01	49.841
	2% Yellow LS-R-01	0.236	0.289	0.318	0.281	0.03	52.534
	2% Orange LS-BR	0.214	0.207	0.230	0.217	0.01	51.670
	4% Navy LS-G	0.163	0.156	0.170	0.163	0.01	63.535
	2% Red LS-B	0.156	0.148	0.165	0.156	0.01	63.042
	2% Blue LS-3R	0.168	0.162	0.176	0.169	0.01	62.097
	2% Br.Blue LS-G	0.075	0.072	0.076	0.074	0.00	65.426

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมกับร้อยละการดูดซับสีย้อมโดยการดูดซับด้วยถ่านไม้ยางพารา

ความเข้มข้น	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของการดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	6% Super Black G	0.030	0.033	0.045	0.036	0.01	69.492
	2% Turquoise H-GN	0.017	0.016	0.025	0.019	0.00	70.256
	2% Yellow LS-4G	0.047	0.057	0.067	0.057	0.01	65.031
	2% Yellow LS-R-01	0.053	0.066	0.074	0.064	0.01	65.412
	2% Orange LS-BR	0.041	0.049	0.058	0.049	0.01	65.977
	4% Navy LS-G	0.030	0.033	0.045	0.036	0.01	70.000
	2% Red LS-B	0.026	0.030	0.041	0.032	0.01	71.386
	2% Blue LS-3R	0.029	0.034	0.046	0.036	0.01	69.722
	2% Br.Blue LS-G	0.017	0.017	0.026	0.020	0.00	66.102
20	6% Super Black G	0.054	0.048	0.047	0.050	0.00	70.955
	2% Turquoise H-GN	0.026	0.022	0.022	0.023	0.00	74.638
	2% Yellow LS-4G	0.086	0.083	0.083	0.084	0.00	59.223
	2% Yellow LS-R-01	0.097	0.091	0.092	0.093	0.00	59.596
	2% Orange LS-BR	0.073	0.068	0.068	0.070	0.00	60.640
	4% Navy LS-G	0.051	0.046	0.045	0.047	0.00	73.258
	2% Red LS-B	0.048	0.044	0.045	0.046	0.00	72.978
	2% Blue LS-3R	0.055	0.050	0.052	0.052	0.00	70.265
	2% Br.Blue LS-G	0.026	0.022	0.005	0.018	0.01	78.968

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

ความ เข้มข้น	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	6% Super Black G	0.100	0.077	0.084	0.087	0.01	52.198
	2% Turquoise H-GN	0.047	0.040	0.041	0.043	0.00	54.122
	2% Yellow LS-4G	0.145	0.122	0.128	0.132	0.01	38.474
	2% Yellow LS-R-01	0.163	0.136	0.142	0.147	0.01	38.494
	2% Orange LS-BR	0.120	0.102	0.105	0.109	0.01	41.081
	4% Navy LS-G	0.097	0.075	0.080	0.084	0.01	55.556
	2% Red LS-B	0.090	0.068	0.073	0.077	0.01	55.747
	2% Blue LS-3R	0.097	0.079	0.085	0.087	0.01	52.717
	2% Br.Blue LS-G	0.042	0.036	0.038	0.039	0.00	55.039
40	6% Super Black G	0.148	0.144	0.169	0.154	0.01	59.022
	2% Turquoise H-GN	0.070	0.070	0.093	0.078	0.01	60.171
	2% Yellow LS-4G	0.209	0.210	0.241	0.220	0.01	48.478
	2% Yellow LS-R-02	0.234	0.233	0.267	0.245	0.02	48.599
	2% Orange LS-BR	0.173	0.173	0.204	0.183	0.01	50.316
	4% Navy LS-G	0.143	0.139	0.164	0.149	0.01	60.774
	2% Red LS-B	0.128	0.127	0.155	0.137	0.01	61.825
	2% Blue LS-3R	0.148	0.145	0.173	0.155	0.01	58.578
	2% Br.Blue LS-G	0.063	0.064	0.089	0.072	0.01	58.382

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

ความ เข้มข้น	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
50	6% Super Black G	0.208	0.198	0.205	0.204	0.00	55.725
	2% Turquoise H-GN	0.103	0.098	0.099	0.100	0.00	57.983
	2% Yellow LS-4G	0.291	0.279	0.290	0.287	0.01	44.659
	2% Yellow LS-R-01	0.321	0.314	0.317	0.317	0.00	45.662
	2% Orange LS-BR	0.240	0.234	0.233	0.236	0.00	47.630
	4% Navy LS-G	0.103	0.098	0.099	0.100	0.00	57.983
	2% Red LS-B	0.188	0.181	0.185	0.185	0.00	58.030
	2% Blue LS-3R	0.213	0.205	0.211	0.210	0.00	54.519
	2% Br.Blue LS-G	0.094	0.090	0.089	0.091	0.00	57.870

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสีข้อมโดยการดูดซับ
ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	6% Super Black G	0.041	0.036	0.048	0.042	0.00	72.222
	2% Turquoise H-GN	0.023	0.023	0.028	0.025	0.00	70.635
	2% Yellow LS-4G	0.071	0.065	0.077	0.071	0.00	58.480
	2% Yellow LS-R-01	0.080	0.075	0.087	0.081	0.00	58.204
	2% Orange LS-BR	0.058	0.053	0.061	0.057	0.00	62.031
	4% Navy LS-G	0.038	0.039	0.047	0.041	0.00	73.160
	2% Red LS-B	0.034	0.032	0.040	0.035	0.00	75.117
	2% Blue LS-3R	0.039	0.038	0.046	0.041	0.00	72.109
	2% Br.Blue LS-G	0.021	0.020	0.021	0.021	0.00	72.072
2	6% Super Black G	0.036	0.034	0.031	0.034	0.00	77.556
	2% Turquoise H-GN	0.020	0.016	0.016	0.017	0.00	79.365
	2% Yellow LS-4G	0.064	0.066	0.060	0.063	0.00	62.963
	2% Yellow LS-R-01	0.070	0.078	0.074	0.074	0.00	61.658
	2% Orange LS-BR	0.052	0.053	0.050	0.052	0.00	65.784
	4% Navy LS-G	0.034	0.032	0.029	0.032	0.00	79.437
	2% Red LS-B	0.030	0.029	0.027	0.029	0.00	79.812
	2% Blue LS-3R	0.037	0.034	0.031	0.034	0.00	76.871
	2% Br.Blue LS-G	0.015	0.017	0.012	0.015	0.00	80.180

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ปริมาณ	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
3	6% Super Black G	0.021	0.020	0.023	0.021	0.00	85.778
	2% Turquoise H-GN	0.009	0.011	0.011	0.010	0.00	87.698
	2% Yellow LS-4G	0.044	0.054	0.048	0.049	0.00	71.540
	2% Yellow LS-R-01	0.053	0.065	0.058	0.059	0.00	69.603
	2% Orange LS-BR	0.034	0.044	0.038	0.039	0.00	74.393
	4% Navy LS-G	0.020	0.020	0.022	0.021	0.00	86.580
	2% Red LS-B	0.015	0.018	0.018	0.017	0.00	88.028
	2% Blue LS-3R	0.019	0.021	0.023	0.021	0.00	85.714
	2% Br.Blue LS-G	0.006	0.008	0.009	0.008	0.00	89.640
4	6% Super Black G	0.015	0.015	0.024	0.018	0.00	88.000
	2% Turquoise H-GN	0.006	0.007	0.012	0.008	0.00	90.079
	2% Yellow LS-4G	0.045	0.051	0.059	0.052	0.01	69.786
	2% Yellow LS-R-02	0.059	0.067	0.073	0.066	0.01	65.630
	2% Orange LS-BR	0.034	0.039	0.045	0.039	0.00	73.951
	4% Navy LS-G	0.016	0.014	0.023	0.018	0.00	88.528
	2% Red LS-B	0.011	0.012	0.020	0.014	0.00	89.906
	2% Blue LS-3R	0.014	0.015	0.024	0.018	0.00	87.982
	2% Br.Blue LS-G	0.005	0.005	0.010	0.007	0.00	90.991

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

ปริมาณ	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
5	6% Super Black G	0.020	0.012	0.014	0.015	0.00	89.778
	2% Turquoise H-GN	0.011	0.005	0.008	0.008	0.00	90.476
	2% Yellow LS-4G	0.048	0.046	0.047	0.047	0.00	72.515
	2% Yellow LS-R-02	0.064	0.061	0.058	0.061	0.00	68.394
	2% Orange LS-BR	0.038	0.035	0.037	0.037	0.00	75.717
	4% Navy LS-G	0.021	0.013	0.013	0.016	0.00	89.827
	2% Red LS-B	0.016	0.010	0.012	0.013	0.00	91.080
	2% Blue LS-3R	0.018	0.011	0.013	0.014	0.00	90.476
	2% Br.Blue LS-G	0.009	0.004	0.006	0.006	0.00	91.441

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับสีของผ้าขาวนํ้ายงพารา

ปริมาณ	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	6% Super Black G	0.030	0.021	0.028	0.026	0.00	78.591
	2% Turquoise H-GN	0.012	0.009	0.011	0.011	0.00	84.314
	2% Yellow LS-4G	0.048	0.039	0.045	0.044	0.00	68.345
	2% Yellow LS-R-01	0.058	0.047	0.050	0.052	0.00	68.496
	2% Orange LS-BR	0.038	0.030	0.034	0.034	0.00	72.358
	4% Navy LS-G	0.027	0.021	0.028	0.025	0.00	80.208
	2% Red LS-B	0.022	0.016	0.021	0.020	0.00	81.790

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ปริมาณ	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	2% Blue LS-3R	0.031	0.024	0.030	0.028	0.00	76.776
	2% Br.Blue LS-G	0.013	0.009	0.011	0.011	0.00	81.967
2	6% Super Black G	0.028	0.016	0.024	0.023	0.00	81.572
	2% Turquoise H-GN	0.012	0.005	0.011	0.009	0.00	86.275
	2% Yellow LS-4G	0.048	0.035	0.047	0.043	0.01	68.825
	2% Yellow LS-R-01	0.052	0.040	0.050	0.047	0.01	71.138
	2% Orange LS-BR	0.035	0.025	0.037	0.032	0.01	73.713
	4% Navy LS-G	0.028	0.015	0.025	0.023	0.01	82.292
	2% Red LS-B	0.022	0.012	0.021	0.018	0.00	83.025
	2% Blue LS-3R	0.030	0.018	0.027	0.025	0.01	79.508
	2% Br.Blue LS-G	0.012	0.006	0.013	0.010	0.00	83.060
	6% Super Black G	0.025	0.017	0.022	0.021	0.00	82.656
3	2% Turquoise H-GN	0.012	0.006	0.009	0.009	0.00	86.765
	2% Yellow LS-4G	0.048	0.037	0.043	0.043	0.00	69.305
	2% Yellow LS-R-01	0.053	0.044	0.047	0.048	0.00	70.732
	2% Orange LS-BR	0.038	0.029	0.034	0.034	0.00	72.629
	4% Navy LS-G	0.027	0.018	0.022	0.022	0.00	82.552
	2% Red LS-B	0.022	0.014	0.018	0.018	0.00	83.333
	2% Blue LS-3R	0.030	0.021	0.025	0.025	0.00	79.235
	2% Br.Blue LS-G	0.011	0.007	0.009	0.009	0.00	85.246

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ปริมาณ	Dyes	ค่าดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละของ การดูดซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	6% Super Black G	0.022	0.013	0.016	0.017	0.00	86.179
	2% Turquoise H-GN	0.009	0.004	0.007	0.007	0.00	90.196
	2% Yellow LS-4G	0.042	0.034	0.039	0.038	0.00	72.422
	2% Yellow LS-R-02	0.047	0.039	0.043	0.043	0.00	73.780
	2% Orange LS-BR	0.031	0.023	0.030	0.028	0.00	77.236
	4% Navy LS-G	0.021	0.012	0.015	0.016	0.00	87.500
	2% Red LS-B	0.017	0.011	0.014	0.014	0.00	87.037
	2% Blue LS-3R	0.023	0.015	0.019	0.019	0.00	84.426
	2% Br.Blue LS-G	0.009	0.005	0.008	0.007	0.00	87.978
5	6% Super Black G	0.014	0.012	0.016	0.014	0.00	88.618
	2% Turquoise H-GN	0.005	0.006	0.004	0.005	0.00	92.647
	2% Yellow LS-4G	0.032	0.033	0.036	0.034	0.00	75.779
	2% Yellow LS-R-02	0.042	0.040	0.040	0.041	0.00	75.203
	2% Orange LS-BR	0.023	0.025	0.027	0.025	0.00	79.675
	4% Navy LS-G	0.011	0.013	0.014	0.013	0.00	90.104
	2% Red LS-B	0.011	0.010	0.013	0.011	0.00	89.506
	2% Blue LS-3R	0.016	0.017	0.018	0.017	0.00	86.066
	2% Br.Blue LS-G	0.005	0.006	0.005	0.005	0.00	91.257

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	8.200	0.050	0.590	0.122	1.695	0.914	-0.229
2	20	7.600	0.050	0.310	0.132	3.226	0.881	-0.509
3	20	6.010	0.050	0.233	0.166	4.289	0.779	-0.632
4	20	6.830	0.050	0.165	0.146	6.074	0.834	-0.784
5	20	6.320	0.050	0.137	0.158	7.310	0.801	-0.864

ตารางผนวกที่ 13 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	8.300	0.050	0.585	0.249	1.709	0.604	-0.233
2	20	7.360	0.050	0.316	0.255	3.165	0.594	-0.500
3	20	5.610	0.050	0.240	0.261	4.170	0.584	-0.620
4	20	5.960	0.050	0.176	0.288	5.698	0.540	-0.756
5	20	5.490	0.050	0.145	0.249	6.892	0.604	-0.838

ตารางผนวกที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สเมียร์และฟรอนด์ช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	5.146	0.050	0.743	0.303	1.346	0.919	-0.129
2	20	4.951	0.050	0.376	0.367	2.658	0.867	-0.425
3	20	3.689	0.050	0.272	0.356	3.678	0.749	-0.566
4	20	3.786	0.050	0.203	0.420	4.934	0.775	-0.693
5	20	3.495	0.050	0.165	0.470	6.059	0.740	-0.782

ตารางผนวกที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สเมียร์และฟรอนด์ช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	4.920	0.050	0.754	0.203	1.326	0.692	-0.123
2	20	3.940	0.050	0.402	0.254	2.491	0.185	-0.396
3	20	2.390	0.050	0.294	0.418	3.407	0.185	-0.532
4	20	1.970	0.050	0.225	0.508	4.437	0.076	-0.647
5	20	1.690	0.050	0.183	0.592	5.461	-0.029	-0.737

ตารางผนวกที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	5.570	0.050	0.722	0.180	1.386	0.746	-0.142
2	20	4.620	0.050	0.385	0.216	2.601	0.665	-0.415
3	20	2.850	0.050	0.286	0.351	3.499	0.455	-0.544
4	20	2.310	0.050	0.221	0.433	4.522	0.364	-0.655
5	20	1.900	0.050	0.181	0.526	5.525	0.279	-0.742

ตารางผนวกที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	5.460	0.050	0.727	0.183	1.376	0.737	-0.138
2	20	4.400	0.050	0.390	0.227	2.564	0.643	-0.409
3	20	2.800	0.050	0.287	0.357	3.488	0.447	-0.543
4	20	2.400	0.050	0.220	0.417	4.545	0.380	-0.658
5	20	2.000	0.050	0.180	0.500	5.556	0.301	-0.745

ตารางผนวกที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B
ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	5.320	0.050	0.734	0.188	1.362	0.726	-0.134
2	20	4.030	0.050	0.399	0.248	2.505	0.605	-0.399
3	20	2.590	0.050	0.290	0.386	3.446	0.413	-0.537
4	20	2.200	0.050	0.223	0.455	4.494	0.342	-0.653
5	20	1.940	0.050	0.181	0.515	5.537	0.288	-0.743

ตารางผนวกที่ 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R
ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	5.710	0.050	0.715	0.175	1.400	0.757	-0.146
2	20	4.040	0.050	0.399	0.248	2.506	0.606	-0.399
3	20	2.380	0.050	0.294	0.420	3.405	0.377	-0.532
4	20	1.900	0.050	0.226	0.526	4.420	0.279	-0.645
5	20	1.900	0.050	0.181	0.526	5.525	0.279	-0.742

ตารางผนวกที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ด้วยไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	5.400	0.050	0.730	0.185	1.370	0.732	-0.137
2	20	3.780	0.050	0.406	0.265	2.466	0.577	-0.392
3	20	1.890	0.050	0.302	0.529	3.313	0.276	-0.520
4	20	1.620	0.050	0.230	0.617	4.353	0.210	-0.639
5	20	1.620	0.050	0.184	0.617	5.441	0.210	-0.736

ตารางผนวกที่ 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	6.210	0.050	0.690	0.161	1.450	0.793	-0.161
2	20	5.730	0.050	0.357	0.175	2.803	0.758	-0.448
3	20	5.850	0.050	0.236	0.171	4.240	0.767	-0.627
4	20	5.240	0.050	0.185	0.191	5.420	0.719	-0.734
5	20	4.800	0.050	0.152	0.208	6.579	0.681	-0.818

ตารางผนวกที่ 22 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	6.330	0.050	0.684	0.158	1.463	0.801	-0.165
2	20	6.180	0.050	0.346	0.162	2.894	0.791	-0.462
3	20	6.040	0.050	0.233	0.166	4.298	0.781	-0.633
4	20	5.460	0.050	0.182	0.183	5.502	0.737	-0.741
5	20	4.740	0.050	0.153	0.211	6.553	0.676	-0.816

ตารางผนวกที่ 23 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	7.010	0.050	0.650	0.143	1.540	0.846	-0.187
2	20	6.750	0.050	0.331	0.148	3.019	0.829	-0.480
3	20	5.030	0.050	0.250	0.199	4.008	0.702	-0.603
4	20	5.160	0.050	0.186	0.194	5.391	0.713	-0.732
5	20	4.760	0.050	0.152	0.210	6.562	0.678	-0.817

ตารางผนวกที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สเมียร์และฟรอนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ								
(กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	3.500	0.050	0.825	0.286	1.212	0.544	-0.084
2	20	3.330	0.050	0.417	0.300	2.400	0.522	-0.380
3	20	3.330	0.050	0.278	0.300	3.599	0.522	-0.556
4	20	2.590	0.050	0.218	0.386	4.595	0.413	-0.662
5	20	2.030	0.050	0.180	0.493	5.565	0.307	-0.745

ตารางผนวกที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สเมียร์และฟรอนดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ								
(กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	4.590	0.050	0.771	0.218	1.298	0.662	-0.113
2	20	4.090	0.050	0.398	0.244	2.514	0.612	-0.400
3	20	4.090	0.050	0.265	0.244	3.771	0.612	-0.576
4	20	3.110	0.050	0.211	0.322	4.737	0.493	-0.675
5	20	2.780	0.050	0.172	0.360	5.807	0.444	-0.764

ตารางผนวกที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G
ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	4.220	0.050	0.789	0.237	1.267	0.625	-0.103
2	20	3.570	0.050	0.411	0.280	2.435	0.553	-0.386
3	20	3.410	0.050	0.277	0.293	3.617	0.533	-0.558
4	20	2.760	0.050	0.216	0.362	4.640	0.441	-0.667
5	20	2.270	0.050	0.177	0.441	5.640	0.356	-0.751

ตารางผนวกที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B
ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	4.060	0.050	0.797	0.246	1.255	0.609	-0.099
2	20	3.430	0.050	0.414	0.292	2.414	0.535	-0.383
3	20	3.430	0.050	0.276	0.292	3.621	0.535	-0.559
4	20	2.500	0.050	0.219	0.400	4.571	0.398	-0.660
5	20	1.870	0.050	0.181	0.535	5.516	0.272	-0.742

ตารางผนวกที่ 28 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R
ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	2.940	0.050	0.853	0.340	1.172	0.468	-0.069
2	20	2.640	0.050	0.434	0.379	2.304	0.422	-0.363
3	20	2.640	0.050	0.289	0.379	3.456	0.422	-0.539
4	20	1.760	0.050	0.228	0.568	4.386	0.246	-0.642
5	20	1.470	0.050	0.185	0.680	5.397	0.167	-0.732

ตารางผนวกที่ 29 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุณดิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G
ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ปริมาณ (กรัม)	C0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	log c	log q
1	20	3.610	0.050	0.820	0.277	1.220	0.558	-0.086
2	20	3.270	0.050	0.418	0.306	2.391	0.515	-0.379
3	20	2.950	0.050	0.284	0.339	3.519	0.470	-0.546
4	20	2.290	0.050	0.221	0.437	4.517	0.360	-0.655
5	20	1.630	0.050	0.184	0.613	5.444	0.212	-0.736

ตารางผนวกที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสีย้อม

Dyes	ฟื้นฟูสภาพ ครั้งที่ 1	ฟื้นฟูสภาพ ครั้งที่ 2	ฟื้นฟูสภาพ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
6% Super Black G	22.22	11.11	0.00	11.11	9.07
2% Turquoise H-GN	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
2% Yellow LS-4G	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
2% Yellow LS-R-01	9.09	9.09	9.09	9.09	0.00
2% Orange LS-BR	11.11	11.11	0.00	7.41	5.24
4% Navy LS-G	30.00	20.00	20.00	23.33	4.71
2% Red LS-B	25.00	12.50	0.00	12.50	10.21
2% Blue LS-3R	11.11	11.11	11.11	11.11	0.00
2% Br.Blue LS-G	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00

ตารางผนวกที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างการฟื้นฟูสภาพถ่านไม้ยางพารากับร้อยละการดูดซับสีย้อม

Dyes	ฟื้นฟูสภาพ ครั้งที่ 1	ฟื้นฟูสภาพ ครั้งที่ 2	ฟื้นฟูสภาพ ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D.
6% Super Black G	55.56	22.22	11.11	29.63	18.89
2% Turquoise H-GN	40.00	20.00	0.00	20.00	16.33
2% Yellow LS-4G	40.00	20.00	0.00	20.00	16.33
2% Yellow LS-R-01	27.27	9.09	0.00	12.12	11.34
2% Orange LS-BR	33.33	22.22	0.00	18.52	13.86
4% Navy LS-G	60.00	40.00	10.00	36.67	20.55
2% Red LS-B	62.50	37.50	12.50	37.50	20.41
2% Blue LS-3R	44.44	22.22	0.00	22.22	18.14
2% Br.Blue LS-G	40.00	20.00	0.00	20.00	16.33

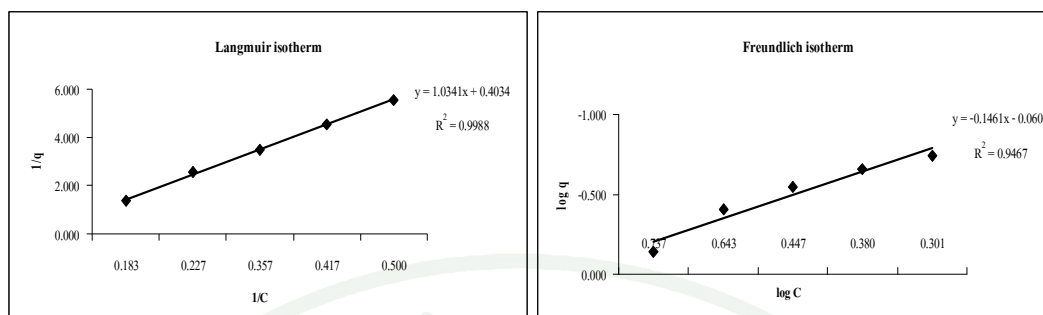
ตารางผนวกที่ 32 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าที่ดื้อเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าที่ดื้อเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ดื้อเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	ระเหยแห้ง ที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรอง
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด

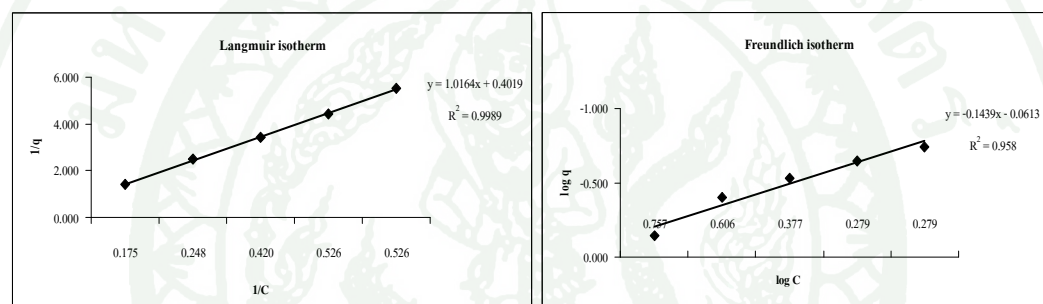
ตารางผนวกที่ 32 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
6. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่าง แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำ ละลาย แล้วแยกหา น้ำหนักของน้ำมัน และไขมัน
7. ค่าบีโอดี (5 วันที่ อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างแล้วแต่ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็น เวลา 5 วัน
8. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่าง แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion

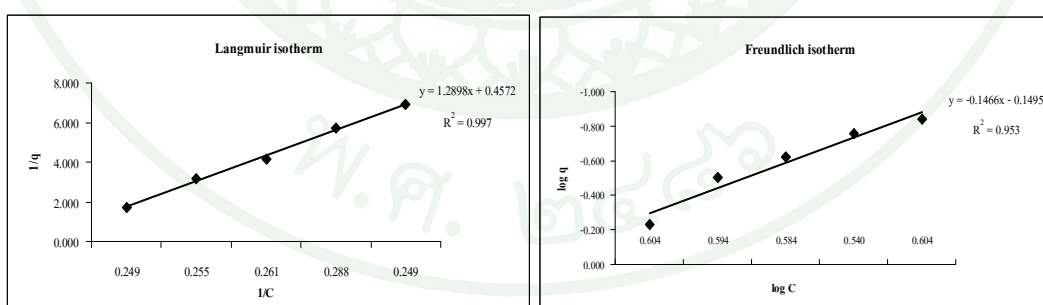
ที่มา: ดัดแปลงจากประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน อุตสาหกรรมและ นิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



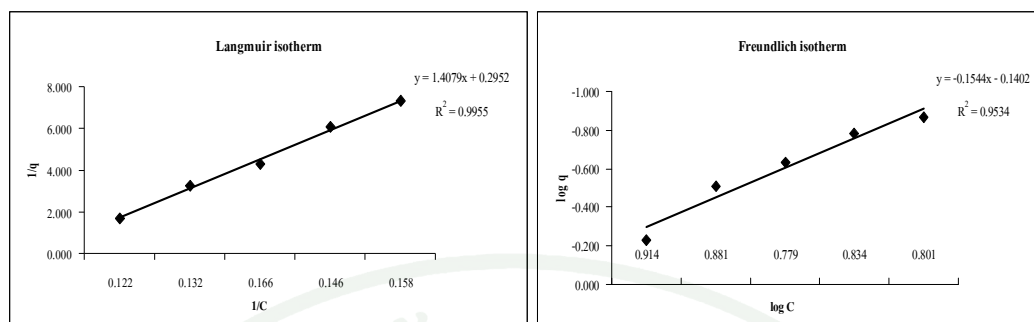
ภาพผนวกที่ 1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยไม้ยางพารา



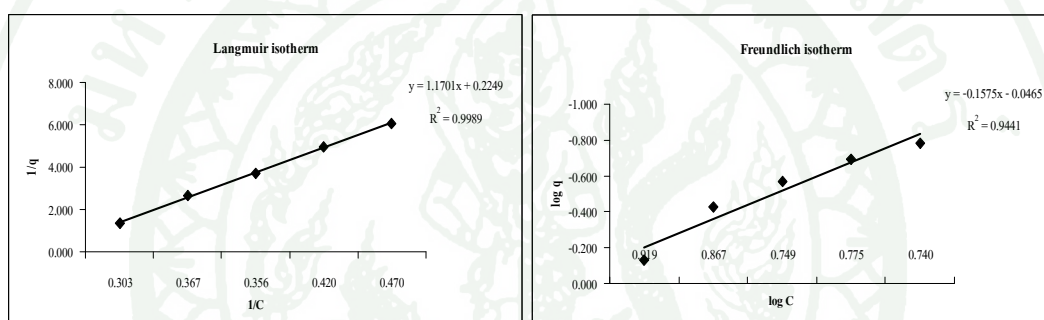
ภาพผนวกที่ 2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยไม้ยางพารา



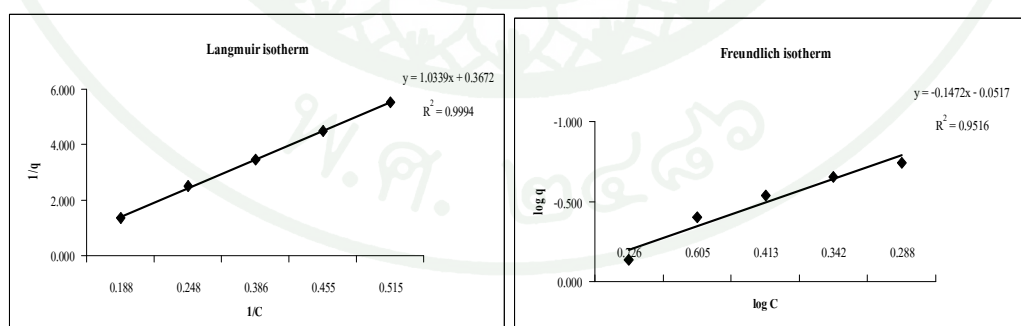
ภาพผนวกที่ 3 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยไม้ยางพารา



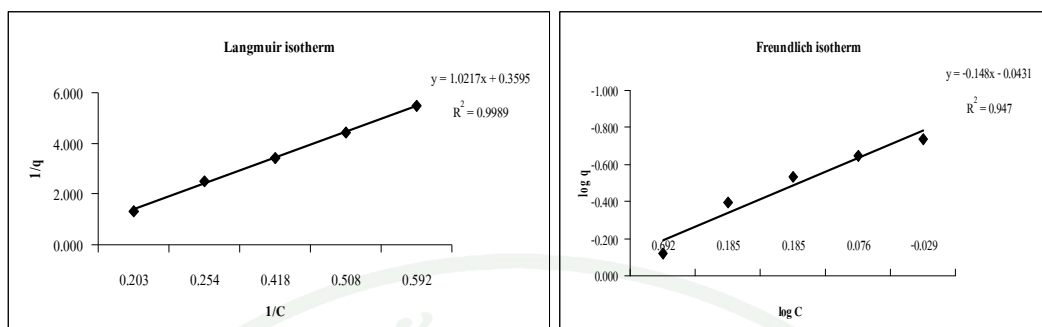
ภาพผนวกที่ 4 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยไม้ยางพารา



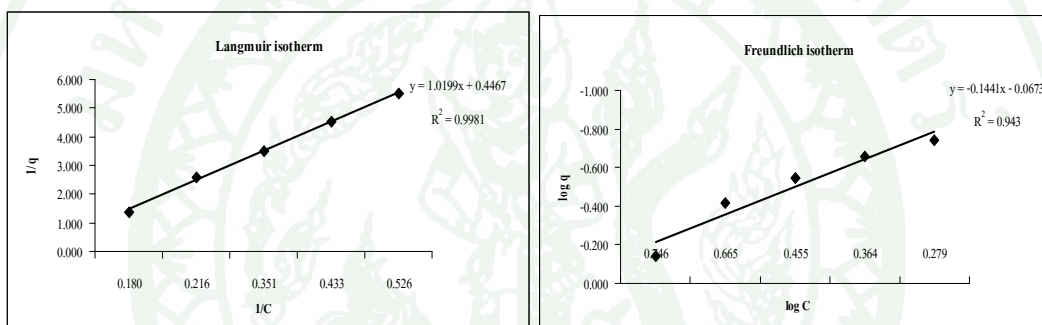
ภาพผนวกที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยไม้ยางพารา



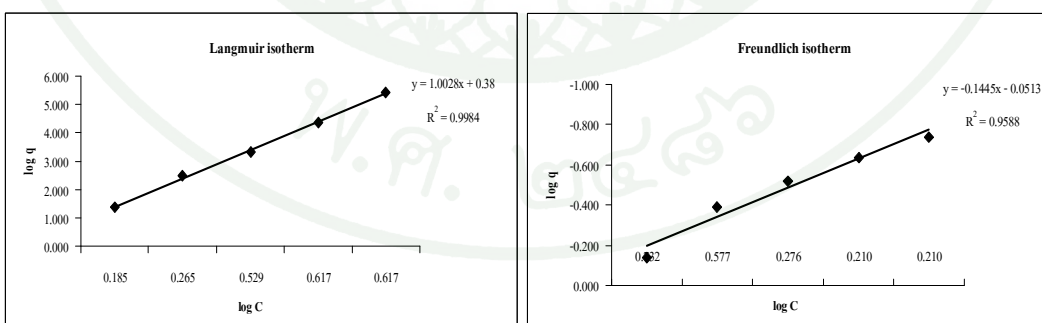
ภาพผนวกที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G ด้วยไม้ยางพารา



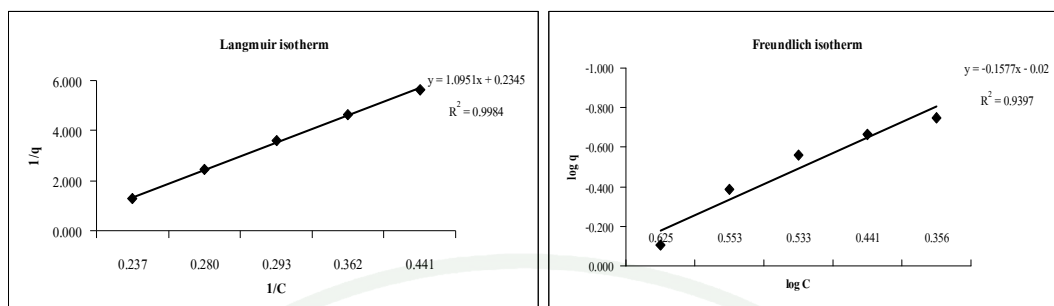
ภาพผนวกที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B ด้วยไม้ยางพารา



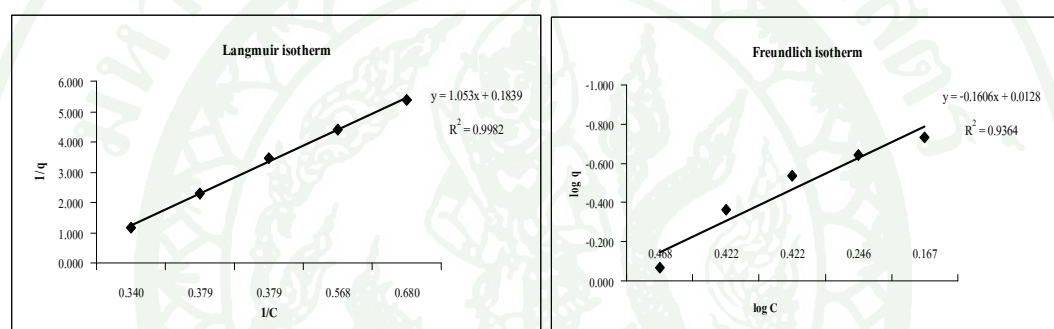
ภาพผนวกที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ด้วยไม้ยางพารา



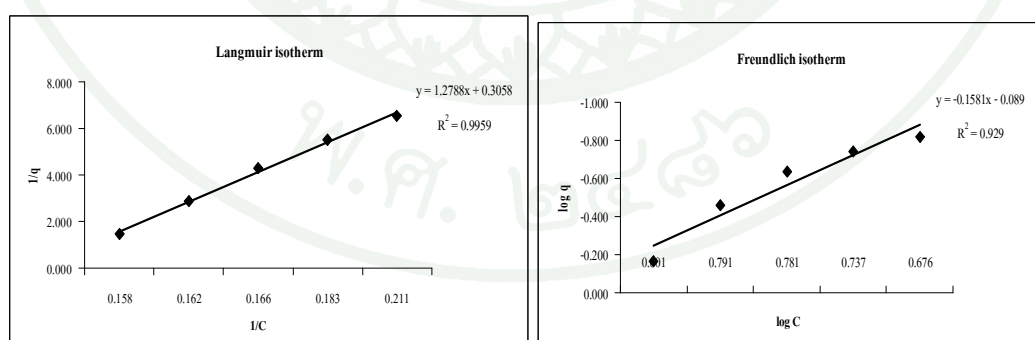
ภาพผนวกที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ด้วยไม้ยางพารา



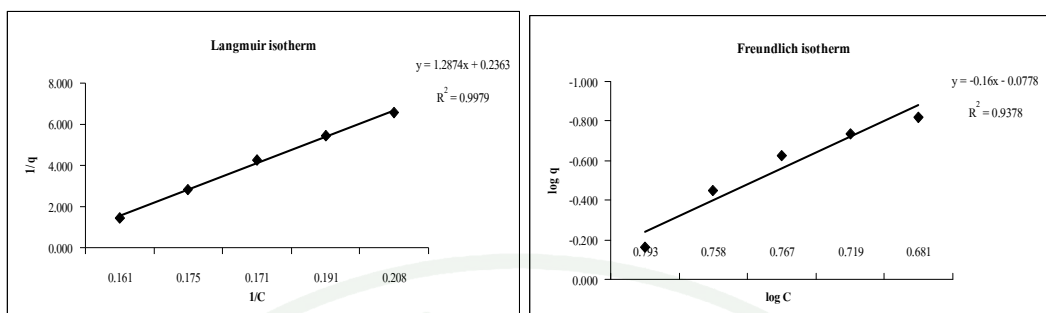
ภาพผนวกที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรูนดิช ในการดูดซับสี 6% Super Black G ด้วยถ่านไม้ยางพารา



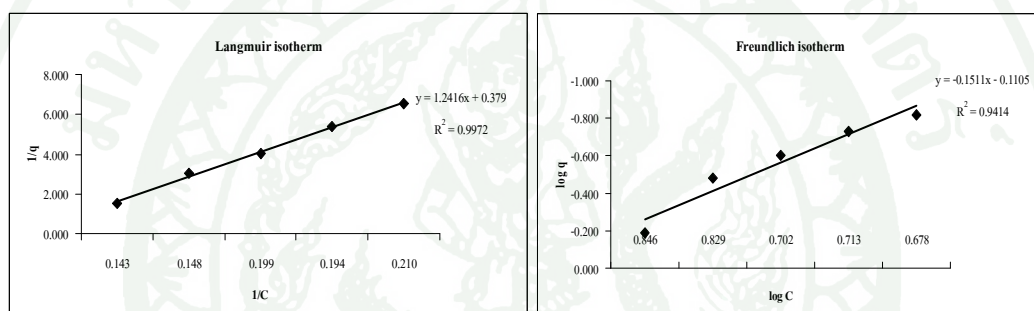
ภาพผนวกที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรูนดิช ในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ด้วยถ่านไม้ยางพารา



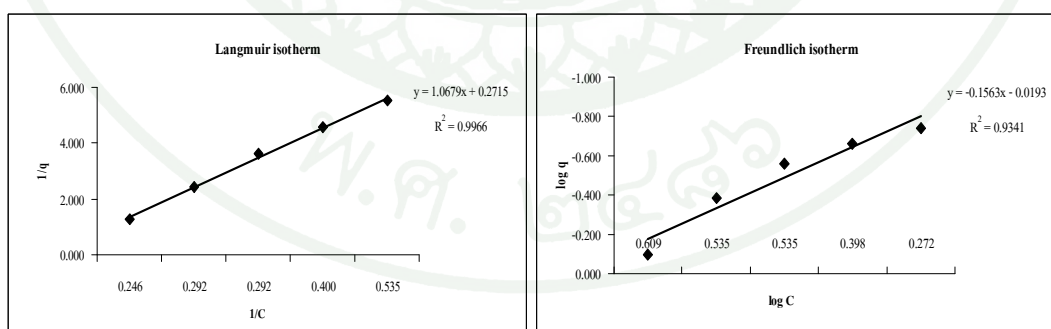
ภาพผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรูนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ด้วยถ่านไม้ยางพารา



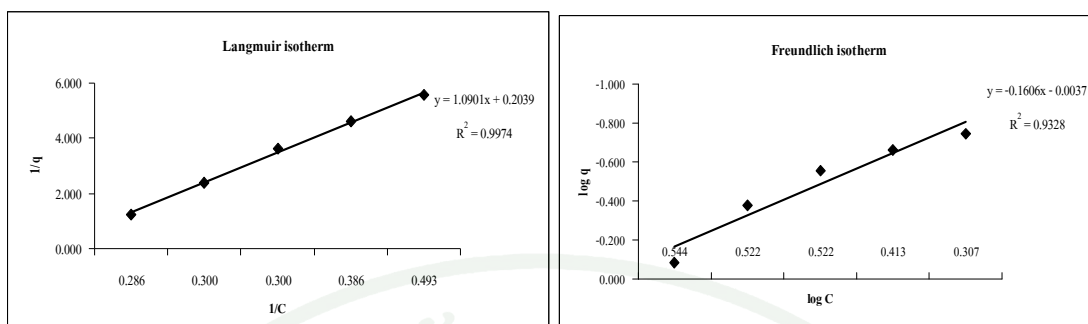
ภาพผนวกที่ 13 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ด้วยถ่านไม้ยางพารา



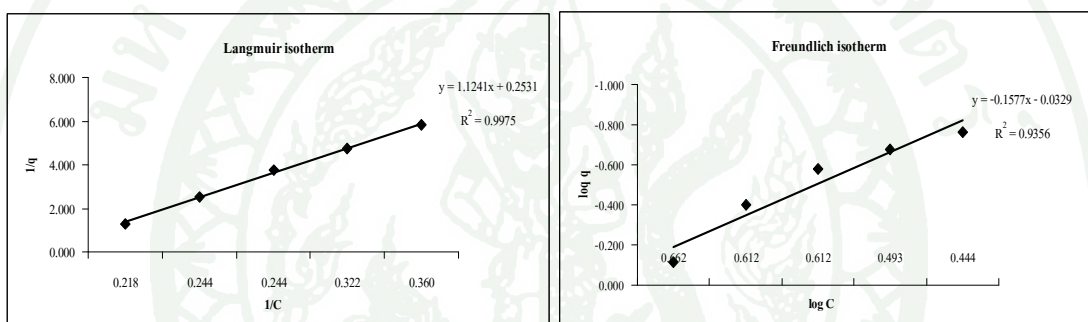
ภาพผนวกที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ด้วยถ่านไม้ยางพารา



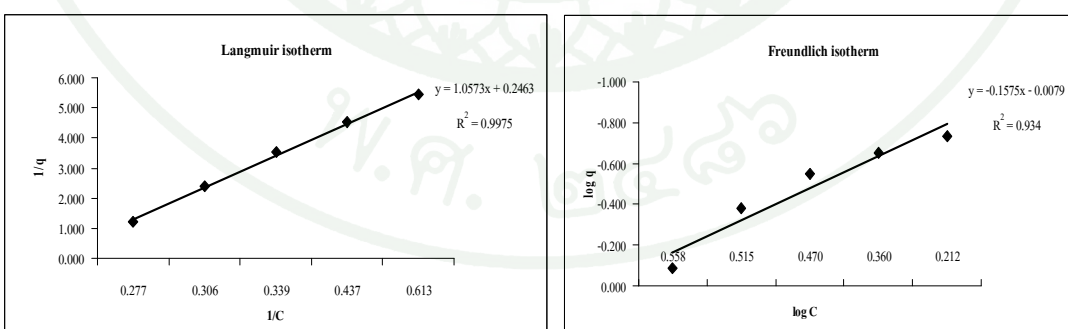
ภาพผนวกที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 4% Navy LS-G ด้วยถ่านไม้ยางพารา



ภาพผนวกที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Red LS-B ด้วย ถ่านไม้ยางพารา



ภาพผนวกที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ด้วยถ่านไม้ยางพารา



ภาพผนวกที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ด้วยถ่านไม้ยางพารา

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวกัญติยา สดใส
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 17 พฤษภาคม 2530
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลบางสะพาน จ.ประจวบคีรีขันธ์
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลม ผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ