



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมตัวดูดซับจากคักแด่ใหม่เพื่อกำจัดสีรีแอคทีฟบลู 19 และสีรีแอคทีฟเรด 3

Preparation of Silkworm Pupa Adsorbent for Removal of Reactive Blue 19 and
Reactive Red 3

นามผู้วิจัย นายชาติชาย อัมเกษรรุ่งเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... อาจารย์ศุภพร ศุภผล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

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

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... อาจารย์พิลาณี ไกลนอมสัดย์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมตัวดูดซับจากดักแด้ไหมเพื่อกำจัดสีรีแอคทีฟบลู 19 และสีรีแอคทีฟเรด 3

Preparation of Silkworm Pupa Adsorbent for Removal of Reactive Blue 19
and Reactive Red 3

โดย

นายชาติชาย อิ่มเกษรรุ่งเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร้งสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2551

ชาติชาย อัมเภสรุ่งเจริญ 2551: การเตรียมตัวดูดซับจากดักแด้ไหมเพื่อการกำจัด
สรีรเอกทีฟบลู 19 และสรีรเอกทีฟเรด 3 ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ศวพร สุขผล, Ph.D. 104 หน้า

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดสรีรเอกทีฟ ทั้งในสารละลาย
มาตรฐานและน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยใช้ผงดักแด้ไหมเป็นตัวดูดซับเนื่องจากมี
คุณสมบัติจำเพาะในการดูดซับคือ กรดอะมิโนโปรตีนของดักแด้ไหมสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์
กับโครงสร้างสรีรเอกทีฟ ซึ่งสรีรเอกทีฟที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มี 2 สีคือ สรีรเอกทีฟบลู 19
และสรีรเอกทีฟเรด 3 ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะในการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ปริมาณตัวดูดซับ
ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นสรีรเอกทีฟเริ่มต้น การดูดซับสรีรเอกทีฟโดยผ่าน
คอลัมน์ และการฟื้นฟูสภาพผงดักแด้ไหมหลังผ่านการใช้งานแล้ว สำหรับผลที่ได้จากการศึกษาวิจัย
นั้นสามารถบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพและสภาวะในการดูดซับสรีรเอกทีฟในสารละลายมาตรฐาน
พบว่า ผงดักแด้ไหมมีสภาวะในการดูดซับทั้งสรีรเอกทีฟบลู 19 และสรีรเอกทีฟเรด 3 ได้ที่พีเอช
เดียวกันคือ 11 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 5 กรัม และ 6 กรัมตามลำดับ ระยะเวลาปั่นกววนเท่ากับ
180 นาทีและ 240 นาที ตามลำดับ ระยะเวลาสัมผัสของทั้ง 2 สี เท่ากับ 120 นาที ที่ความเข้มข้นสรีร
เอกทีฟเริ่มต้น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งสภาวะดังกล่าวนี้ผง
ดักแด้ไหมสามารถดูดซับสรีรเอกทีฟบลู 19 และสรีรเอกทีฟเรด 3 ได้ร้อยละ 84.62 และ 81.56
ตามลำดับ เมื่อนำสรีรเอกทีฟทั้ง 2 สีมาทำการดูดซับโดยผ่านคอลัมน์ พบว่าผงดักแด้ไหมสามารถดูด
ซับสรีรเอกทีฟทั้ง 2 สีได้แตกต่างกัน ซึ่งเปรียบเทียบปริมาณสารละลายสรีรเอกทีฟที่ไหลผ่าน
คอลัมน์เท่ากันคือ 50 มิลลิลิตร โดยสามารถดูดซับสรีรเอกทีฟบลู 19 และสรีรเอกทีฟเรด 3 ได้ร้อยละ
89.62 และ 74.41 โดยมีอัตราการไหลแตกต่างกันคือ 0.71 และ 0.91 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ และ
ผลการฟื้นฟูสภาพผงดักแด้ไหม 3 ครั้ง หลังจากผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าผงดักแด้ไหมสามารถดูด
ซับสรีรเอกทีฟบลู 19 ได้ร้อยละ 80.21, 73.44 และ 59.89 สำหรับสรีรเอกทีฟเรด 3 ได้ร้อยละ 76.51,
63.43 และ 43.18 ตามลำดับ ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวยังแสดงสภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับสมการของ
ฟรุนดลิชอีกด้วย

Chatchai Imkesonrungcharoen 2008: Preparation of Silkworm Pupa Adsorbent
for Removal of Reactive Blue 19 and Reactive Red 3. Master of Science
(Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment.
Thesis Advisor: Miss Savaporn Supaphol, Ph.D. 104 pages.

This study was focused on the feasibility study of reactive dyes adsorption in standard solution and actual wastewater by silkworm pupa. The silkworm pupa powder adsorbent has amino acids those can form covalent bond with reactive dye structure. Two reactive dyes (reactive blue 19 and reactive red 3) were used. The experiment was conducted in order to figure out the optimum treatment condition in terms of pH, volume of adsorbents, shaking time, contact time, concentration of adsorbate in batch experiment. Furthermore, the adsorption through column and recovery of used adsorbent were investigated. The results demonstrated highest adsorption efficiency of reactive blue 19 in standard solution wastewater at 84.62 % under the condition pH 11, adsorbent volume 5 grams, shaking time 180 min, contact time 120 min and concentration of reactive blue 19 700 mg/l, whereas 81.56 % highest adsorption efficiency for reactive red 3 was obtained under the condition pH 11, adsorbent volume 6 grams, shaking time 240 min, contact time 120 min and concentration of reactive red 3 400 mg/l. When experimented through column, the highest adsorption at 89.62 % was obtained for reactive blue 19 with flow rate 0.71 ml/min, while 73.83 % highest adsorption was achieved for reactive red 3 with flow rate 0.91 ml/min. The recovery of used adsorbent for 3 times was shown to decrease the adsorption efficiency. For reactive blue 19, they were 80.21, 73.44 and 59.89 % after the 1st, 2nd and 3rd regenerations. For reactive red 3, they were 76.51, 63.43 and 43.18 % after the 1st, 2nd and 3rd regenerations. Moreover, the adsorption of both reactive blue 19 and reactive red 3 demonstrated the conformity according to the Freundlich Isotherm equation.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ศวพร สุขผล ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และดร.พิลาณี ไวถนอมสัจด์ กรรมการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์และการจัดการของเสีย ฝายนาโนเทคโนโลยีและเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการศึกษาวิจัย ทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อปัญญา อิมเกษรรุ่งเจริญ คุณแม่นงนุช บัวศิริ และครอบครัว ที่ได้เมตตา อบรมสั่งสอน ให้ความรู้จนถึงปัจจุบัน รวมถึงขอขอบคุณเพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 30 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังใจและกำลังใจในการศึกษาวิจัยทดลอง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ชาติชาย อิมเกษรรุ่งเจริญ
กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	47
ผลการทดลองและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	82
สรุป	82
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	89
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	104

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณการใช้น้ำและลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมแต่ละประเภท	10
2	องค์ประกอบของดักแค้ใหม่	26
3	ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนของโปรตีนจากดักแค้ใหม่	26
4	องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของดักแค้ใหม่	55
5	การจำแนกชนิดและปริมาณกรดอะมิโนของดักแค้ใหม่	56
6	แสดงค่า pH และประสิทธิภาพการดูดซับแต่ละสีของตัวดูดซับ	62
7	แสดงค่าปริมาณตัวดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสีแต่ละสี ของตัวดูดซับ	63
8	แสดงระยะเวลาปั่นกววนและประสิทธิภาพการดูดซับสีแต่ละสี ของตัวดูดซับ	64
9	แสดงระยะเวลาสัมผัสและประสิทธิภาพการดูดซับแต่ละสีของตัวดูดซับ	66
10	แสดงความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นและประสิทธิภาพการดูดซับแต่ละสี ของตัวดูดซับ	67
11	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนลิช และแลงเมียร์ในการดูดซับ สีรีแอกทีฟของดักแค้ใหม่	74
12	สรุปสถานะที่ใช้ในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงาน	80
13	ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยตัวดูดซับจาก ผงดักแค้ใหม่	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม และค่าพีเอช	90
2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม และค่าพีเอช	90
3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม และปริมาณตัวดูดซับ	91
4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม และปริมาณตัวดูดซับ	91
5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม และระยะเวลาปั่นกวน	92
6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม และระยะเวลาปั่นกวน	93
7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม และระยะเวลาสัมผัส	94
8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม และระยะเวลาสัมผัส	94
9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม และความเข้มข้นสรีรแอทฟเริ่มต้น	95
10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม และความเข้มข้นสรีรแอทฟเริ่มต้น	96
11 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรแอทฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม	97
12 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรแอทฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม และปริมาตรสีรีแอกทีฟบลู 19 ที่ไหลผ่านคอลัมน์	99
14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม และปริมาตรสีรีแอกทีฟเรด 3 ที่ไหลผ่านคอลัมน์	99
15 การดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 ของผงดักแดดไหมโดยผ่านการใช้งาน และฟื้นฟูสภาพแล้ว	100
16 การดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ของผงดักแดดไหมโดยผ่านการใช้งาน และฟื้นฟูสภาพแล้ว	100
17 การดูดซับสีรีแอกทีฟในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ของผงดักแดดไหม	101
18 ค่า COD น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอหลังจากผ่านกระบวนการดูดซับ ของผงดักแดดไหม	101

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการฟอกย้อมในขั้นตอนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อม	3
2	ลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟ	19
3	ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic addition	20
4	ปฏิกิริยาที่เกิดกับเซลลูโลส	20
5	โครงสร้างโมเลกุลสีรีแอคทีฟ C.I. Reactive Blue 4	21
6	วัฏจักรชีวิตของดักแด้ไหม	24
7	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	29
8	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	34
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	36
10	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	38
11	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	39
12	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	40
13	กราฟแสดงความชันระหว่าง $1/q$ และ $1/c$	41
14	ดักแด้ไหมตากแห้ง	57
15	ผงดักแด้ไหมแห้งปั่นละเอียด	58
16	เปรียบเทียบตัวดูดซับก่อน (A) และหลังการดูดซับสีรีแอคทีฟบลู 19 (B) และสีรีแอคทีฟเรด 3 (C)	59
17	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอคทีฟของผงดักแด้ไหม และค่าพีเอช	60
18	ปฏิกิริยาสีรีแอคทีฟบลู 19 (A) และสีรีแอคทีฟเรด 3 (B) กับกรดแอสพาทิกในสภาวะเบส	61
19	ปฏิกิริยาสีรีแอคทีฟเรด 3 กับกรดแอสพาทิกในสภาวะเบสจัด	61
20	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอคทีฟของผงดักแด้ไหม และปริมาณตัวดูดซับ	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทึฟของผงดักแด้ใหม่ และระยะเวลาปั่นกวน	64
22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทึฟของผงดักแด้ใหม่ และระยะเวลาสัมผัส	65
23	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทึฟของผงดักแด้ใหม่ และความเข้มข้นสรีรเอกทึฟเริ่มต้น	66
24	ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรเอกทึฟบลู 19 ของแสงเมียร์	68
25	ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรเอกทึฟบลู 19 ของฟรุณดิช	70
26	ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรเอกทึฟเรด 3 ของแสงเมียร์	72
27	ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรเอกทึฟเรด 3 ของฟรุณดิช	73
28	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทึฟบลู 19 และปริมาตร สรีรเอกทึฟบลู 19 ที่ไหลผ่านคอลัมน์	76
29	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทึฟเรด 3 และปริมาตร สรีรเอกทึฟเรด 3 ที่ไหลผ่านคอลัมน์	77
30	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทึฟบลู 19 ของผงดักแด้ใหม่ และการฟื้นฟูสภาพผงดักแด้ใหม่	78
31	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทึฟเรด 3 ของผงดักแด้ใหม่ และการฟื้นฟูสภาพผงดักแด้ใหม่	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	ความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร ของ สารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19	102
2	ความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540.5 นาโนเมตร ของ สารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเรด 3	102
3	โครงสร้างสีรีแอกทีฟบลู 19	103
4	โครงสร้างสีรีแอกทีฟเรด 3	103

การเตรียมตัวดูดซับจากดักแด้ไหมเพื่อกำจัดสีรีแอกทีฟบลู 19 และสีรีแอกทีฟเรด 3

Preparation of Silkworm Pupa Adsorbent for Removal of Reactive Blue 19 and Reactive Red 3

คำนำ

น้ำทิ้งจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมลภาวะทางน้ำ โดยเฉพาะโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ก่อให้เกิดน้ำทิ้งปริมาณมากและบำบัดได้ยาก เนื่องจากเป็นน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของสีสูง รวมทั้งมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เจือปนอยู่ในปริมาณมาก หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่มีการบำบัดเสียก่อน จะมีผลต่อการส่องผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่ได้ผิวน้ำ ทำให้เกิดการขาดช่วงกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นการทำลายทัศนียภาพ ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศ ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย

โดยทั่วไปการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ นิยมใช้ระบบบำบัดทางชีววิทยาหรือระบบเติมสารเคมี ซึ่งสามารถบำบัดตะกอนแขวนลอยและค่าบีโอดีได้ในระดับดี แต่ในการบำบัดสีและสารอื่นๆ ยังไม่สามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้มีการตกค้างในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว

ประเทศไทยมีการเลี้ยงไหมทั่วทุกภาค แต่แหล่งผลิตที่สำคัญคือภาคตะวันออกเฉียงเหนือและบางจังหวัดในภาคเหนือ แนวนไหมในอนาคตจะมีผลผลิตจากไหมมากขึ้น เนื่องจากการส่งเสริมการเลี้ยงไหมของกรมส่งเสริมการเกษตรในพื้นที่ชนบทต่างๆ จากการศึกษาเทคนิคเพื่อใช้ในการกำจัดโดยวิธีการดูดติดผิวเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งการเลือกใช้ดักแด้ไหมอันเป็นผลพลอยได้จากการเลี้ยงไหม เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนและไขมันที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม ดังนั้นการนำดักแด้ไหมมาใช้ในการกำจัดสีย้อม นอกจากจะเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์ของเหลือจากอุตสาหกรรมการเลี้ยงไหม แล้วยังเป็นการช่วยลดต้นทุนในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทออีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาลักษณะและสภาวะของตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ
2. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหม ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ
3. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหม ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

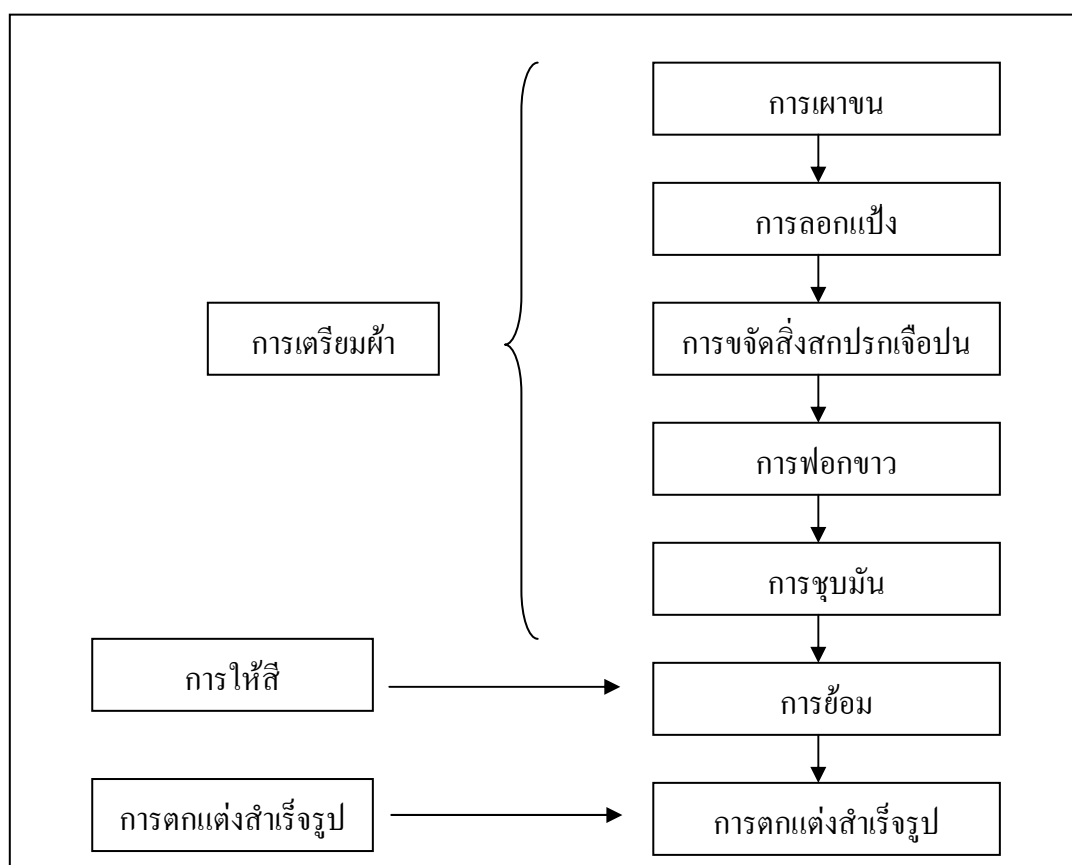
ขอบเขตการวิจัย

1. การศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับจากดักแด้ไหม ในการกำจัดสีรีแอกทีฟ 2 สี ได้แก่ สีรีแอกทีฟบลู 19 และสีรีแอกทีฟเรด 3
2. การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของดักแด้ไหมในการกำจัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ทำการศึกษาสมบัติจำเพาะของดักแด้ไหม ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน ความชื้น และเถ้า รวมทั้งการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีโดยใช้สารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ เพื่อทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

การตรวจเอกสาร

กระบวนการฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรงหรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลายได้ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณภาพของเส้นใย โดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำมาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)



ภาพที่ 1 กระบวนการฟอกย้อมในขั้นตอนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)

1. การฟอกย้อมสิ่งทอ

1.1 การเผาขน

กระบวนการเผาขนเป็นการกำจัดปลายเส้นใยด้าย เนื่องจากเส้นด้ายที่ปั่นจากใยสั้นที่เรียกว่าเส้นใยสปันนั้น มักมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก และเมื่อเส้นด้ายถูกนำไปทอเป็นผืนผ้า ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมามีผลทำให้ผิวผ้าดูไม่เรียบ เป็นการทำความเงาของผ้า จึงได้มีการคิดวิธีการกำจัดปลายเส้นใยด้วยการใช้ความร้อนทำลาย โดยวิธีการเผาโดยใช้เปลวก๊าซเป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากได้ผลดีกว่าวิธีอื่นๆ

1.2 การลอกแป้ง

กระบวนการลอกแป้งเป็นการกำจัดแป้งซึ่งมาจากการลงแป้งซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นในการทอผ้า เนื่องจากในการทอต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายขึ้น เพื่อให้การทอดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อนำผ้าที่ทอเสร็จแล้วไปทำการฟอกย้อม แป้งที่เคลือบบนเส้นด้ายจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการกำจัดออกไป

1.3 การขจัดสิ่งสกปรก

การขจัดสิ่งสกปรก คือการกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารประกอบพวกเกลืออินทรีย์และอนินทรีย์ ขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งเจือปนติดมาด้วยเสมอ ไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ติดมาตามธรรมชาติ หรือสิ่งที่ติดมาในขั้นตอนการทอ สิ่งเจือปนเหล่านี้จำเป็นต้องกำจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดีและสามารถดูดติดสีและสารเคมีได้สม่ำเสมอ กรรมวิธีการกำจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดมีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรกในเส้นใยแต่ละชนิด

1.4 การชุบมัน

เป็นกระบวนการนำผ้าที่ถูกจึงให้ดึงผ่านลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผ้าที่ได้ นอกจากจะสามารถดูดซับน้ำและสีย้อมได้ดีขึ้น ยังมีความเงามันและมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยการชุบมันผ่านนิยมนำมาใช้กับผ้าฝ้ายและผ้าเส้นใยผสม เช่น เส้นใยฝ้ายผสมกับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1.5 การย้อมสี

กรรมวิธีในการย้อมผ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การย้อมในหม้อย้อมแบบครั้งคราว และย้อมแบบต่อเนื่องในเครื่องย้อม การย้อมแบบครั้งคราวนั้นให้ปริมาณน้ำเสียน้อย แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนเครื่องย้อมแบบต่อเนื่องให้ผลตรงกันข้าม เนื่องจากกรรมวิธีการย้อมแต่ละแบบมีความแตกต่างกันทางด้านตัวสีย้อม สารช่วยย้อม และความสามารถติดสีบนเนื้อผ้า เป็นต้น จึงทำให้มีปริมาณสารมลพิษที่ติดมากับน้ำย้อมแตกต่างกัน การย้อมที่มีประสิทธิภาพ คือการย้อมให้ผ้ามีสีสม่ำเสมอเท่ากันตลอด สีย้อมต้องติดเส้นใยถึงภายในและต้องทนทานต่อการซักล้างไม่หลุดออกโดยง่าย

1.6 การตกแต่งสำเร็จ

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ สามารถจำแนกประเภทการตกแต่งสำเร็จเป็น 2 ประเภทได้แก่

1.6.1 การตกแต่งด้วยวิธีเชิงกล (mechanical finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอโดยใช้เครื่องจักรในการผลิตทำให้สิ่งทอมีคุณภาพตามต้องการ

1.6.2 การตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี (chemical finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอด้วยสารเคมี เพื่อให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามต้องการ สารเคมีที่ใช้มีทั้งที่เป็นสารจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์

2. น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

2.1 แหล่งที่มาของน้ำทิ้ง

สภาพการเกิดและการระบายน้ำทิ้งเริ่มจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดในการระบายน้ำทิ้งลงสู่รางระบายน้ำภายในโรงงาน ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ 5 แหล่งคือ

2.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำทิ้งภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง และน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำทิ้งจากขั้นตอนฟอกย้อม

2.1.2 น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม มักอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ และไอน้ำยังใช้เป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำ ก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนกับสารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเพิ่มปริมาณของสารละลายสีย้อมและจะรวมเป็นน้ำทิ้งที่มีความสกปรกมากที่สุด

2.1.3 น้ำที่หล่อเย็นในกระบวนการฟอกย้อม เป็นขั้นตอนที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิสารละลายสีย้อมลงภายในระยะเวลาอันสั้น ทำได้โดยการปรับอุณหภูมิด้วยน้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นน้ำสะอาดและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่

2.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน น้ำในส่วนนี้เป็นน้ำทิ้งส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ในบางกรณีพบว่าเป็นน้ำทิ้งที่มีความสกปรกสูงมาก เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

2.1.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ นอกจากน้ำทิ้งจากแหล่งต่างๆ ข้างต้น โรงงานฟอกย้อมสิ่งทออาจมีน้ำทิ้งจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

2.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำ

2.2.1 สีย้อม การย้อมเส้นใยมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2.2.2 สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ สารเคมีที่ใช้มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

(1) สารช่วยย้อม ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก สารช่วยเปียก และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีสม่ำเสมอ

(2) สารเคมีพื้นฐาน เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

(3) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา ซึ่งสารเคมีต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยออกมาปะปนในน้ำทิ้ง

2.2.3 สิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้ง วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากนัก โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยสัตว์มีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไป

ในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งจี๊ฟ ไขมัน โปรตีน โลหะหนัก ต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตก็ยังมีการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวก สารหล่อลื่น และแป้ง เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอน การเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อม และจะแขวนลอยอยู่ในน้ำทิ้งจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

2.2.4 เศษเส้นใย น้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (oligomers) ที่หลุดออกมา จากเส้นใยและมีการปะปนในน้ำทิ้งด้วย (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

2.2.5 โลหะหนัก เนื่องจากสารโลหะหนักมีคุณสมบัติในการให้ความสาคับกับสีของสิ่งทอ ดังนั้นจึงมีการเติมสารโลหะหนัก เช่น โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี พรอท โคบอลท์ ลงไป ในสีย้อม อีกทั้งยังใช้เป็นสารออกซิไดซ์ พบว่าปริมาณและชนิดของโลหะหนักที่พบขึ้นอยู่กับ เคมิกัลของของแต่ละบริษัทซึ่งแต่ละบริษัทจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน (เข้มชัย และคณะ, 2541)

2.2.6 สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้าซึ่งเป็น สารประเภทคลอรีเนตเบนซีน (chlorinated benzene) สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่อง เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งในภายหลัง

2.3 ลักษณะและปริมาณน้ำทิ้ง

ลักษณะน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป

2.3.1 มีปริมาณสารอินทรีย์สูง สาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิดิก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปน ออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมันซึ่งจะ เป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำทิ้งมักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดี ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.2 มีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัม/ลิตร สารที่ทำให้ น้ำทิ้ง

ฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (scouring)

2.3.3 อุณหภูมิสูงโดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียสโดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

2.3.4 ปริมาณของแข็ง (total solids) สูง ส่วนใหญ่เป็นสารละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียม

2.3.5 ความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้ง ในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2.3.6 โลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

2.3.7 ปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solids) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำทิ้งในเครื่องย้อมได้

2.3.8 การปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำทิ้ง

อุตสาหกรรมฟอกย้อมและตกแต่งนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมอื่นๆ พบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยน้ำทิ้งเหล่านี้มีสีเปลี่ยนไปตลอดเวลาขึ้นอยู่กับสีย้อมที่ใช้ในขณะนั้น ซึ่งสามารถสรุปปริมาณน้ำที่ใช้น กระบวนการผลิตตลอดจนลักษณะน้ำทิ้งที่เกิดจากกิจกรรมฟอกย้อม ได้ดังตารางที่ 1 ถ้าวิเคราะห์เหล่านี้เป็นผลจากการสำรวจในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งอาจนำมาใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหา น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้น้ำและลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมแต่ละประเภท

ประเภทโรงงาน	รายการวิเคราะห์							
	การใช้น้ำ	BOD	COD	TSS	O&G	Phenol	Sulfie	Color
	(l/kg)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(µl)	(µl)	APHA Unit
1. Wool scouring	11.7	2300	7000	3300	600	ND	500	2200
2. Wool finishing	284	170	600	60	ND	120	3500	1500
3. Low water use	9.2	290	690	180	80	ND	ND	10
4. Knit fabric finishing	78.4	270	900	60	70	50	70	800
a. Simple processing	86.7	350	110	110	50	50	100	1400
b. Complex processing	113	420	1240	150	70	150	1700	1900
c. Hosiery products	136	210	870	50	80	110	55	400
5. Carpet finishing	83.4	270	790	60	50	100	150	750
6. Stock and yarn finishing	69.2	320	1370	80	100	60	560	450
7. Nonwoven manufacturing	46.7	440	1190	70	20	130	175	490
8. Felted fabric processing	100	180	680	40	20	170	200	570
	40	180	2360	80	60	40	ND	90
	213	200	550	120	30	580	1200	200

หมายเหตุ: ND ไม่มีข้อมูล

ที่มา: สมาคมอุตสาหกรรมฟอกย้อมและตกแต่งสิ่งทอไทย (1998)

2.4 การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากการย้อม

น้ำทิ้งจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะมีสีย้อมและสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเจือปน และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้งซึ่งก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป จากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ได้กำหนดสีของน้ำทิ้งที่ยอมรับได้ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำชุมชน จะต้องผ่านระบบบำบัดเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างสำหรับวิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้

2.4.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง มักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดด่าง ซึ่งถือเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม ทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ตะกอนของสีเกิดการจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งมี pH เป็นกลาง จากนั้นจึงปล่อยลงสู่แหล่งน้ำชุมชน

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งมีลักษณะและสมบัติที่แตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีเอซิด รีแอคทีฟ การตกตะกอนสีโดยใช้สารส้มไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยเพื่อให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ในการใช้ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.4.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ทำหน้าที่ในการดูดซับสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้ปริมาณสีในน้ำทิ้งลดลงแบ่งกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาออกเป็นสองระบบ คือ

(1) ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง ให้มีค่าความสกปรกลดลง

(2) ระบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) ดัดแปลงจากการบำบัดน้ำทิ้งแบบที่มีอากาศ และไม่มีอากาศร่วมกันโดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งมีความ

ต่างเพียงขนาดของบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่โดยขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

(3) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) การดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายสามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1,200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ส่งผลให้ pH ของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นต้องมีการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง การกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยากต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เนื่องจากต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากเป็นกระบวนการที่เสียค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการปรับ pH ก่อนปล่อยน้ำทิ้งสู่แหล่งน้ำชุมชน ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

(4) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (ozone treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่มีการใช้งานน้อยในปัจจุบัน แต่เทคนิคดังกล่าวอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น กระบวนการการโอโซนชั้น (ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมส่วนใหญ่ประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้น

(5) เทคโนโลยีเมมเบรน (membrane technology) กระบวนการกำจัดสีด้วยเมมเบรน (membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี เพื่อนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

(5.1) ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีย้อมกระจาย (disperse dyes) ที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes) สีย้อมแวต (vat dyes) และสีย้อมอะโซอิก (azoic dyes) ที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายและวิสคอส (viscose) สีย้อมคิสเพิร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

(5.2) ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) เหมาะสำหรับการใช้กำจัดไอออนสีย้อมและโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่เป็นกระบวนการที่น้ำที่จำเป็นต้องผ่านเมมเบรน 2 ขั้นตอน คือ เมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (brackish water) เมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (sea water) ซึ่งเมมเบรนแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเมมเบรนที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

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

(6) นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีย้อมแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีย้อมแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้

(7) เทคโนโลยีอื่นๆ ที่มีการพัฒนาดีขึ้น ปัจจุบันมีเทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกัน คือ เพื่อลดปริมาณการตกค้าง

(7.1) ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์ซึ่งมีการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น และนิยมนำมาใช้ในโรงงาน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกัน ดังนั้นเทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

(7.2) ระบบที่พัฒนาจากพื้นฐานของกระบวนการอิเล็กโตรไลซิสอยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา เนื่องจากในการบำบัดใช้พลังงานสูง และบางครั้งคลอรีนและไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้

วิธีการบำบัดสีในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมอาจใช้วิธีหนึ่งใดดังกล่าวหรืออาจใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีได้อย่างเหมาะสม จำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภท (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

3. สีย้อม

3.1 คำนิยามศัพท์

สีย้อม (dyestuffs) หมายถึง สารให้สีที่สามารถจับติดวัสดุด้วยตัวเองหรือด้วยการชักนำโดยปฏิกิริยาในกระบวนการย้อมหรือกระบวนการพิมพ์ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [มอก.], 2530)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีนโทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ

สีข้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ สีข้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การนำสีข้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมียมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสภาวะที่โมเลกุลของสีข้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น

อิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals' force) แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีข้อม กับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้องประกอบด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์

การเกิดสีของสีข้อม เป็นการปรากฏของสีทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็น เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีข้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่าโครโมฟอร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือกลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) กลุ่มไนโตร (nitro group) กลุ่มเอโซ (azo group) กลุ่มเอธิลีน (ethylene group) กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group) กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group) กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้เป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีไว้มากแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีข้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป (ธงชัย, 2527)

3.2 การจำแนกสีข้อม

สีข้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีมากมายหลายชนิด ตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อม สีข้อมอาจจำแนกได้หลายประเภท ตามลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งออกเป็นสารสีละลายน้ำได้และสารสีไม่ละลายน้ำ หรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมีซึ่งวิธีนี้ยุ่งยากต้องอาศัยความรู้ทางเคมี และสูตรโครงสร้างของสีด้วย วิธีจำแนกสีข้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่าย ได้แก่ การจำแนกสีข้อมตามการใช้งาน ซึ่งแบ่งสีข้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภท คือ

3.2.1 สีคิตเพิร์ส (disperse dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียด ละลายอยู่ในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจาย (dispersing agent) ที่เหมาะสม จะสามารถย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วย นอกจากสารพา (carrier) บางชนิดที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

สีคิตเพิร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากหมู่เคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีเอโซ (azo dyes) และสีย้อม amino anthraquinone ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มนี้ปกติจะประกอบด้วยอนุพันธ์ของ ethanolamine – $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

3.2.2 สีเอซิด (azid dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และโพลีเอสเตอร์ ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน

3.2.3 สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งหนึ่งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่าคัปลิง (coupling)

3.2.4 สีย้อมเบสิก (basic dyes)

ใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (chromophore)

ให้แคตไอออนทำให้เรียกสั้นว่า สีแคตไอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสี ย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

3.2.5 สีย้อมไคเรกต์ (direct dyes)

บางครั้งเรียกว่าสีย้อมฝ้าย เนื่องจากเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรก ที่สามารถ ย้อมติดฝ้ายได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันจะใช้เกลือเข้าช่วย เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเฮโซที่มีน้ำหนัก โมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ (กาวิ, 2545)

สีย้อมนี้ให้คุณสมบัติในการย้อมคงทน ตลอดจนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสี ที่คงทนดีโครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิตและราคาจำหน่ายย้อมสูงขึ้นด้วย

3.2.6 สีย้อมเมอร์แคนท์ (merdant dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีย้อมเฮลิค ที่สามารถก่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ และจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำได้ ดีกว่าไม่ย้อมทับ

3.2.7 สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยเฉพาะ ราคาค่อนข้างถูกแต่สีย้อมไม่สดใส ตามปกติแล้วตัวสีย้อม ชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ช่วยใน การละลายน้ำได้ดีขึ้น สีย้อมชนิดนี้ได้ชื่อว่าสีซัลเฟอร์เพราะสารที่นำมารีดิวซ์เป็นสารละลายของ โซเดียมซัลไฟด์ และโครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ ประกอบด้วยกลุ่มซัลโฟนิล (sulfonic group) เมื่อสีย้อมละลายในน้ำแล้ว จะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใย และสามารถทำให้ยึดติดกับ เส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดส์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยา กับอากาศ

3.2.8 สีย้อมแวต (vat dyes)

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

3.2.9 สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

นิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสารสีที่สามารถทำให้ละลายน้ำได้ รูปแบบการย้อมค่านึกคล้ายกับสีแควต คือต้องทำให้ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมไม่ละลายน้ำด้วยการออกซิไดซ์กลับคืน (วิไลพร, 2536)

3.2.10 สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dyes)

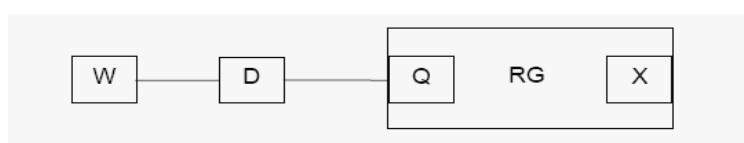
ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายน้ำได้คุณสมบัติเป็นแอนไอออน อยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สมบัติการละลายและดูดซับเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีแทรกเข้าไปอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดกับเส้นใย

สีรีแอคทีฟ เป็นสีที่นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม สีชนิดนี้ก็มีการนำมาใช้ย้อมไหมด้วย สีรีแอคทีฟสามารถละลายน้ำได้ดี มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออน มีกลุ่มที่มีความสามารถในการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอม โมเลกุลคาร์บอน กับอะตอมออกซิเจนของกลุ่มไฮดรอกซิล และอะตอมไนโตรเจนของหมู่อะมิโนของเส้นใย ตามลำดับ สีรีแอคทีฟเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยา

กับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์จะกลายเป็นสารประกอบชนิดใหม่ มีสมบัติการละลายและดูดซับสี จะทำให้สีเข้าไปอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยา ตัวสีจะติดกับเส้นใย โดยพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นกับกลุ่มไฮดรอกซิล จะพบในกลุ่มเส้นใยเซลลูโลส (Cellulosic fiber) พันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นกับกลุ่มอะมิโน จะพบในกลุ่มพอลิเอไมด์ (Polyamide) และพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นกับทุกหมู่ฟังก์ชันจะพบในเส้นใยโปรตีน [Protein fiber] (อัจฉราพร, 2527)

ลักษณะโครงสร้างของสีรีแอกทีฟ จะประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 5 กลุ่ม (ภาพที่ 2)

คือ



ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟ

ที่มา: Zollinger (2003)

W (Water Solubilizing Group) คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำโดยทั่วไป จะเป็นพวกซัลโฟนิค สีนีใช้สำหรับเส้นใยเซลลูโลสหรือเส้นใยโปรตีน จะต้องมียกลุ่มซัลโฟนิคเป็นองค์ประกอบอยู่ 1-4 กลุ่ม

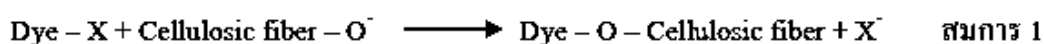
D (Chromophore) คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสำหรับสีเหลือง สีส้ม และสีแดง กลุ่มโครโมฟอร์ คือ Metal-free-manoazodyes สำหรับสีม่วง สีทับทิม และสีน้ำทะเล กลุ่มโครโมฟอร์ คือ Anthraquinone derivative based on Bromide Acid รวมทั้ง Phthalocyanine derivatives, Formazan Cu-Complexes และ Tri-Phenodioxazines (Zollinger, 2003)

Q (Bridge link) คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟ (RG) กับกลุ่มโครโมฟอร์ (D) เช่น $-NH-$, $-NHCO-$, $-SO_2-$, $-NH SO_2-$, $-N(CH_3)-$ เป็นต้น

X (Nucleofugic leaving group) เป็นกลุ่มที่สามารถเกิดเป็นไอออน หรือโมเลกุลที่เสถียรภายหลังจากเกิดการแยกตัว [dissociation] (Zollinger, 2003) RG (Reactive group) คือ กลุ่มที่

ทำให้สีทำปฏิกิริยากับเส้นใย สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตามกลไกการเกิดปฏิกิริยา (mechanism) ได้ดังนี้

1. กลุ่มที่ทำปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution โดยภายใต้สภาวะต่าง Nucleophilic functional group (HY) ของเส้นใยจะเกาะติดกับกลุ่มรีแอคทีฟ จากนั้นจะกำจัด Nucleophilic leaving group (X) ของสีออก (สมการ 1) โดย HY จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยว่าเป็นชนิดใด



2. กลุ่มที่ทำปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic addition ภายใต้สภาวะต่างจะเกิดการกำจัด Nucleofugic leaving group และสลายพันธะคู่ของคาร์บอน จากนั้น Nucleophilic functional group ของเส้นใยจึงเข้าไปทำพันธะด้วย (ภาพที่ 3 และ 4)



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic addition

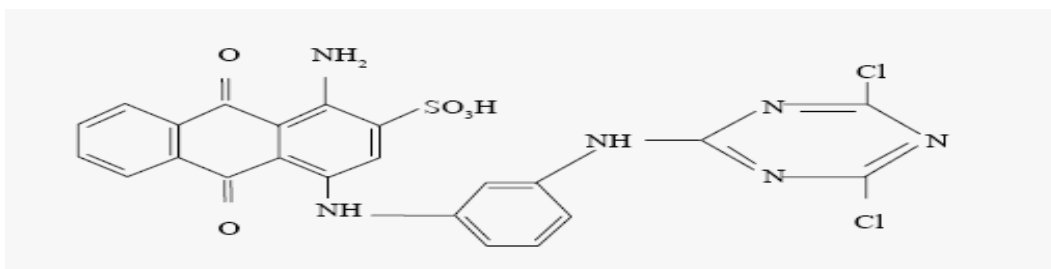
ที่มา: Abraham and Freeman (1996)



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาที่เกิดกับเซลลูโลส

ที่มา: Abraham and Freeman (1996)

สีรีแอคทีฟ เป็นสีที่สามารถซึมกระจายเข้าสู่เส้นใยได้เร็ว มีคุณสมบัติเป็นประจุลบ(anion) เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ปฏิริยาการย้อมสีจะเกิดขึ้นได้ดีและเหมาะสม เมื่อมีการใช้ปริมาณเกลือมากในกระบวนการย้อมสี โดยทั่วไปนิยมเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อปรับสภาพน้ำย้อมให้เป็นด่าง ทำให้มีความเหมาะสมสำหรับการย้อมของสีรีแอคทีฟ นอกจากนี้ยังมีกระบวนการหลังการย้อม คือต้มด้วยน้ำสบู่เพื่อล้างสีส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับเส้นใยออกให้หมด จึงจะทำให้สีย้อมที่ได้อ่อนกว่าความจริงตามคุณสมบัติของสีชนิดนั้น ดังนั้นถ้าต้องการให้สีรีแอคทีฟมีความคงทนต่อการซัก จะต้องทำให้น้ำย้อมมีสภาพเป็นด่าง (อัจฉราพร, 2527) เมื่อพิจารณากรรมวิธีการย้อมสีรีแอคทีฟแล้ว จะเห็นว่าการย้อมสีแบบนี้ นอกจากน้ำย้อมที่เหลือจากการย้อมซึ่งมีสีปนเปื้อนอยู่แล้ว พบว่ามีน้ำสบู่ที่ใช้ล้างซึ่งจะมีสีย้อมปนเปื้อนอีกด้วย ทำให้น้ำทิ้งจากการย้อมสีชนิดนี้ มีปริมาณสีย้อมในน้ำทิ้งอยู่ในปริมาณมาก และจากการใช้เวลานานในการล้างสีย้อมส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับเส้นใยออก เพื่อให้มีความคงทนต่อการซักและใช้งานได้ดียิ่งขึ้น แต่ไม่มีความคงทนต่อแสงแดดและคลอรีน จึงทำให้สีชนิดนี้ไม่สามารถรองความเป็นหนึ่งในตลาดสีย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ ตัวอย่างสีรีแอคทีฟ ได้แก่ C.I.Reactive Blue 4 ซึ่งเป็นสีประเภทแอนธราควิโนน (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลสีรีแอคทีฟ C.I. Reactive Blue 4

ที่มา: Abraham and Freeman (1996)

3.3 ความเป็นพิษของสีย้อมและภาวะมลพิษจากสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือทางจมูกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหารโดยปนเข้าไปกับอาหารการกิน แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าสารวัตถุพิษที่ใช้ในการ

สังเคราะห์สีช้อม มีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น 2-naphthylamine และ benzidine

ผลกระทบของสีช้อมต่อสิ่งแวดล้อม หรือสมบัติด้านมลพิษของสีช้อมนั้น พบว่าสีช้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีช้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีช้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจากสีช้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

ปัญหาที่เกิดจากสีช้อมในน้ำทิ้งจากโรงงาน จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลงเนื่องจากสีช้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช และความเป็นพิษของตัวสีช้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็งตลอดจนก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ ซึ่งปัญหาทั้งหมดที่กล่าวมาส่งผลให้สถานะของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

4. ดักแด้ไหม

4.1 ชีวิตวิทยาของไหม

ไหมเป็นแมลงชนิดหนึ่งอยู่ใน Phylum Arthropoda มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในขณะที่กำลังเจริญเติบโต โดยแบ่งเป็น 4 ระยะคือ ไข่ ตัวหนอน ดักแด้ และตัวเต็มวัยหรือผีเสื้อไหมอยู่ในวงศ์ Bombycidae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* ซึ่งในระยะตัวหนอนจะกินใบหม่อนเป็นอาหาร ตัวหนอนระยะสุดท้ายจะพ่นเส้นใยเพื่อทำรังห่อหุ้มตัวเองแล้วลอกคราบกลายเป็นดักแด้อยู่ภายในรัง รังไหมสามารถนำไปสาวได้เป็นเส้นใยไหมที่มีคุณค่าสูงทางเศรษฐกิจ นอกจากไหมหม่อนยังมีไหมอีกถึง 8 ชนิดที่ให้เส้นใยไหมเช่นเดียวกัน เรียกกันทั่วไปว่าไหมป่าแต่มีเพียง 3 ชนิดที่มนุษย์นำมาเลี้ยงคือ ไหมทาร์ซา ไหมมูก้า และไหมอิตาลี (*Philosamia ricini*)

ไหมหม่อน *Bombyx mori* นับเป็นไหมที่เลี้ยงกันมากที่สุด ชีพจักรของไหมหม่อนแบ่งเป็น 4 ระยะ (หม่อน-ไหม, 2523) คือ

4.1.1 ระยะไข่ (eggs) ใช้เวลาแตกต่างกันไปตามพันธุ์ ไหมที่ฟักออกตามธรรมชาติหลายครั้งต่อปี (polyvoltine) จะใช้ช่วงเวลาจากแม่ไหมวางไข่จนตัวหนอนฟัก 9-12 วัน แต่ไหมที่ฟักออกตามธรรมชาติ 1-2 ครั้งในรอบปี (uni or bivoltine) จะใช้เวลาในระยะไข่ประมาณ 4-10 เดือน

4.1.2 ระยะตัวหนอน (larvae) เป็นระยะที่ใช้เวลามากที่สุดในชีวิตของไหม มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและน้ำหนักมากที่สุด กล่าวคือหนอนไหมโตเต็มที่จะมีน้ำหนักเป็น 1,000 เท่าของไหมที่ฟักตัวออกจากไข่ หนอนไหมจะใช้เวลาส่วนใหญ่กินอาหารและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไหมเป็นสัตว์ที่มีโครงกระดูกอยู่ภายนอก ตัวหนอนไหมจึงต้องลอกคราบเพื่อขยายขนาดลำตัวขึ้นแล้วสร้างกระดูกหุ้มตัวใหม่ หนอนไหมจึงมีการลอกคราบเป็นระยะๆ โดยทั่วไปจะมีการลอกคราบ 4 ครั้งคือ

(1) หนอนไหมวัย 1 เป็นไหมที่ฟักออกจากไข่จะมีลำตัวเป็นสีดำหรือสีน้ำตาลไหม้ มีขนปกคลุมอย่างหนาแน่น ขนจะค่อยๆ บางลงเนื่องจากผิวหนังมีการขยายตัว หนอนไหมวัยนี้จะกินอาหารเต็มที่ประมาณ 3-4 วัน แล้วหยุดกินอาหารและนอนประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อเตรียมตัวลอกคราบ

(2) หนอนไหมวัย 2 จะกินใบหม่อน 2-3 วัน นอน 24 ชั่วโมงแล้วลอกคราบ

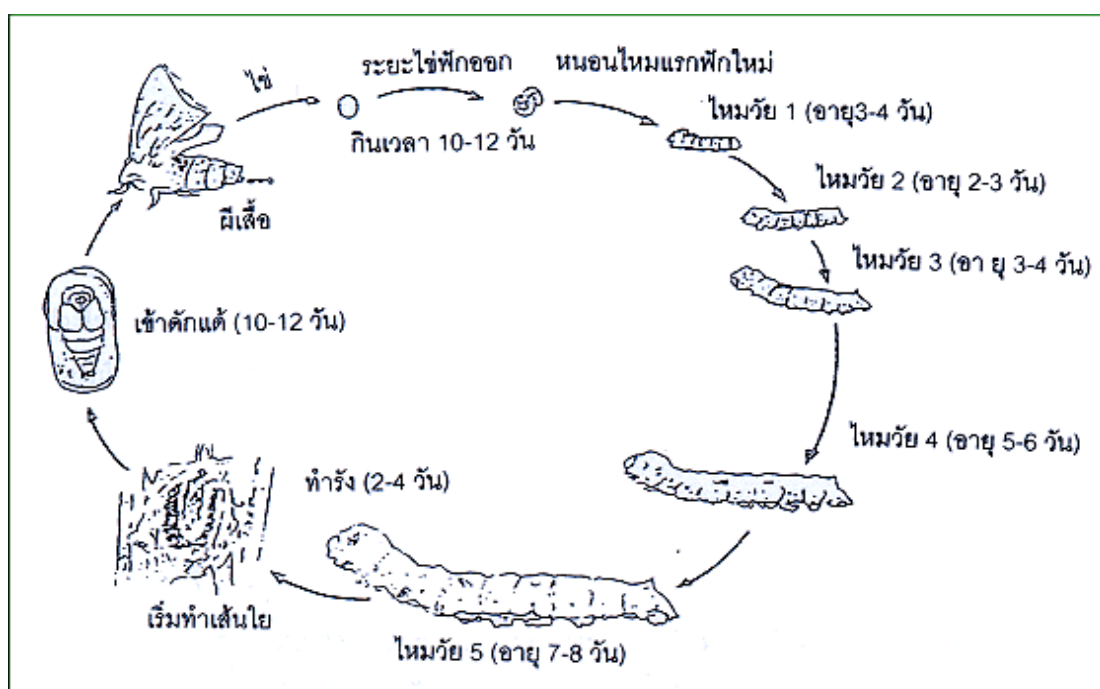
(3) หนอนไหมวัย 3 จะกินใบหม่อน 3-4 วัน นอน 24 ชั่วโมง แล้วลอกคราบเป็นวัย 4 ช่วงวัยที่ 1-3 นี้เรียกว่า ไหมวัยอ่อน

(4) หนอนวัย 4 จะกินใบหม่อน 3-4 วัน นอน 24 ชั่วโมง แล้วลอกคราบ

(5) หนอนไหมวัย 5 จะกินใบหม่อน 6-8 วัน ในระยะปลายของวัย 5 ไหมจะหยุดกินอาหาร ลำตัวค่อนข้างโปร่งแสง และคลานหาสถานที่เหมาะสมต่อการทำรัง ในระยะนี้เรียกว่าไหมสุก ช่วงเวลาจากระยะฟักตัวออกจากไข่จนถึงระยะไหมสุก จะใช้เวลา 20-25 วัน ในตอนแรกเส้นใยที่คายออกมาทำรังจะเป็นตัวยึดไหมติดกับที่ทำรัง หลังจากนั้นไหมจะเริ่มทำรังส่วนใน ซึ่งถือว่าเป็นรังแท้ ไหมจะทำรังเสร็จภายใน 2-3 วัน เมื่อทำรังเสร็จแล้วอีก 1-2 วัน หนอนไหมจะลอกคราบกลายเป็นดักแด้อยู่ภายในรัง

4.1.3 ระยะดักแด้ (pupae) หลังจากที่หนอนไหมวัยที่ 5 ลอกคราบเปลี่ยนเป็นดักแด้อยู่ภายในรัง ดักแด้จะอยู่ในรังประมาณ 6-7 วัน แล้วจึงลอกคราบดักแด้ออกอีกครั้ง กลายเป็นผีเสื้อตัวเต็มวัย

4.1.4 ระยะผีเสื้อ (moth) จะเป็นผีเสื้อประเภทผีเสื้อกลางคืนเมื่อดักแด้ลอกคราบกลายเป็นผีเสื้ออยู่ภายในรังแล้ว ผีเสื้อจะพ่นน้ำลายซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง เพื่อละลายรังไหมแล้วดันตัวตัวเองออกสู่ภายนอก หลังจากออกจากรังแล้วจะเกาะพักอยู่ระยะสั้นๆ ตัวของผีเสื้อจะแห้ง ปีกจะกางออกพร้อมที่จะทำการผสมพันธุ์และวางไข่ต่อไป ผีเสื้อจะไม่กินอาหารและจะมีชีวิตอยู่ประมาณ 7-9 วันแล้วก็ตาย



ภาพที่ 6 วัฏจักรชีวิตของดักแด้ไหม

ที่มา: สถาบันวิจัยหม่อนไหม (2541)

4.2 ปริมาณดักแด้ไหม

ประเทศไทยมีการเลี้ยงไหมอยู่ทุกภาค แต่แหล่งผลิตที่สำคัญคือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และบางจังหวัดของภาคเหนือ จากรายงานของสถาบันวิจัยหม่อนไหม (2536) พบว่าในปี 2535 ประเทศไทยสามารถผลิตเส้นไหมได้ทั้งหมด 1,581.47 ตัน อมรรัตน์ (2519) ได้รายงานถึงน้ำหนักตัวดักแด้ไหมลูกผสม (รังสีเหลือง) ว่าในรังไหมแห่ง 1 กิโลกรัมจะเป็นน้ำหนักดักแด้ 755 กรัม ซึ่งคำนวณเป็นอัตราส่วนน้ำหนักดักแด้ต่อน้ำหนักรังไหม 3 ต่อ 1

จากอัตราส่วนข้างต้นเมื่อนำมาคำนวณปริมาณดักแด้ไหมพบว่ามีประมาณ 4,744.41 ตันต่อปี ซึ่งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปีเนื่องจากอาชีพการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมขณะนี้ได้รับการส่งเสริมจากรัฐบาลและทุนช่วยเหลือจากต่างประเทศ เพราะปริมาณไหมเส้นที่ผลิตในประเทศยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2546) กำหนดเป้าหมายการผลิตเส้นไหมในปี 2547 ไว้ประมาณ 1,500.00 ตัน หากสามารถผลิตเส้นไหมได้ตามเป้าหมายจะส่งผลให้ปริมาณดักแด้ไหมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเป็นเช่นนี้คาดว่าปริมาณดักแด้ไหมจะมีไม่น้อยกว่า 4,500.00 ตันต่อปี

4.3 องค์ประกอบดักแด้ไหม

บุญเลิศ (2537) กล่าวว่า องค์ประกอบภายในดักแด้ไหมมีโปรตีน ไขมัน และวิตามินบางชนิด (ตารางที่ 2) โดยมีโปรตีนคิดเป็นร้อยละ 60-62 ขณะที่ อมรรัตน์ (2519) รายงานว่าดักแด้ไหมมีโปรตีนคิดเป็นร้อยละ 51-63 และไขมันคิดเป็นร้อยละ 20-29 สำหรับชนิดและปริมาณกรดอะมิโนของโปรตีนจากดักแด้ไหมแสดงใน (ตารางที่ 3) สมโภชน์ (2535) รายงานว่าดักแด้ไหมซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิดเช่น phenylalanine, lysine, leucine, Isoleucine และ valine นอกจากนี้ Joachim (2000) รายงานว่า ดักแด้ไหมมีโปรตีนระหว่าง 49.4-60.9% และมีไขมัน 14.2-30.3% ของน้ำหนักแห้ง ขณะที่ Nandeesh et al. (1990) รายงานว่ามีโปรตีน 41% และมีไขมัน 18%

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของดักแด้ไหม

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	8.10
โปรตีน	60.60
ไขมัน	15.80
เยื่อใย	5.28
เถ้า	3.83
แคลเซียม	0.25

ที่มา: บุญเลิศ (2537)

ตารางที่ 3 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนของโปรตีนจากดักแด้ไหม

ชนิดกรดอะมิโน	ร้อยละ
Arginine	3.14
Threonine	2.16
Methionine	1.76
Valine	3.24
Isoleucine	2.30
Leucine	4.38
Phenylalanine	3.24
Lysine	3.76
Glycine	3.14

ที่มา: บุญเลิศ (2537)

4.4 ประโยชน์ดักแด้ไหม

ไหม้นจากดักแด้ไหมสามารถนำมาผลิตเป็นสบู่และเทียนไขที่มีคุณภาพสูง ส่วนตัวหนอนและดักแด้ไหมใช้เป็นอาหารของมนุษย์ได้ ชาวไทยที่เคยเลี้ยงไหมหรือสาวไหม รู้จักบริโภกดักแด้ไหมที่อยู่ใ้รังได้เป็นอย่างดี เมื่อต้มรังไหมและสาวไหมจนหมดเส้นใย นำมาลอกเปลือกชั้นนอกแล้วนำดักแด้สุกมาบริโภค ในปัจจุบันมีบริษัทอุตสาหกรรมของไทยส่งออกผลิตภัณฑ์ดักแด้ไหมกระป๋องไปจำหน่ายต่างประเทศ ตัวหนอนและดักแด้ไหมยังใช้เป็นอาหารสัตว์ เช่น ปลา กุ้ง และสัตว์น้ำอื่นๆ หรือเป็นอาหารเสริมผสมกับอาหารหลักของสัตว์เลี้ยงประเภทอื่นๆ เช่น นก ไก่ และหมู (วิโรจน์, 2540) นอกจากนี้ B. Noroozi *et al.* (2006) รายงานว่าดักแด้ไหมยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดสีย้อมเบสิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำทิ้ง การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมาโดยให้ตัวถูกดูดซับเมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว สามารถนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ (โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับหรือระหว่างหน้าสัมผัส (interface)) เช่น พื้นผิว

ระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

5.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

5.1.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

(1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

(2) การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ แทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

(3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ติดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

5.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุด

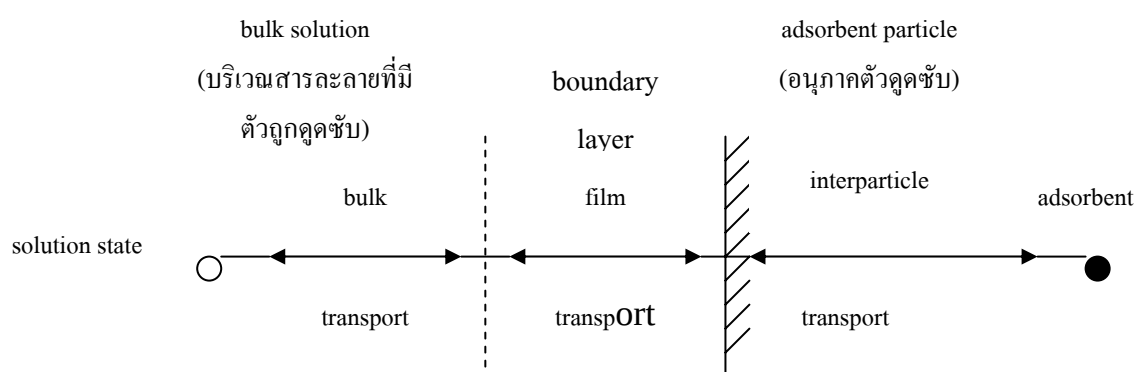
ในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

(1) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

(2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวชั้นตอนหนึ่ง

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

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

5.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

5.2.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับการดูดซับได้แก่แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกันโดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภทดังนี้

(1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ในขณะใดขณะหนึ่งกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วอย่างชั่วคราว (induced dipole) ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้น จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่ง จะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย โดยถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อนอิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกันสภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย

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

(3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน (dipole-dipole attraction)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะมีสภาพมีขั้วสูงโดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ $\text{Cl}-\text{Cl}$ ในโมเลกุลของคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล จากการศึกษาพบว่าความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือเกิดการคายสารออก (desorption) อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างถูกดูดซับและตัวดูดซับ

5.2.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (เป็นแรงดึงดูดระหว่างไอออนบวก (cation) กับไอออนลบ (anion) หรือพันธะโคเวเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันโดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน))

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

5.3 รูปแบบของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

5.3.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วย ในระหว่างชั้นอาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

5.3.2 การดูดซับทางเคมี

เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้น จากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมลและยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูด

ซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

(1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวตเตดซีลิคา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัมแต่สารสังเคราะห์อาจจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

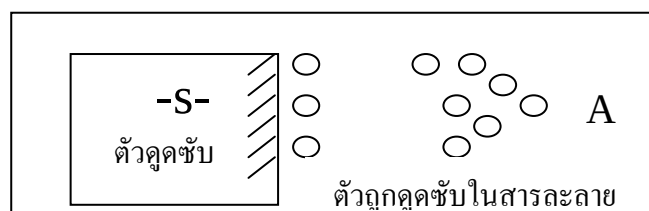
(2) ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

(3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

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

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

5.4 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 8 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

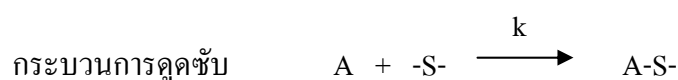
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ก่อนเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ ภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น $C_0 \text{ mol.L}^{-1}$ ในสารละลาย $-S-$ เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

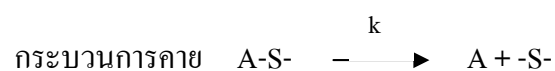
$(1 - q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

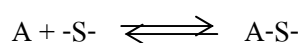
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

q = เป็นปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกละลายต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol.kg^{-1} mol.g^{-1} mg.kg^{-1}

W = เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg

V = เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกละลายละลายอยู่ หน่วยเป็น cm^3

หรือ 1

C = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น mol/l

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

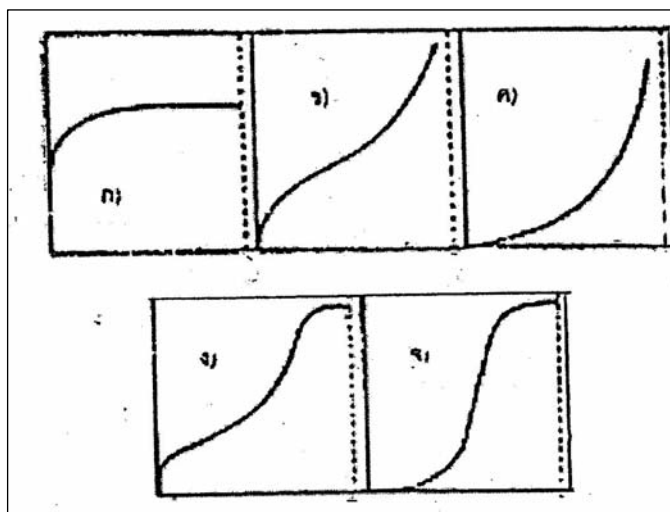
$$\begin{array}{ccc} \text{(ปริมาณตัวถูกละลาย} & = & \text{(ปริมาณตัวถูกละลายที่} \\ \text{บนพื้นผิวของตัวดูดซับ)} & & \text{หลุดออกมาจากตัวดูดซับ)} \end{array}$$

$$qW = V(C_0 - C) \quad \text{-----} \quad (3)$$

5.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

รูปแผนภูมิเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอน จะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 9 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

1) สมการการดูดซับของฟรุนลิช (freundlich adsorption isotherm) คือไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

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

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนลิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

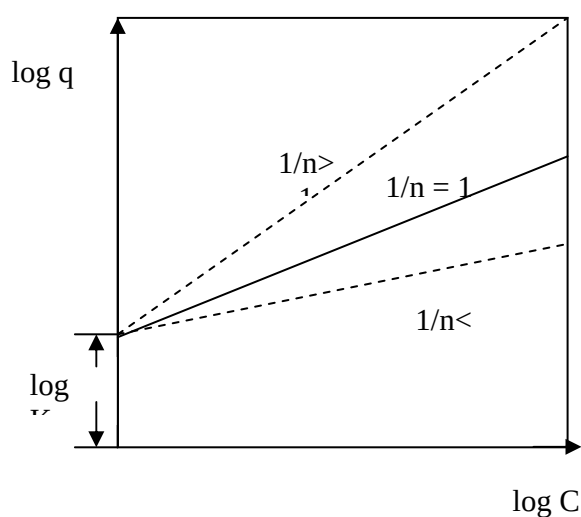
q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(ความสามารถการดูดซับ) (mg.g^{-1})

K = ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ = ความชันของกราฟ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

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



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

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

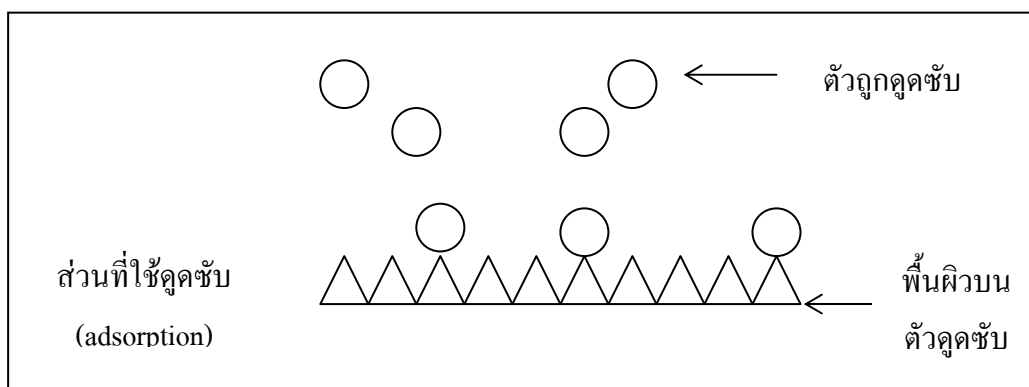
ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

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

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

เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (2) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด (adsorption maxima) เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้

2) สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) ได้มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ (ดังภาพที่ 10) โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด)



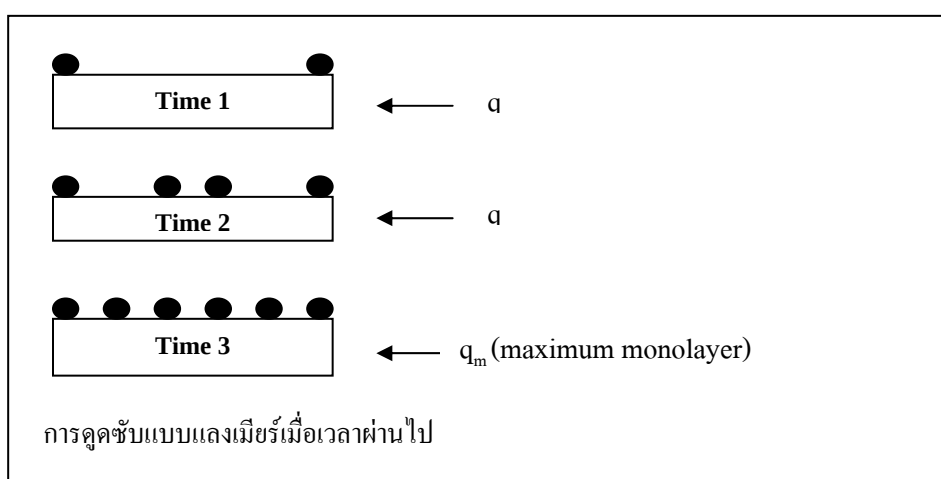
ภาพที่ 11 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ (5.4) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์

รูปแบบสมการของแลงเมียร์จะใช้

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



ภาพที่ 12 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

q = ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(ความสามารถการดูดซับ) (mg.g^{-1})

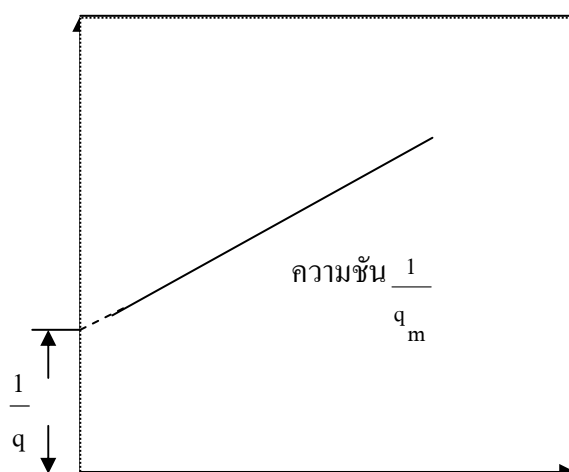
q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg.g^{-1})

K = ค่าคงที่การดูดซับ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg.L^{-1})

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้สมการเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{K q_m}$ และจุดตัด

เท่ากับ $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 13 กราฟแสดงความชันระหว่าง $1/q$ และ $1/c$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

5.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

5.6.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรูพรุนเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็ก หรือรูพรุนมีขนาดใหญ่แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็กไม่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่ม

5.6.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ พบว่า แนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มจะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

5.6.3 อัตราเร่งการปั่นกววน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งขึ้นกับการปั่นกววนของระบบ ถ้าการปั่นกววนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าการปั่นกววนสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว

5.6.4 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

5.6.5 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

6. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไป วิธีการทางชีวภาพถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวมีขีดจำกัดสำหรับการกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้ง จึงมีการประยุกต์ใช้วิธีการทางกายภาพและเคมีร่วมด้วย เช่น กระบวนการ adsorption, ion-exchange, foam fractionation, dynamic membrane hyperfiltration, gamma radiation, induced oxidation และ electrolytic treatment เป็นต้น (Metcalf et al., 1991) ในปี ค.ศ. 1978 Ghash และคณะศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งโรงงานทอผ้าโดยใช้วิธีการทางชีวภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ผลเป็นที่น่าพอใจระดับหนึ่ง ร่วมกับวิธีการทางกายภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon adsorption) ตามด้วยการตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสี ต่อมาในปี ค.ศ. 1992 Cheasavathi ทดลองใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับโพลีเมอร์ในการตกตะกอนเพื่อกำจัดสี ซีไอดี และแมงกานีสในน้ำทิ้งโรงงานฟอกยีนส์พบว่าการใช้วิธีการทางเคมีร่วมกับกายภาพสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดได้เป็นอย่างดี ในปี พ.ศ. 2546 อดิศักดิ์บำบัดน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่ง

ทอโดยวิธีการกรองด้วยทรายร่วมกับการดูดซับด้วยเถ้าแกลบดำ พบว่าระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงและสามารถลดค่าความขุ่น ของแข็งแขวนลอย สี ซีไอดี และค่าพีเอชได้ในช่วงร้อยละ 70.51-74.41, 61.42-65.92, 5.21-8.36, 30.62-34.20 และ 3.26-6.02 ตามลำดับ ในปี พ.ศ. 2547 กาญจนินาใช้จุลินทรีย์แบบเม็ดในสถานะที่ไม่ใช้อากาศ (biological azo dye reduction) ในการบำบัดสีย้อมกลุ่มเอโซ 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มก./ลิตร) ในน้ำทิ้งจากการฟอกย้อมเส้นไหม พบว่าระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงและสามารถกำจัดสีแดงได้ถึงร้อยละ 87.4 สีเหลืองได้ร้อยละ 72.4 และสีน้ำเงินได้ร้อยละ 85.0 เมื่อใช้จุลินทรีย์ที่ปริมาณ 1,000 มก./ลิตร และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์เป็น 2,000 มก./ลิตร จะสามารถกำจัดสีเอโซได้สูงขึ้นเล็กน้อยในระดับร้อยละ 92.5, 83.8 และ 78.6 สำหรับสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ตามลำดับ

นอกจากนี้ ยังอาจใช้วิธีการทางกายภาพหรือทางเคมีเพียงอย่างเดียวในการบำบัดสีในน้ำทิ้ง ตัวอย่างเช่น ในปี ค.ศ. 1988 Chang และคณะใช้สารส้ม (Alum) ความเข้มข้น 1,000 มก./ลิตร ในการตกตะกอนสีและมลสารอื่นๆ ที่ pH 5.5 พบว่าสามารถลดสีได้ร้อยละ 92 ลดค่าซีไอดีได้ร้อยละ 72 ลดแคลเมียมได้ร้อยละ 80 และลดโครเมียมได้ร้อยละ 87 ในปี พ.ศ. 2539 วิวรรณศึกษาการบำบัดสีเบสิก สีแอซิด สีรีแอกทิฟ และสีไดเรกต์ในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้ายโดยวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และขี้เถ้าในถังกรอง พบว่าตัวดูดซับทั้งสองสามารถบำบัดสีทั้ง 4 ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยสีที่ถูกดูดซับได้ดีที่สุด ได้แก่ สีเบสิก สีแอซิด สีไดเรกต์ และสีรีแอกทิฟ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับสีและซีไอดีต่อน้ำหนัก พบว่าขี้เถ้ามีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ประมาณ 1.55-2.89 เท่า และ 1.39-2.44 เท่า ตามลำดับ อีกตัวอย่างหนึ่งที่ใช้ระบบการดูดซับ ได้แก่ อารยาและคณะ (2547) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากการย้อมผ้าโดยกระบวนการดูดซับด้วยเปลือกหอยเชอร์รี่และเปลือกหอยแครง พบว่าผงเปลือกหอยแครงขนาดละเอียดมีประสิทธิภาพการดูดซับสีสูงที่สุดและสามารถลดค่าสารแขวนลอยและปริมาณสารละลายน้ำทั้งหมดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ แต่ไม่สามารถลดค่าซีไอดีให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้จึงน่าจะประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดอื่นด้วย ในปี พ.ศ. 2544 วุฑฒินันท์ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมผ้ารีแอกทิฟ 2 ชนิด ได้แก่ สีรีแอกทิฟ เยลโล 17 และสีรีแอกทิฟบลู 19 โดยวิธีโฟโตออกซิเดชันด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสถานะที่เหมาะสมคือที่พีเอช 10 ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นสีย้อม 20 มก./ลิตร และสีย้อมผ้าที่มีโครงสร้างโมโนเอโซถูกกำจัดได้ดีกว่าสีย้อมที่มีโครงสร้างแบบแอนทราควิโนน นอกจากนี้ วีระพงศ์ (2548) ยังศึกษาการใช้กระบวนการโอโซน

ชั้นในการบำบัดสีในน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานสุรา พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่ค่าพีเอช 7.0 โอโซน 500 มก./ชม. และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 4 ชม. สามารถลดสี ซีไอดี และของแข็งทั้งหมด ได้ร้อยละ 69.91, 19.28 และ 35.57 ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. สารเคมีและอุปกรณ์

1.1 อุปกรณ์

1.1.1 ตู้อบ ร้อน OF-11E ยี่ห้อ JEIO TECH

1.1.2 เครื่องเคาะ

1.1.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

1.1.4 เครื่องกวนสารละลาย และแท่งแม่เหล็ก

1.1.5 เครื่องปั่นละเอียด

1.1.6 เครื่องแก้ว

1.1.7 กระดาษกรอง เบอร์ 1 ของ Whatman

1.1.8 เครื่องเขย่า ร้อน VRN-480

1.1.9 เครื่องวัด pH ร้อน 4/0 ยี่ห้อ THERMO ORI

1.1.10 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ร้อน V350

1.1.11 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป ร้อน 1455 VP ยี่ห้อ LEO

1.2 สารเคมี

1.2.1 สารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอกทีฟ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2.2 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์

1.2.3 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์

1.2.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์

2. วิธีการ

2.1 วิธีการเตรียมตัวดูดซับจากดักแด้ไหม

นำดักแด้ไหมมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียด นำไปร่อนให้มีขนาด 50-100 mesh จึงนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของดักแด้ไหมได้แก่ ไขมัน ความชื้น เถ้า และโปรตีน โดยวิธี total nitrogen โดยใช้ Modified Macro Kjeldahl Method (AOAC, 2000)

2.2 การเตรียมสารเคมี

2.2.1 สารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอกทีฟ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งผงสีย้อมรีแอกทีฟ 1 กรัม ละลายน้ำปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

2.2.2 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์

นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 209.03 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.2.3 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์

นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 8.36 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.2.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ใส่ปิกรเกอร์ 100 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.3 ศึกษาผลของค่า pH ในการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟด้วยตัวดูดซับผงดักแด้ไหม

2.3.1 ปิเปิดสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 5 มิลลิลิตร ใส่ปิกรเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรใกล้เคียง 100 มิลลิลิตร ปรับ pH ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้ปริมาณที่น้อยที่สุดให้ได้ค่า pH เป็น 3, 5, 7, 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ

2.3.2 นำสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่ปรับค่า pH แล้วข้างต้น เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.3 ชั่งตัวดูดซับผงดักแด้ไหม 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่เตรียมได้จากข้างต้น 50 มิลลิลิตร ลงไปจากนั้นทำการปั่นกวนด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.3.4 นำสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟจากข้างต้น มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เพื่อขจัดตัวดูดซับผงดักแด้ไหมออก แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยใช้ความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟแต่ละสี

2.3.5 คำนวณหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%) โดยใช้สูตร

$$\text{Dye removal (\%)} = [(C_0 - C) / C_0] * 100$$

C_0 = ความเข้มข้นของสีก่อนการบำบัด

C = ความเข้มข้นของสีหลังการบำบัด

2.3.6 นำผลการทดลองที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการดูดซับกับค่า pH

2.4 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหมต่อการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ

2.4.1 ปิ่ตสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ (ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) 500 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ที่เหมาะสมตามผลการทดลองที่ได้ข้างต้น ทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟโดยการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4.2 ชั่งตัวดูดซับผงดักแด้ไหมหนัก 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 กรัมตามลำดับ ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่เตรียมได้จากข้างต้น 50 มิลลิลิตร ลงไปจากนั้นนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.4.3 นำสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เพื่อจัดตัวดูดซับผงคักแค้ใหม่ จึงทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากสารละลาย

2.4.4 คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

2.4.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับปริมาณตัวดูดซับ

2.5 ศึกษาผลของระยะเวลาปั่นกวนต่อการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ

2.5.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ (ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) 500 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ที่เหมาะสม ทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ โดยการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ 19 เป็น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และสีรีแอกทีฟเรด 3 เป็น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5.2 ชั่งตัวดูดซับผงคักแค้ใหม่ตามปริมาณที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้างต้น เติมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่เตรียมจากข้างต้น 50 มิลลิลิตร ลงไปจากนั้นทำการปั่นกวนด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ

2.5.3 นำสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่เตรียมได้กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เพื่อจัดตัวดูดซับผงคักแค้ใหม่ จึงทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากสารละลาย

2.5.4 คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

2.5.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับเวลาในการปั่นกวน

2.6 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ

2.6.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ (ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) 500 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ที่เหมาะสม ทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟด้วยน้ำกลั่นได้ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ 19 เป็น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และสีรีแอกทีฟเรด 3 เป็น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6.2 ชั่งตัวดูดซับผงดักแด้ไหมตามปริมาณที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้างต้น เติมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ ที่เตรียมได้จากข้างต้น 50 มิลลิลิตร ลงไปทำการปั่นกวนด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ

2.6.3 นำสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ ที่เตรียมได้กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เพื่อขจัดตัวดูดซับผงดักแด้ไหม จึงทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากสารละลาย

2.6.4 คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

2.6.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับเวลาในการสัมผัส

2.7 ศึกษาความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ

2.7.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ (ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเป็น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH ไปยังจุดที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด

2.7.2 ชั่งตัวดูดซับผงดักแด้ไหมตามปริมาณที่เหมาะสมจากผลการทดลองข้างต้น เติมสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ ที่เตรียมได้จากข้างต้น 50 มิลลิลิตร ลงไปทำการปั่นกวนด้วยเครื่อง

เขย่าความเร็ว 200 รอบต่อนาทีตามระยะเวลาในการปั่นกวน และระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น

2.7.3 นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เพื่อจัดตัวดูดซับผงดักแดดใหม่ จึงทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากสารละลาย

2.7.4 คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

2.7.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้น

2.7.6 นำผลการทดลองที่ได้มาศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm (นิพนธ์ และคณะ, 2550)

2.8 ศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

2.8.1 เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

2.8.2 ศึกษาผลการบำบัดน้ำทิ้ง โดยใช้สภาวะที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดจากการทดลองข้างต้น

2.8.3 นำน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาทีเพื่อจัดตัวดูดซับผงดักแดดใหม่ แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

2.8.4 คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

2.8.5 ทำการวิเคราะห์ค่าสี และ COD ก่อนและหลังการบำบัด

2.9 การทดลองแต่ละขั้นตอนทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.10 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับผงดักแด้ไหม

นำตัวดูดซับผงดักแด้ไหมที่ผ่านการดูดซับสารละลายสีรีแอกทีฟแล้วไปศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพก่อนและหลังกระบวนการดูดซับ

2.11 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองหาปริมาณผงดักแด้ไหม โดยบรรจุผงดักแด้ไหมปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัม ลงในคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร และใช้สารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 และสีรีแอกทีฟเรด 3 ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 700 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชจากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 2.1 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกจนสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟไหลหมด แล้วนำสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของแต่ละสี จากนั้นนำมาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้สารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 และสีรีแอกทีฟเรด 3 ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 700 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับ pH จากระดับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดจากการทดลองในข้อ 2.1 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุผงดักแด้ไหม 50 กรัม ทำการทดลองหาอัตราการไหลของสีรีแอกทีฟทั้ง 2 สี และเก็บตัวอย่างสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอกทีฟ ตามวิธีของ MERCK 1.14678.0001 (Method : photometric) เพื่อศึกษาอายุการใช้งานของผงดักแด้ไหม

2.12 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของผงดักแดดใหม่ที่ใช้ผ่านการใช้งานแล้ว

ทำการทดลองโดยนำผงดักแดดใหม่ ที่ผ่านการใช้งานแล้วจากคอลัมน์มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ตากให้แห้ง แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำผงดักแดดใหม่ ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟูสภาพปริมาณที่เหมาะสมตามการทดลองที่ 2.2 มาทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ ทั้ง 2 สี เปรียบเทียบกับผงดักแดดใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของผงดักแดดใหม่ ที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบดซ์ และนำไปวิเคราะห์ตามวิธีของ MERCK 1.14678.0001 (Method : photometric)

3. สถานที่ทำการทดลอง

ศึกษาวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์และการจัดการของเสีย ฝ่ายนาโนเทคโนโลยีและเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และ อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ระยะเวลาในการทำการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาทำการวิจัยรวม 15 เดือน คือ ตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2550 ถึง เดือนกันยายน พ.ศ. 2551

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเตรียมตัวดูดซับจากดักแด้ไหมในการกำจัดสรีรแอกทีฟในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยการทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่หนึ่งเตรียมตัวดูดซับจากดักแด้ไหม ขั้นตอนที่สองศึกษาสภาวะในการกำจัดสารละลายมาตรฐานสรีรแอกทีฟ ด้วยตัวดูดซับแบบแบตช์ (batch) และขั้นตอนที่สามนำตัวดูดซับที่ทราบสภาวะส่งเสริมต่อการดูดซับเพื่อให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสรีรแอกทีฟในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

การเตรียมตัวดูดซับจากดักแด้ไหมได้ศึกษาสมบัติจำเพาะของดักแด้ไหมได้แก่ ปริมาณ โปรตีน ไขมัน ความชื้น และเถ้า รวมทั้งการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสรีรแอกทีฟโดยใช้สารละลายมาตรฐานสรีรแอกทีฟ 2 สรี ได้แก่ สรีรแอกทีฟปฏู 19 และสรีรแอกทีฟเรด 3 และทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

1. สมบัติจำเพาะของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของดักแด้ไหมพบว่ามีความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และทราบปริมาณรวมทั้งชนิดของกรดอะมิโนซึ่งเป็นองค์ประกอบในดักแด้ไหม ดังในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของดักแด้ไหม

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	8.34
โปรตีน	56.07
ไขมัน	3.07
เถ้า	4.14

ตารางที่ 5 การจำแนกชนิดและปริมาณกรดอะมิโนซึ่งเป็นองค์ประกอบของดักแด้ใหม่

กรดอะมิโน	ร้อยละ
กรดอะมิโนที่ไม่ละลายน้ำ	
อะลานีน	7.76
วาลีน	6.01
โพรลีน	4.07
เมทไทโอนีน	2.71
เฟนิลอะลานีน	4.80
ลูซีน	7.95
ไอโซลูซีน	4.94
กรดอะมิโนที่ไม่มีประจุ	
ซีรีน	5.64
ไกลซีน	5.48
ทรีโอนีน	3.96
ทัยโรซีน	6.37
ซีสทีน	0.49
กรดอะมิโนที่เป็นกรด	
กรดแอสพาทิก	8.92
กรดกลูตามิก	12.55
กรดอะมิโนที่เป็นเบส	
ฮิสติดีน	3.86
อาร์จินีน	7.18
ไลซีน	7.31

จากผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Noroozi *et al.* (2007) พบว่าดักแด้ไหมที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับสีโดยทั่วไปควรมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้าประมาณร้อยละ 7.00, 58.00, 4.00 และ 5.00 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองในครั้งนี้ และชนิดของกรดอะมิโนมีผลในการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วย เนื่องจากโครงสร้างของสีรีแอกทีฟมีความสามารถในการสร้างพันธะโควาเลนต์กับโครงสร้างของกรดอะมิโน (อจรรพร, 2527)

2. ลักษณะกายภาพของตัวดูดซับ

ภาพที่ 14 แสดงดักแด้ไหมที่ผ่านการตากแดดและอบให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และภาพที่ 15 แสดงผงดักแด้ไหมแห้งป่นละเอียดขนาด 50-100 mesh ที่จะให้เป็นตัวดูดซับในการทดลองนี้

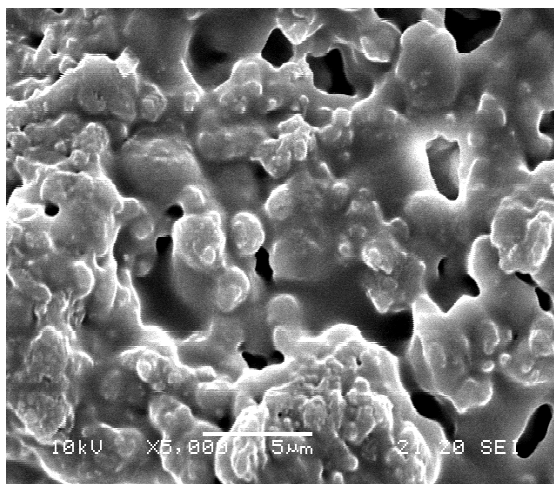


ภาพที่ 14 ดักแด้ไหมตากแห้ง

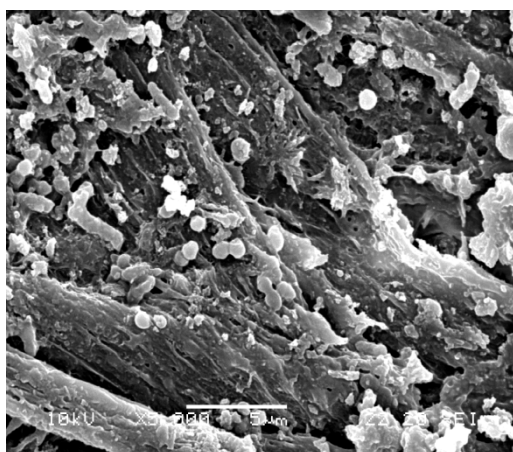


ภาพที่ 15 ผงดักแด้ไหมแห้งปั่นละเอียด

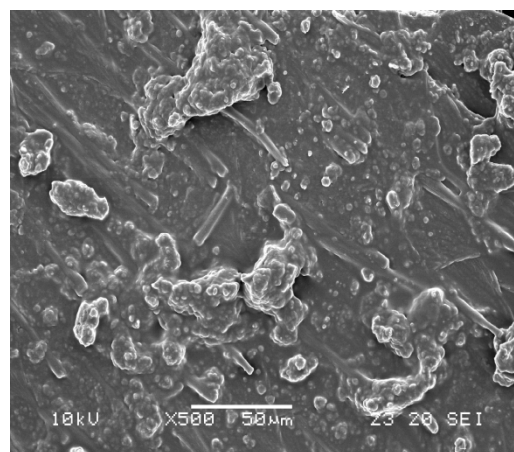
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงดักแด้ไหมด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) พบว่าผงดักแด้ไหมแห้งปั่นละเอียด (50-100 mesh) มีรูพรุนอยู่มากมาย ซึ่งจำนวนรูพรุนนี้มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสของผงดักแด้ไหมที่จะใช้เป็นตัวดูดซับ ดังภาพที่ 16 (A) ภาพที่ 16 (B) และ (C) แสดงลักษณะผงดักแด้ไหมภายหลังการดูดซับสีรีแอกทีฟฟลู 19 และสีรีแอกทีฟเรด 3 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่ผิวสัมผัสที่เป็นรูพรุนของผงดักแด้ไหมถูกครอบครองด้วยสีรีแอกทีฟทั้งสองสีภายหลังกระบวนการดูดซับ โดยดักแด้ไหมสด 1 กิโลกรัม สามารถผลิตผงดักแด้ไหมขนาด 50-100 mesh ได้ประมาณ 300 กรัม



(A)



(B)



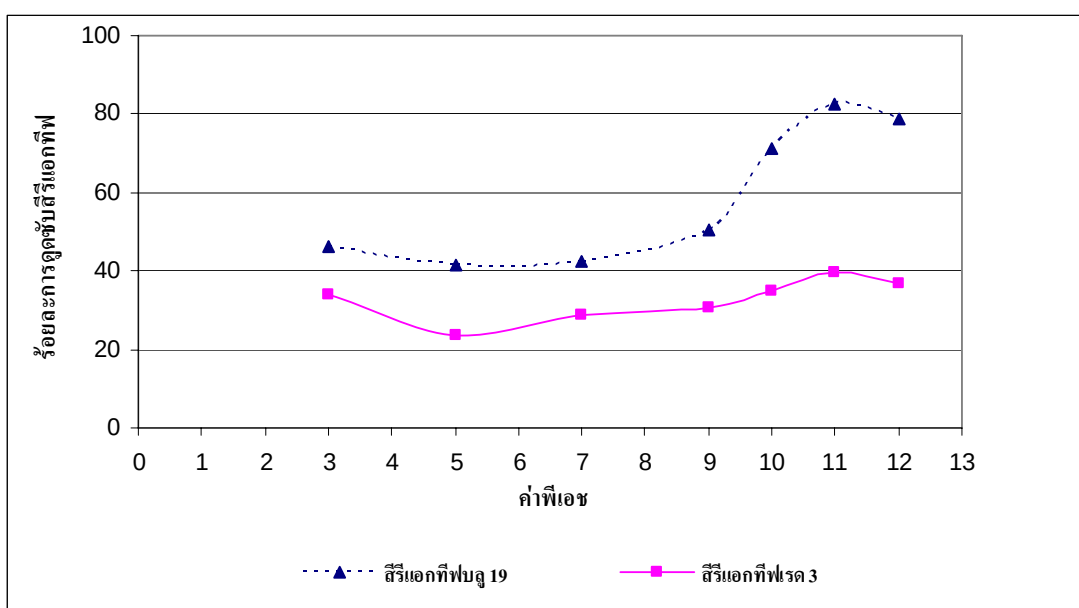
(C)

ภาพที่ 16 เปรียบเทียบตัวดูดซับก่อน (A) และหลังการดูดซับสีรีแอกทีฟฟลู 19 (B) และ
สีรีแอกทีฟเรด 3 (C)

3. ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

3.1 ผลของ pH ต่อความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟของผงดักแด้ไหม

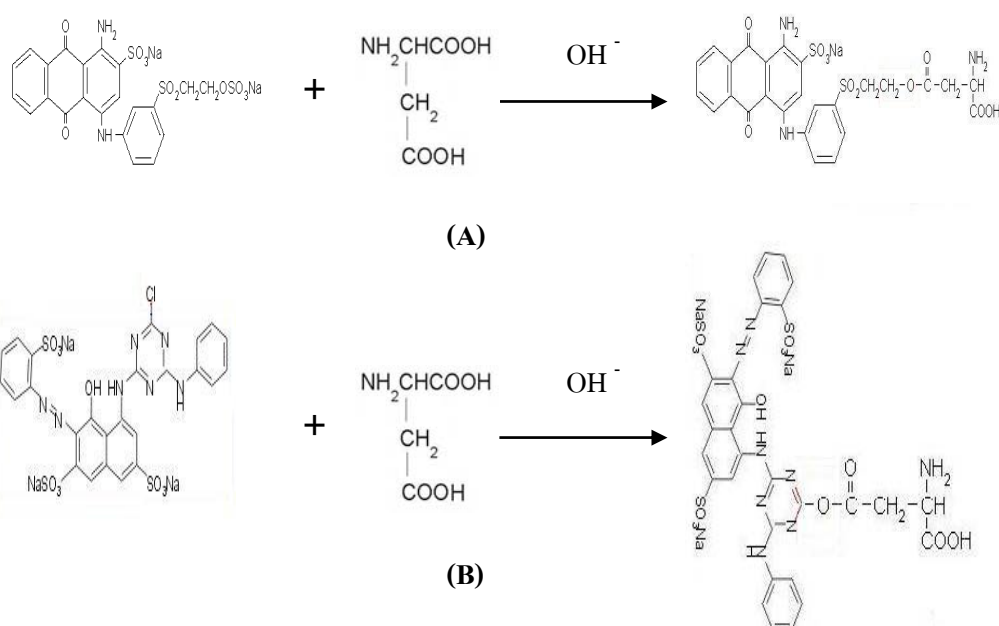
การทดลองพบว่า ที่ pH 7-11 ตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหมมีความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟเพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการดูดซับเริ่มลดลง เมื่อ pH เพิ่มขึ้นมากกว่า 11 ซึ่งสีทั้งสองถูกดูดซับได้ดีในช่วง pH ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 17



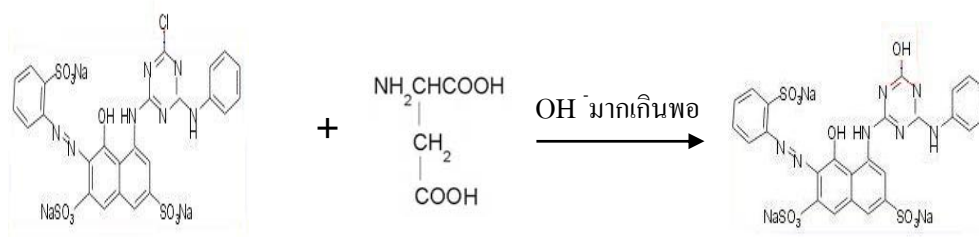
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟของผงดักแด้ไหม และค่าพีเอช

จากภาพที่ 17 พบว่า ถึงแม้ว่าความสามารถในการดูดซับสีทั้งสองของผงดักแด้ไหมมีความแตกต่างกัน แต่พบว่าช่วง pH ที่เหมาะสมส่งผลให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ pH ใกล้เคียงกันคือ pH 11 โดยประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 คิดเป็นร้อยละ 82.46 และสีรีแอกทีฟเรด 3 คิดเป็นร้อยละ 39.84 (ตารางที่ 6) การปรับ pH ให้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอกทีฟทั้งสองสีเพิ่มขึ้น เนื่องจาก pH ที่เป็นเบสมีผลต่อการแตกตัวของ side chain ในกรดอะมิโนในผงดักแด้ไหม จากการวิเคราะห์พบว่าดักแด้ไหมมีกรดกลูตามิกและกรดแอสพาทิกมากที่สุดคือ ร้อยละ 12.55 และ 8.92 ตามลำดับ ซึ่งกรดอะมิโนทั้ง 2 ชนิดมีสภาพความเป็นกรดสูงและมีความสามารถในการแตกตัวได้ในสารละลายที่มี pH สูงโดย side chain

ของกรดอะมิโนทั้งสองสามารถแตกตัวให้โปรตอนแก่โครงสร้างของสียแอกทีฟเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ได้ ดังภาพที่ 18 (อรรณพร, 2527) ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า pH สูงในช่วงเบสจัด ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากเกิดการแข่งขันของไฮดรอกซิลไอออนกับกรดอะมิโนของผงดักแด้ไหมในการสร้างพันธะโควาเลนต์กับโครงสร้างสียแอกทีฟ จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง Thangamani et al. (2007) ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 18 ปฏิกิริยาสียแอกทีฟบลู 19 (A) และสียแอกทีฟเรด 3 (B) กับกรดแอสพาทิกในสภาวะเบส



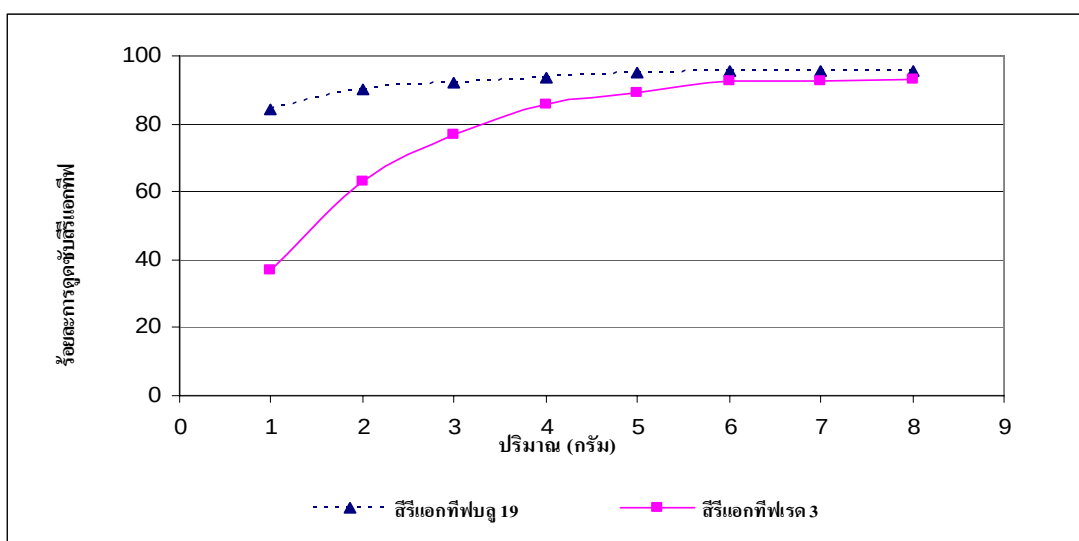
ภาพที่ 19 ปฏิกิริยาสียแอกทีฟเรด 3 กับกรดแอสพาทิกในสภาวะเบสจัด

ตารางที่ 6 แสดงค่า pH และประสิทธิภาพการดูดซับแต่ละสีของตัวดูดซับ

สีรีแอกทีฟ	ผงดักแด้ไหม	
	pH	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)
สีรีแอกทีฟบลู 19	11	82.46
สีรีแอกทีฟเรด 3	11	39.84

3.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหมต่อความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟโดยตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหม

การทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับ pH ของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเป็น 11 ซึ่งเป็น pH ที่ตัวดูดซับจากดักแด้ไหมมีประสิทธิภาพสูงสุดพบว่า ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 ส่วนปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟปริมาตร 50 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟของผงดักแด้ไหม และปริมาณตัวดูดซับ

จากภาพที่ 20 พบว่าความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 95.32 หลังจากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะคงที่ เช่นเดียวกับความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 คือ ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 92.54 (ตารางที่ 7) ที่ปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม หลังจากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะคงที่ เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวดูดซับผงดักแดดใหม่เพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้นด้วย และจะเข้าสู่สภาวะคงที่ เนื่องจากอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ณ สภาวะการคงที่ จำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่คายออกมามีปริมาณคงที่ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Thangamani *et al.* (2007) พบว่า เปลือกของเมล็ดฝ้ายมีประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟ (Reactive Blue MR) สูงสุด เมื่อความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวดูดซับปริมาณ 2.5 และ 3 กรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะคงที่

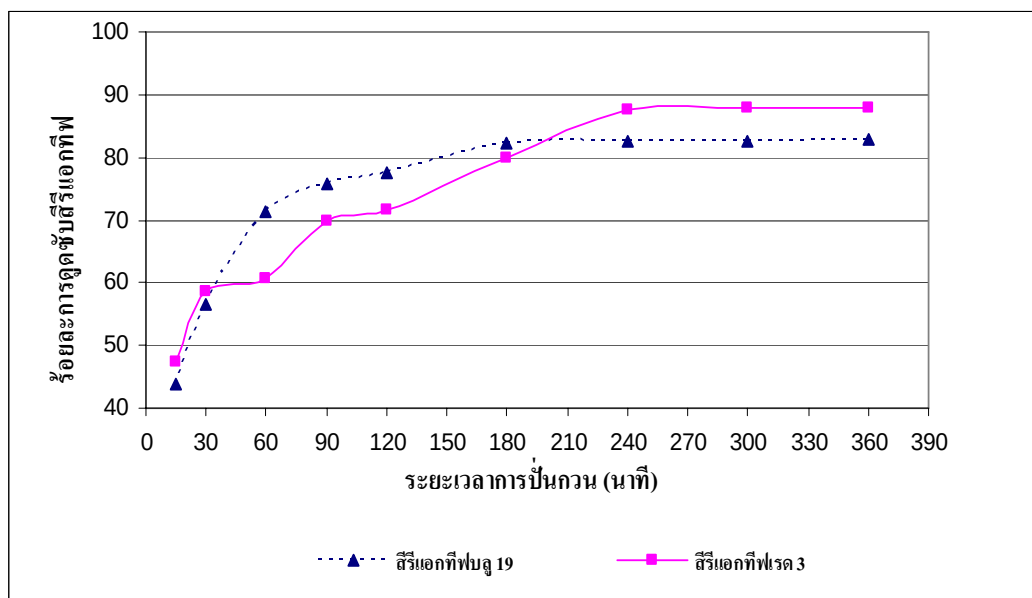
ตารางที่ 7 แสดงค่าปริมาณตัวดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับสีแต่ละสีของตัวดูดซับ

สีรีแอกทีฟ	ผงดักแดดใหม่	
	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)
สีรีแอกทีฟบลู 19	5	95.32
สีรีแอกทีฟเรด 3	6	92.54

3.3 ผลของระยะเวลาการปั่นกว่นต่อความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟโดยการดูดซับจากผงดักแดดใหม่

การทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับ pH ของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเป็น 11 ซึ่งเป็น pH ที่ตัวดูดซับจากผงดักแดดใหม่มีประสิทธิภาพสูงสุด และปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม สำหรับสีรีแอกทีฟบลู 19 และปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม สำหรับสีรีแอกทีฟเรด 3 พบว่าระยะเวลาปั่นกว่น 180 นาที มีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 82.52 ในการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 และ

ระยะเวลาปั่นกวน 240 นาที มีประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 87.69 ในการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ดังแสดงในภาพที่ 21 และตารางที่ 8



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟของผงดักแด้ไหม และระยะเวลาปั่นกวน

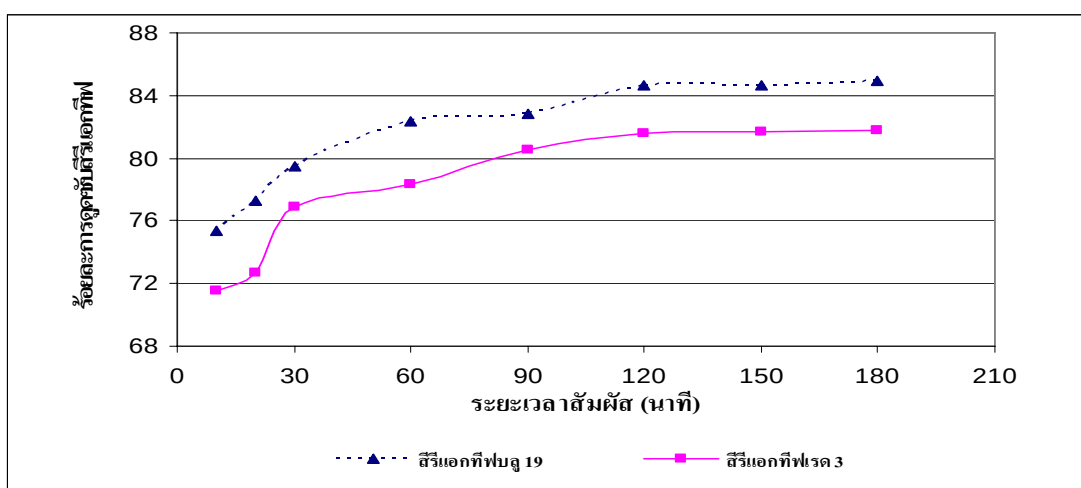
ในการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีทั้งสองเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาปั่นกวนมากขึ้น เนื่องจากใช้เวลาในการปั่นกวนสูงจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นการดูดซับจะคงที่ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลสีรีแอกทีฟบางส่วน ไปเกาะติดกับพื้นผิวของผงดักแด้ไหม เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลสีรีแอกทีฟไปเกาะที่ผิวของผงดักแด้ไหมเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลของสีรีแอกทีฟบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวของผงดักแด้ไหมจะคายออกมาเมื่อปล่อยให้การดูดซับดำเนินการไปจนกระทั่ง อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งการดูดซับจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่คายออกมามีปริมาณคงที่ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

ตารางที่ 8 แสดงระยะเวลาปั่นกวนและประสิทธิภาพการดูดซับสีแต่ละสีของตัวดูดซับ

สีรีแอกทีฟ	ผงดักแค้ใหม่	
	ระยะเวลาปั่นกวน (นาที)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)
สีรีแอกทีฟบลู 19	180	82.25
สีรีแอกทีฟเรด 3	240	87.69

3.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟโดยตัวดูดซับจากผงดักแค้ใหม่

การทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับ pH ของสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเป็น 11 ซึ่งเป็น pH ที่ตัวดูดซับจากผงดักแค้ใหม่มีประสิทธิภาพสูงสุด ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ระยะเวลาปั่นกวน 180 นาที สำหรับสีรีแอกทีฟบลู 19 และปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม ระยะเวลาปั่นกวน 240 นาที สำหรับสีรีแอกทีฟเรด 3 พบว่าระยะเวลาสัมผัส 120 นาที มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 คิดเป็นร้อยละ 84.62 และสีรีแอกทีฟเรด 3 คิดเป็นร้อยละ 81.56 ดังแสดงในภาพที่ 22 และตารางที่ 9



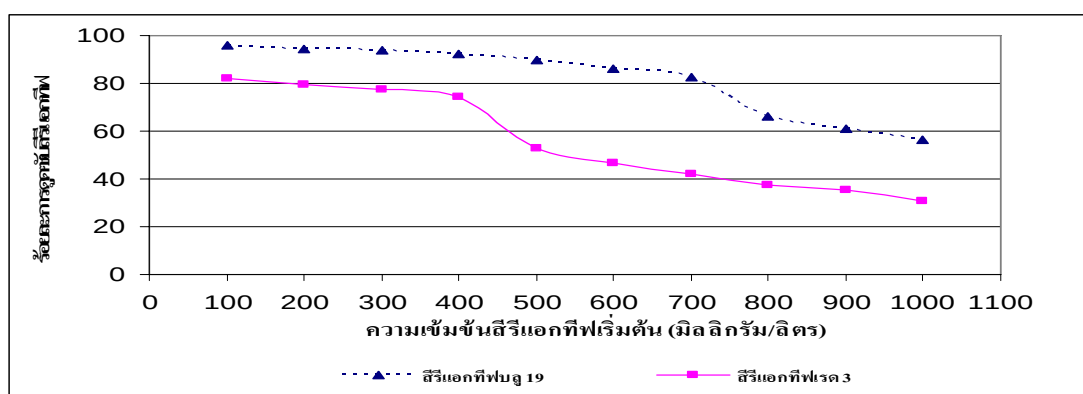
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟของผงดักแค้ใหม่ และระยะเวลาสัมผัส

ประสิทธิภาพการดูดซับทั้งสองสีเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสมากขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับจะมีเวลาในการยึดเกาะติดพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นการดูดซับจะคงที่ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลสีรีแอกทีฟบางส่วนจะเกาะติดกับพื้นผิวของผงดักแดดไหม เมื่อระยะเวลาผ่านไปจำนวนโมเลกุลสีรีแอกทีฟที่เกาะบริเวณผิวของผงดักแดดไหมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผิวของโมเลกุลของสีรีแอกทีฟบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวของผงดักแดดไหมจะคายออกมาเมื่อปล่อยให้การดูดซับดำเนินการไปจนกระทั่ง อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย จึงเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งที่ ณ สภาวะการคงที่ การดูดซับจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่คายออกมามีปริมาณคงที่ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

ตารางที่ 9 แสดงระยะเวลาสัมผัสมและประสิทธิภาพการดูดซับแต่ละสีของตัวดูดซับ

สีรีแอกทีฟ	ผงดักแดดไหม	
	ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)
สีรีแอกทีฟบลู 19	120	84.62
สีรีแอกทีฟเรด 3	120	81.56

3.5 ผลของความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้นต่อความสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟโดยตัวดูดซับจากผงดักแดดไหม



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟของผงดักแดดไหม และความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้น

จากภาพที่ 23 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 มีสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้นเท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 มีสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 23 และตารางที่ 10

ในการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นสีรีแอกทีฟให้สูงขึ้นส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวดูดซับคงที่ โดยในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลสีรีแอกทีฟบางส่วนจะเกาะติดกับพื้นผิวของผงดักแด้ไหม เมื่อระยะเวลาผ่านมีจำนวนโมเลกุลสีรีแอกทีฟที่เกาะบริเวณผิวของผงดักแด้ไหมเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของสีรีแอกทีฟบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวของผงดักแด้ไหมจะคายออกมา เมื่อปล่อยให้การดูดซับดำเนินการไปจนกระทั่ง อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย จึงเข้าสู่สภาวะคงที่ ณ สภาวะการคงที่ การดูดซับจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่ถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของสีรีแอกทีฟที่คายออกมามีปริมาณคงที่ (นิพนธ์ และคณะ, 2550) จึงส่งผลให้ตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อไปได้อีก และเมื่อความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณตัวดูดซับยังมีค่าคงที่ ทำให้มีสีรีแอกทีฟเริ่มต้นเหลืออยู่ในระบบซึ่งไม่สามารถถูกดูดซับได้อีกต่อไป

ตารางที่ 10 แสดงความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้นและประสิทธิภาพการดูดซับแต่ละสีของตัวดูดซับ

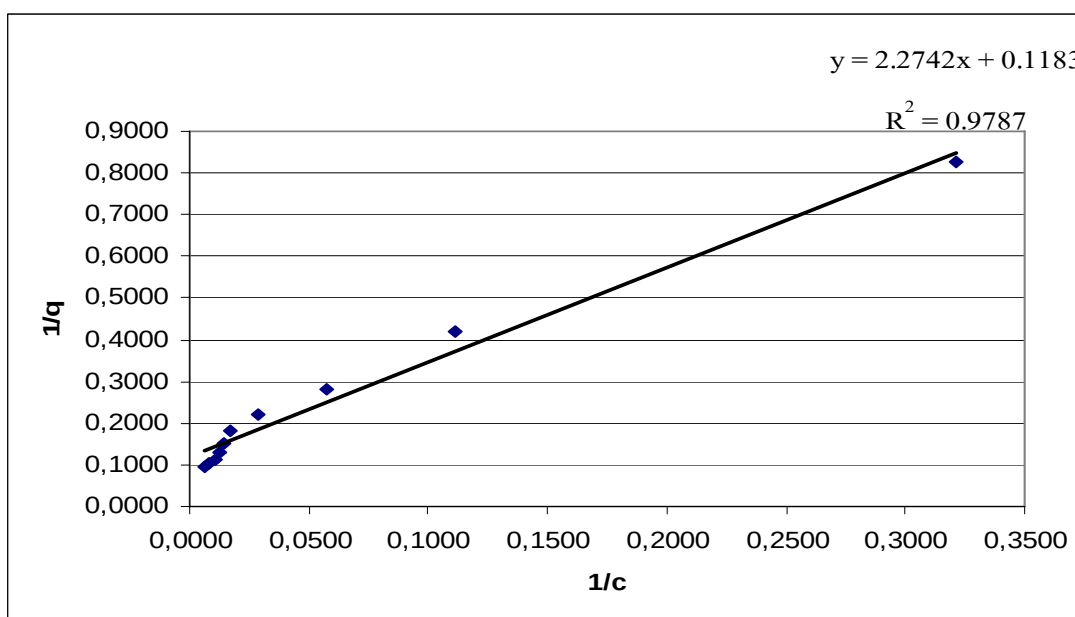
สีรีแอกทีฟ	ผงดักแด้ไหม	
	ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟ	ประสิทธิภาพการดูดซับ
	เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	(ร้อยละ)
สีรีแอกทีฟบลู 19	700	82.58
สีรีแอกทีฟเรด 3	400	74.51

4. ไอโซเทอร์มในการดูดซับสรีแอกทีฟ

การดูดซับที่ย้อมของตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหมสามารถแสดงในรูปไอโซเทอร์มการดูดซับ ซึ่งจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ พบว่าการดูดซับสีโดยตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหมเป็นไปตามกลไกทั้งแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์

4.1 สรีแอกทีฟบลู 19

ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีแอกทีฟบลู 19 ในสารละลายมาตรฐานสรีแอกทีฟบลู 19 ของผงดักแด้ไหม เมื่อนำมาศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังภาพที่ 24 และ 25 ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสรีแอกทีฟบลู 19 จากสารละลายมาตรฐานสรีแอกทีฟบลู 19 ทั้ง 2 แบบ มีค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 0.9787 และ 0.9897 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) ดังนั้นการดูดซับสรีแอกทีฟบลู 19 ในสารละลายมาตรฐานสรีแอกทีฟบลู 19 จึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช แต่ทั้งนี้กลไกการดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดลิชมากกว่า เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า



ภาพที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีแอกทีฟบลู 19 ของแลงเมียร์

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับสรีแอกทีฟบลู 19 ของแสงเมียร์โดยทั่วไปคือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 8

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{-----}(8)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 2.2742 \frac{1}{C} + 0.1183 \quad \text{-----}(9)$$

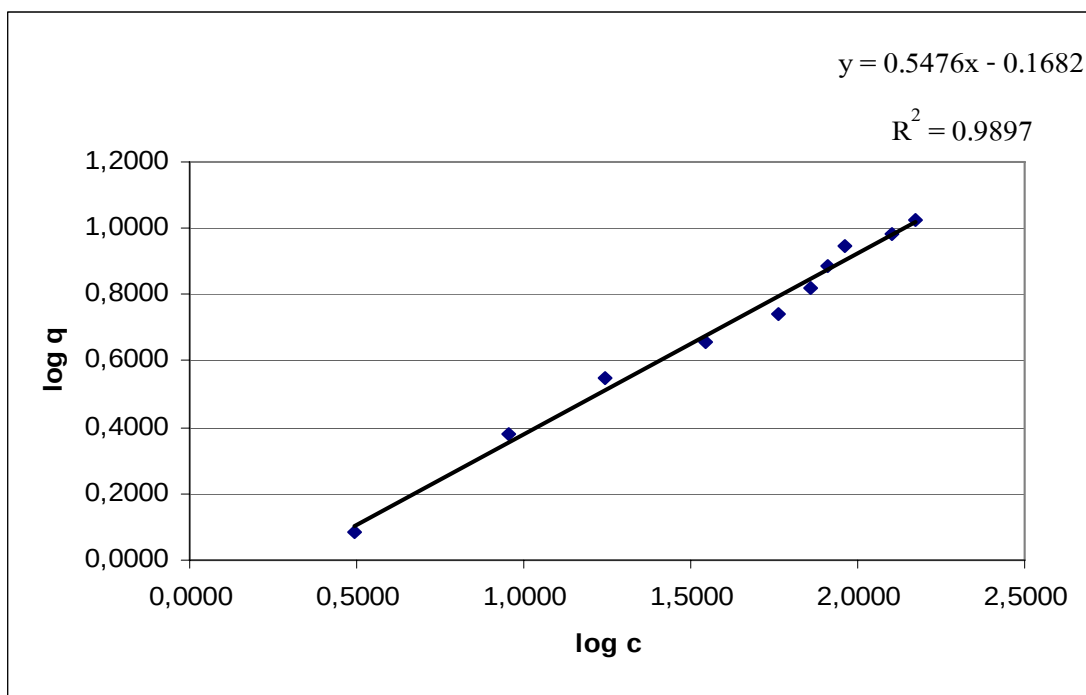
จากสมการที่ 9 เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 2.2742 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 0.1183 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 2.2742$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.1183$$

$$\text{ดังนั้น} \quad K = 0.0520$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณสรีแอกทีฟบลู 19 ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของผงดักแด้ไหม



ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรแอทีฟพลู 19 ของฟรุณดิซ

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรแอทีฟพลู 19 ของฟรุณดิซโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ 10

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{-----}(10)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = -0.1682 + 0.5476 \log C \quad \text{-----}(11)$$

จากสมการที่ 11 เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.5476 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -0.1682 นั่นคือ

$$\log K = -0.1682$$

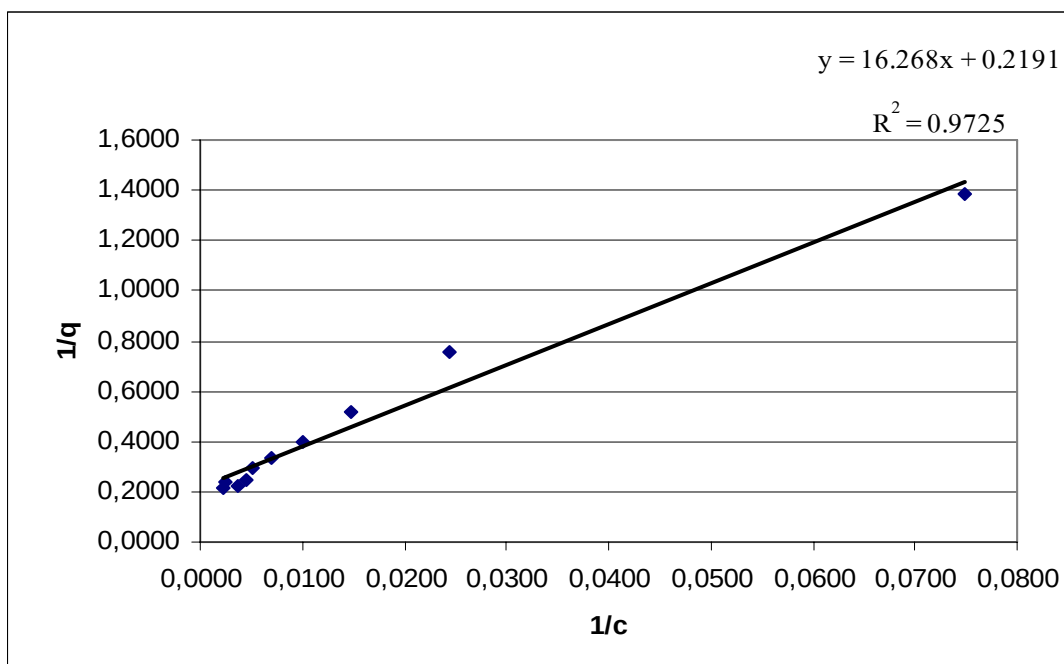
$$1/n = 0.5476$$

$$n = 1.8262$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช พบว่า ค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดในการดูดซับสรีแอกทีฟบลู 19 และมีค่า n เท่ากับ 1.8262 อย่างไรก็ตามเป็นค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (1-10) Trayball (1980)

4.2 สรีแอกทีฟเรด 3

ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีแอกทีฟเรด 3 ในสารละลายมาตรฐานสรีแอกทีฟเรด 3 ของผงดักแด้ เมื่อนำมาศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสมการแลงเมียร์และฟรุนดิช ดังภาพที่ 26 และ 27 ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสรีแอกทีฟเรด 3 จากสารละลายมาตรฐานสรีแอกทีฟเรด 3 ทั้ง 2 แบบ มีค่าเท่ากับ 0.9725 และ 0.9751 ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) แต่ทั้งนี้กลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับแบบฟรุนดิชมากกว่า เช่นเดียวกันกับสรีแอกทีฟบลู 19



ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรเอกที่เฟรด 3 ของเลงเมียร์

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรเอกที่เฟรด 3 ของเลงเมียร์โดยทั่วไปคือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 12

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \text{-----(12)}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 16.268 \frac{1}{C} + 0.2191 \quad \text{-----(13)}$$

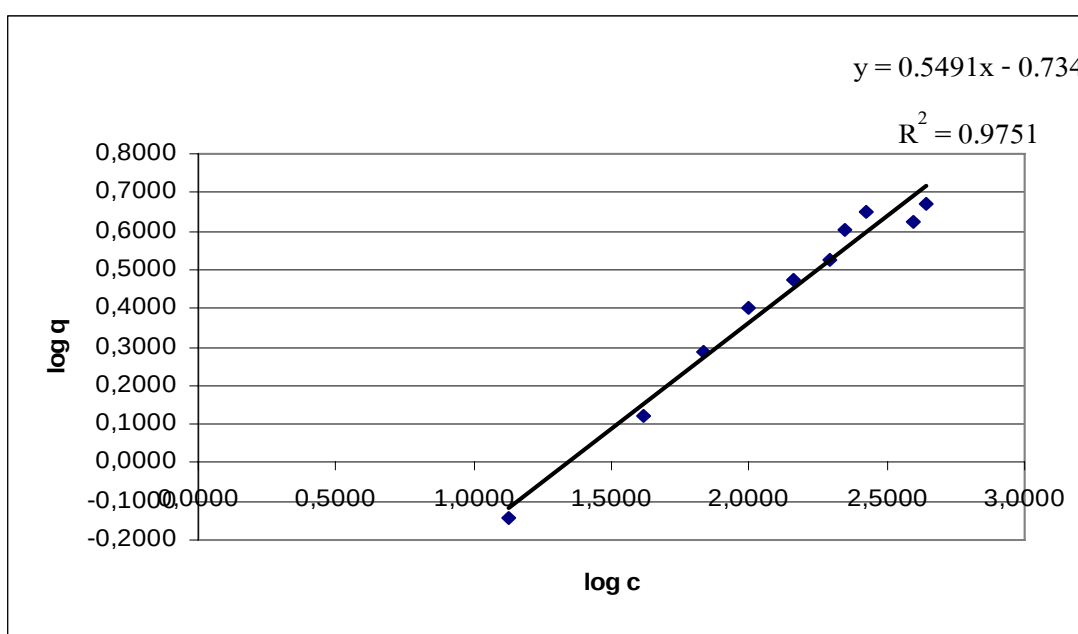
จากสมการที่ 13 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 16.268 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 0.2191 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 16.286$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.2191$$

ดังนั้น $K = 0.0135$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณสรีแอกทีฟเฟรค 3 ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของผงดักแค้ใหม่



ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีแอกทีฟเฟรค 3 ของฟรุนดิช

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับสรีแอกทีฟเฟรค 3 ของฟรุนดิชโดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ 14

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \text{-----(14)}$$

$$\log q = -0.734 + 0.5491 \log C \quad \text{-----(15)}$$

จากสมการที่ 15 เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.5491 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -0.734 นั่นคือ

$$\log K = -0.734$$

$$1/n = 0.5491$$

$$n = 1.8211$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช พบว่า ค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดในการดูดซับสรีแอกทีฟเฟรด 3 และมีค่า n เท่ากับ 1.8211 ใดๆก็ตามเป็นค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (1-10) Trayball (1980)

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนดิช และแลงเมียร์ในการดูดซับสรีแอกทีฟของผงดักแด้ไหม

ตัวถูกดูดซับ	Freundlich Isotherm			Langmuir Isotherm		
	K	n	R ²	K	q _m	R ²
สรีแอกทีฟฟลู 19	0.6789	1.8262	0.9897	0.0520	8.45	0.9787
สรีแอกทีฟเฟรด 3	0.1845	1.8211	0.9751	0.0135	4.56	0.9725

ตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่าในการดูดซับสรีแอกทีฟทั้งสรีแอกทีฟฟลู 19 และสรีแอกทีฟเฟรด 3 เป็นไปตามสมการของฟรุนดิชและสมการแลงเมียร์ แต่ทั้งนี้กลไกการดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชมากกว่าเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า และผงดักแด้ไหมสามารถดูดซับสรีแอกทีฟฟลู 19 ได้มากกว่าสรีแอกทีฟเฟรด 3 เนื่องจากมีค่าคงที่(K), ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) และค่า n ในการดูดซับมากกว่า (ตารางที่ 11) แสดงให้เห็นว่าผงดักแด้ไหมมีความจุในการดูดซับและโมเลกุลของสรีแอกทีฟฟลู 19 มากกว่าสรีแอกทีฟเฟรด 3 และจากผลการทดลองของ Noroozi *et al.* (2007) พบว่าผงดักแด้ไหมสามารถดูดซับสรีแอกทีฟไอออนโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการฟรุนดิชและสมการแลงเมียร์ เท่ากับ 0.946 และ 0.904 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้อีกกลไกการดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับของฟรุนดิชมากกว่าเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่าสมการแลงเมียร์ แต่พบว่าผงดักแด้ไหมสามารถดูดซับสรีแอกทีฟไอออนได้น้อยกว่าดูดซับสรีแอกทีฟ เนื่องจากมีค่า n เท่ากับ 1.586

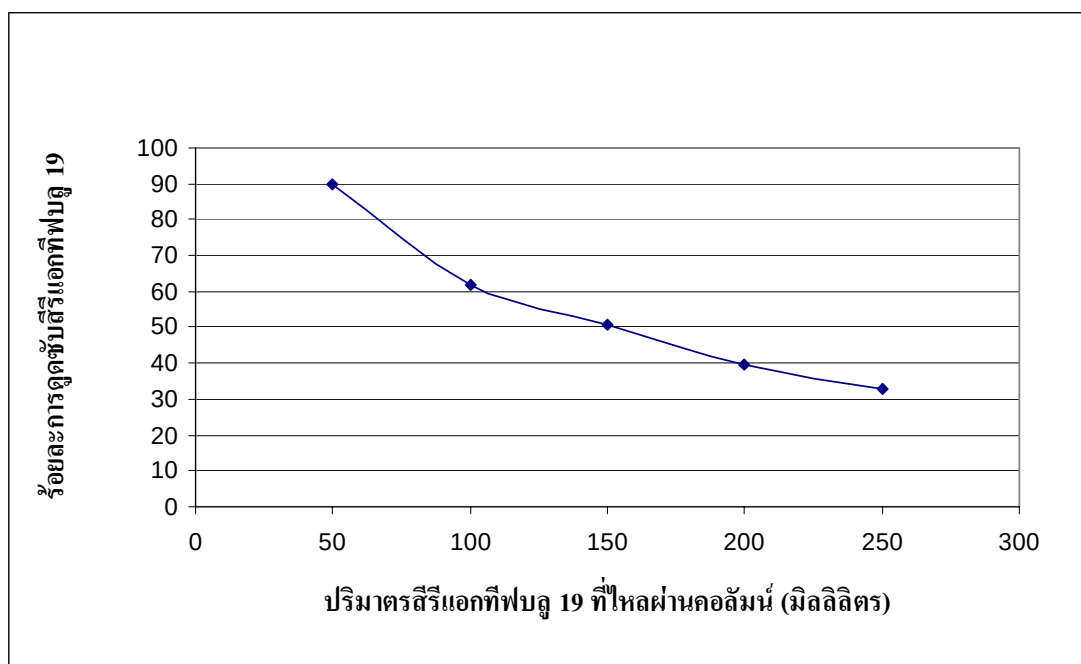
ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการทดลองในครั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าผงดักแดดใหม่มีความสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟได้มากกว่าสีแคตไอออน ดังแสดงในตารางที่ 11 เนื่องจากค่า n แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวในการดูดซับจะมีมากหรือน้อย ถ้าค่า n มีค่าน้อย (ค่าจะเข้าใกล้ 1 หรือน้อยกว่า 1) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวในการดูดซับมีจำกัด

5. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟโดยการทดลองแบบคอลัมน์

5.1 สีรีแอกทีฟบลู 19

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 ที่มีความเข้มข้นสีรีแอกทีฟบลู 19 เท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 11 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุผงดักแดดใหม่จำนวน 50 กรัม ทำการทดลองที่อัตราการไหล 0.71 มิลลิตรต่อนาที แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 จากทางออกปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับ ได้ผลการทดลองดังนี้

ปริมาตรสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 ที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงแรกคือ 50 มิลลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับ มีค่าเท่ากับร้อยละ 89.62 ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้จากปริมาณสีรีแอกทีฟบลู 19 ที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าน้อย เท่ากับร้อยละ 10.38 และเมื่อระยะเวลาการปล่อยสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 ผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวของผงดักแดดใหม่มีการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 เอาไว้บ้างแล้ว และเมื่อปล่อยสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 ให้ไหลผ่านคอลัมน์เป็นระยะเวลานานขึ้น พื้นที่ผิวของผงดักแดดใหม่จะเริ่มอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด ดังภาพที่ 28



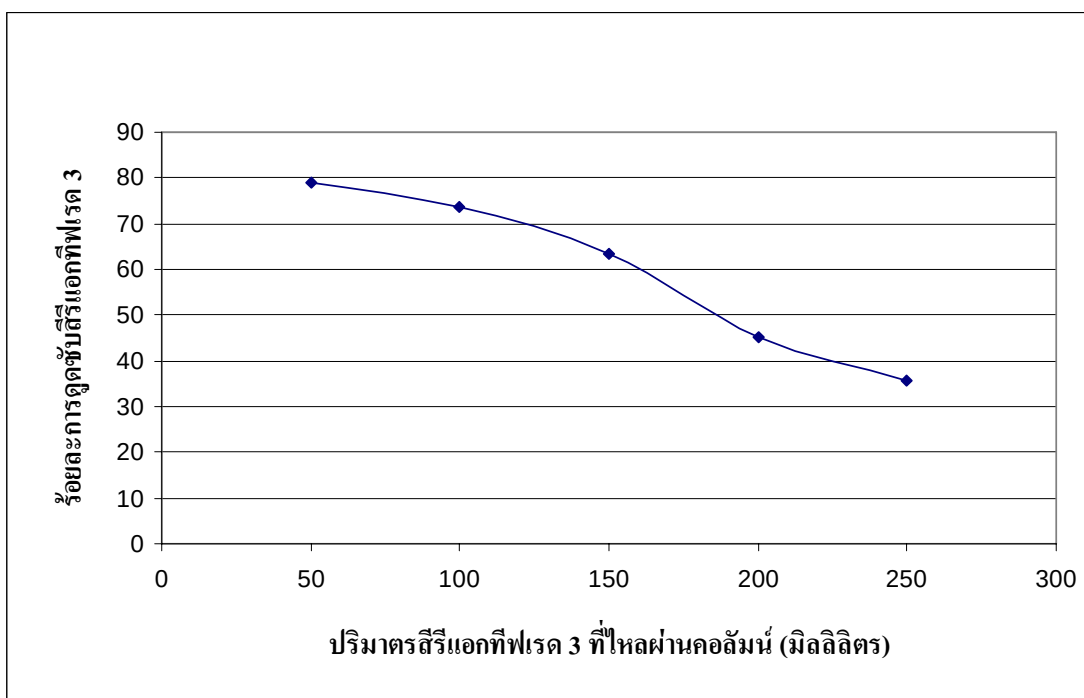
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสารฟอร์มาลิน 19 และปริมาณสารฟอร์มาลิน 19% ที่ไหลผ่านคอลัมน์

5.2 สารฟอร์มาลิน 3

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสารฟอร์มาลิน 3% ที่มีความเข้มข้นสารฟอร์มาลิน 3 เท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 11 ให้ไหลผ่านคอลัมน์อะคริลิกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุผงดักแด้ไหมจำนวน 50 กรัม ทำการทดลองที่อัตราการไหล 0.91 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายมาตรฐานสารฟอร์มาลิน 3% ที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับ ได้ผลการทดลองดังนี้

ปริมาณสารละลายมาตรฐานสารฟอร์มาลิน 3% ที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงแรกคือ 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าสูง มีค่าเท่ากับร้อยละ 74.41 ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้จากปริมาณสารฟอร์มาลิน 3% ที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าเท่ากับร้อยละ 25.59 และเมื่อระยะเวลาการปล่อยสารละลายมาตรฐานสารฟอร์มาลิน 3% ผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวของผงดักแด้ไหมมีการดูดซับสารฟอร์มาลิน 3%

เอาไว้ และหากปล่อยสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟเรด 3 ไหลผ่านคอลัมน์เป็นระยะเวลานานขึ้น พื้นที่ผิวของผงดักแด้ไหมจะเริ่มอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด ดังภาพที่ 29

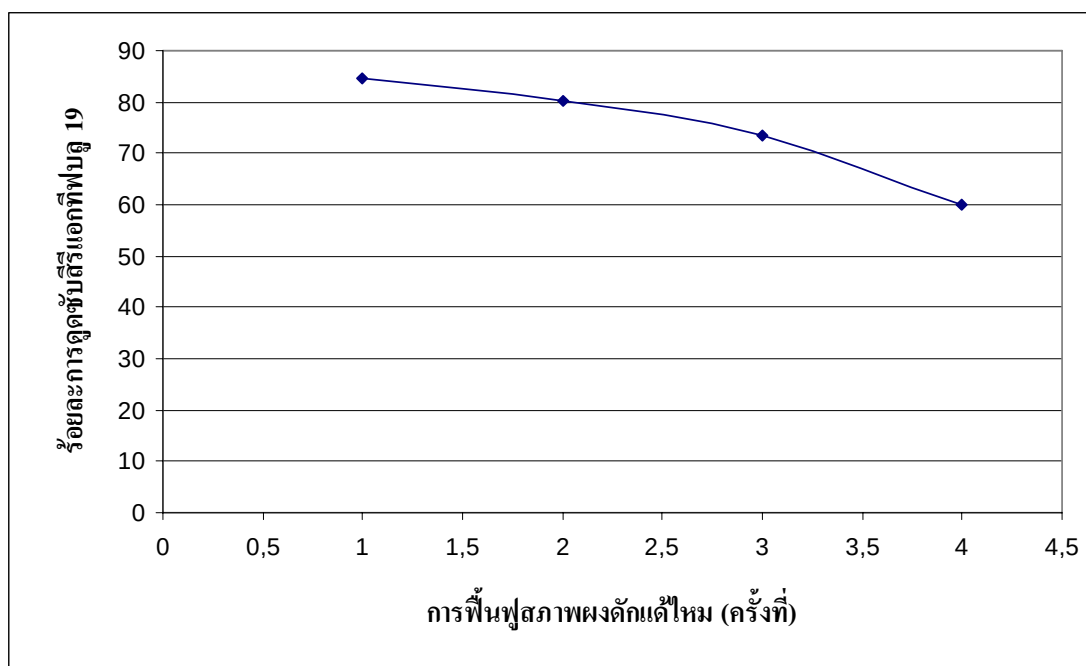


ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 และปริมาณสีรีแอกทีฟเรด 3 ที่ไหลผ่านคอลัมน์

6. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของผงดักแด้ไหมที่ผ่านการใช้งานแล้ว

6.1 สีรีแอกทีฟบลู 19

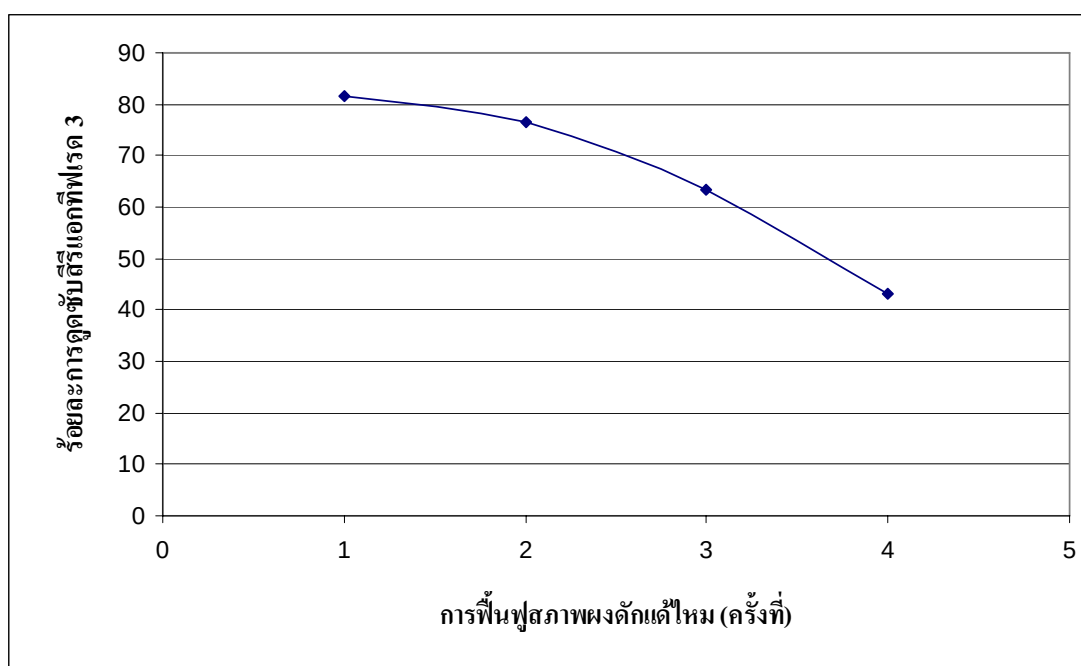
การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟบลู 19 ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ pH เท่ากับ 11 ใช้ผงดักแด้ไหมที่ผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วปริมาณ 5 กรัม นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 180 นาที ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของผงดักแด้ไหมที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ได้มีผลการทดลองดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกที่ฟลู 19 ของผงดักแด้ใหม่และการฟื้นฟูสภาพผงดักแด้ใหม่

6.2 สรีรเอกที่ฟลูเรด 3

การทดลองนี้ใช้สารละลายมาตรฐานสรีรเอกที่ฟลูเรด 3 ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ pH เท่ากับ 11 ใช้ผงดักแด้ใหม่ผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วปริมาณ 6 กรัม นำไปปั่นจนเป็นเวลา 240 นาที ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยศึกษาการฟื้นฟูสภาพของผงดักแด้ใหม่ที่ผ่านการใช้งานแล้วจำนวน 3 ครั้ง ได้มีผลการทดลองดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทฟิเรด 3 ของผงดักแด่ใหม่และการฟื้นฟูสภาพผงดักแด่ใหม่

ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของผงดักแด่ใหม่ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าความสามารถในการดูดซับสรีรแอทฟิทั้งสองสปีในสารละลายมาตรฐานสรีรแอทฟิมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับผงดักแด่ใหม่ก่อนการใช้งาน และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับบางส่วนเกิดการสูญเสียไปในขณะที่ทำการดูดซับก่อนจะฟื้นฟูสภาพ รวมทั้งในการฟื้นฟูสภาพอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวในการดูดซับด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

7. ประสิทธิภาพการบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยตัวดูดซับจากผงดักแด่ใหม่

เมื่อทดลองบำบัดสีรีแอทฟิในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับแบบเบดซ์ ดังแสดงในตารางที่ 12 จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับจากผงดักแด่ใหม่สามารถดูดซับสีรีแอทฟิพบลู 19 ซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยมีค่าความเข้มข้นสีรีแอทฟิพบลู 19 เริ่มต้น 774.11 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านการบำบัดแล้วค่าความเข้มข้นสีรีแอทฟิพบลู 19 ที่เหลือ 195.41 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ

74.39 และค่าการบำบัด COD จาก 880 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 404.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงร้อยละ 54.00 และผงดักแด้ใหม่สามารถดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยมีค่าความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเรด 3 เริ่มต้น 723.90 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านการบำบัดแล้วค่าความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเรด 3 ที่เหลือ 229.65 คิดเป็นร้อยละ 68.28 และค่าการบำบัด COD จาก 880 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 510.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงร้อยละ 42.00 ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 12 สรุปสถานะที่ใช้ในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงาน

สีรีแอกทีฟ	pH	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ระยะเวลาปั่นกว (นาที)	ระยะเวลาสัมผัส (นาที)
สีรีแอกทีฟบลู 19	11	5	180	120
สีรีแอกทีฟเรด 3	11	6	240	120

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยตัวดูดซับจากผงดักแด้ใหม่

สีรีแอกทีฟ	ความเข้มข้นก่อน การบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลัง การบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละ การดูดซับ	ค่า COD หลัง บำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละ การลดลง ค่า COD
สีรีแอกทีฟบลู 19	774.11	195.41	74.39	404.8	54.00
สีรีแอกทีฟเรด 3	723.90	229.65	68.28	510.4	42.00

จากการทดลองพบว่า ผงดักแด้ใหม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลู 19 ซึ่งเป็นองค์ประกอบน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมากกว่าสีรีแอกทีฟเรด 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอเช่นเดียวกัน เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมีองค์ประกอบของสีรีแอกทีฟบลู 19 มากกว่าสีรีแอกทีฟเรด 3 ซึ่งสังเกตได้จากสีของน้ำทิ้งตัวอย่างที่ในการทดลองมีสีไปทางน้ำเงินมากกว่า จึงทำให้สามารถดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 592 นา

โนเมตรซึ่ง เป็นค่าความยาวคลื่นในการดูดกลืนสีรีแอกทีฟบลู 19 ได้สูงสุด ส่งผลให้ผงดักแด้ใหม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลู 19 ซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ และลดค่า COD ได้มากกว่าสีรีแอกทีฟเรด 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ดังแสดงในตารางที่ 13

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การเตรียมตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหม เพื่อการกำจัดสีรีแอกทีฟในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟและน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอได้ผลการศึกษาดังนี้

1. สมบัติจำเพาะของตัวดูดซับ

ปริมาณไขมัน ความชื้น เถ้า และโปรตีนในดักแด้ไหมมีค่าร้อยละ 3.07, 8.34, 4.14 และ 50.07 ตามลำดับ ชนิดกรดอะมิโนของดักแด้ไหมที่มีค่าสูงสุดคือ กรดกลูตามิก และกรดแอสพาทิก เท่ากับร้อยละ 12.55 และ 8.92 ตามลำดับ

2. สถานะการดูดซับสีรีแอกทีฟในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟโดยทำการทดลองแบบแบตช์

การศึกษาสถานะของตัวดูดซับจากผงดักแด้ไหม ในการกำจัดสีรีแอกทีฟจากสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ ได้ผลการทดลองดังนี้

2.1 สีรีแอกทีฟบลู 19

สถานะที่เหมาะสมของตัวดูดซับ คือ ค่า pH 11 ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ระยะเวลาปั่นกววน 180 นาที และระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 84.62

2.2 สีรีแอกทีฟเรด 3

สถานะที่เหมาะสมของตัวดูดซับ คือ ค่า pH 11 ปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม ระยะเวลาปั่นกววน 240 นาที และระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 81.56

3. ประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟ โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

ผงดักแดดไหมสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟ ที่ปริมาตรของสีรีแอกทีฟไหลผ่านคอลัมน์เท่ากัน คือ 50 มิลลิลิตร ที่อัตราการไหลประมาณ 1 มิลลิลิตรต่อนาที โดยผงดักแดดไหมสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 และสีรีแอกทีฟเรด 3 ในสารละลายมาตรฐานสีรีแอกทีฟได้ร้อยละ 89.62 และ 74.41 ตามลำดับ

4. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของผงดักแดดไหมที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ผงดักแดดไหมหลังผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1, 2 และ 3 สามารถดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 ได้ร้อยละ 80.21, 73.44 และ 59.89 ตามลำดับ และการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ได้ร้อยละ 76.51, 63.43 และ 43.18 ตามลำดับ ซึ่งผงดักแดดไหมสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟทั้งสองสีได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผงดักแดดไหมที่ใช้งานครั้งแรกตามจำนวนครั้งของการฟื้นฟูสภาพ โดยผงดักแดดไหมที่ใช้งานครั้งแรกสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 และสีรีแอกทีฟเรด 3 ได้ร้อยละ 84.62 และ 81.56 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสามารถทำการฟื้นฟูสภาพของผงดักแดดไหมได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นจึงสามารถรักษาประสิทธิภาพการดูดซับซึ่งยังคงมีค่าสูงไว้ได้

5. ประสิทธิภาพการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

-สถานะในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลู 19 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอได้ร้อยละ 74.39 จากค่าความเข้มข้นสีรีแอกทีฟบลู 19 เริ่มต้น 774.11 เป็น 195.41 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดค่า COD ได้ร้อยละ 54.00

-สถานะในการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอได้ร้อยละ 68.28 จากค่าความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเรด 3 เริ่มต้น 723.90 เป็น 229.65 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดค่า COD ได้ร้อยละ 42.00

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับจากผักไผ่ใหม่ในการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น รวมทั้งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดต่อไป
2. ควรมีการศึกษาถึงการกำจัดผงผักไผ่ใหม่หลังกระบวนการดูดซับแล้วอย่างเหมาะสมต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือผู้ควบคุมและผู้ปฏิบัติงานระบบบำบัดมลพิษโรงงาน. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.
- กาญจนา ครองธรรมชาติ. 2547. การกำจัดสีข้อมกลมเอโซ โดยจุลินทรีย์แบบเมดที่ไม่ใช้อากาศ. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 20(2): 77-85.
- กาวิ ศรีกุลกิจ. 2545. รายงานเรื่องหลักการข้อมสีสิ่งทอ. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- เข็มชัย เหมะจันทร์, ปราณี รัตนวลีโรจน์ และรัตเกล้า ภูติวรนาถ. 2541. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยเรื่อง การตรวจสอบทางสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมเคมีสิ่งทอ.
- นิพนธ์ และคณิดา ดังคนานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- บุญเลิศ ดีเด่น. 2537. การใช้ผักแต่้ใหม่เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนปลาป่นในอาหารไก่กระตังและไก่ไข่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- วิโรจน์ แก้วเรือง. 2540. หม่อนและไหม ฟิชและสัตว์สารพัดประโยชน์. สถาบันวิจัยไหม, กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ. 2539. การใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.

วีระพงศ์ เลิศรัตนเทวี. 2548. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานสุราโดยกระบวนการโอโซนเนชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วุฒินันท์ ศิริพงศ์. 2544. การบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมาคมอุตสาหกรรมฟอกย้อมและตกแต่งสิ่งทอไทย. 1998. **Hanbook & Directory**.

สถาบันวิจัยหม่อนไหม. 2536. ข้อมูลการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมเขตการรับผิดชอบของศูนย์วิจัยหม่อนไหม. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สมโภชน์ ทับเจริญ. 2535. อาหารหมูใหม่ใช้โปรตีนหนอนไหมสุดประหยัด. สุกรสาส์น. 19 : 5 -10.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2530. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสีย้อม: รีแอกทีฟ. มอก. 739-2530.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2546. นโยบายการปลูกหม่อนเลี้ยงไหม. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ.

หม่อน-ไหม. 2523. เอกสารวิชาการเล่มที่ 2 กรมวิชาการเกษตร งานทะเบียนและประมวลสถิติกองแผนงาน. บริษัท วรวิสาหกิจพิมพ์ จำกัด.

อดิศักดิ์ อัญชลีสังการ. 2546. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายและการดูดซับด้วยซีเถ้าแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อารยา ประดับวงษ์ และคณะ. 2547 **ประสิทธิภาพการดูดซับสีจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยเปลือกหอยเชอรี่ และเปลือกหอยแครง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อมรรัตน์ สวัสดิ์ทิต. 2519. ดักแด้ใหม่. วิทยาศาสตร์เกษตร. 9:609-615.

อัญราพร ไสลสุต. 2527. **คู่มือการย้อมสี**. พิมพ์ครั้งที่ 2 . สำนักพิมพ์อักษรบัณฑิต, กรุงเทพฯ.

A. O. A. C. 2000. **Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. Wasington, D.C.

Abraham, R. and H.S. Freeman. 1996. **Environmental Chemistry of Dye and Pigments** . John Wiley & Sons, Inc. New York.

Chang, T.N. 1988. **Color removal from on – Nooch leachate by chemical treatment**. M.S. Thesis, AIT.

Cheasavathi, T. 1992. **Removal of color, COD and manganese from wastewater of jean bleaching factory by chemical coagulation with aluminum sulfate**. M.S. Thesis, Kasetsart University.

Ghash, M.M., F.E. Woodard, O.T. Sproul, P.B. Knowlfon and P.D. Gvertin. 1978. Treatability studies and desingm considerations for textile wastewater. **Water and Waste End**. 15(4): 35-41.

Joachim, W. H. and F. P. Pascual. 2000. **Handbook on Ingredients for Aquaculture Feeds**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- Maron, S.H. and C.F, Prutton. 1961. **Principle of Physical Chemistry**. 3rd ed. Macmillan, Co. New York.
- Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse**. 3rd ed., McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Noroozi, B., G.A. Sorial, H. Bahrami and M. Arami. 2007. Equilibrium and kinetic adsorption study of a cationic dye by a natural adsorbent-Silkworm pupa. **Journal of Hazardous Materials**. B139 : 167-174.
- Thangamani. K.S., M. Sathishkumar, Y. Sameena, N. Vennilamani, K. Kadirvelu, S. Patabhi and S.E. Yun. 2007. Utilization of modified silk cotton hull waste as an adsorbent for the removal of textile dye (reactive blue MR) from aqueous solution . **Bioresource Technology**. 98 : 1265-1269.
- Trayball, R.E., 1980. **Mass Transfer Operation**. 3rd ed. McGraw-hill, New York.
- Zollinger, H. 2003. **Color Chemistry** : Syntheses, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments. 3rd ed. Weinheim, Inc, New York.

ภาคผนวก

แสดงผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม
และค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
3	43.35	55.33	49.25	46.30	5.99
5	41.30	45.68	41.31	41.31	2.53
7	42.50	42.30	47.09	42.40	2.71
9	66.81	46.47	54.57	50.52	10.24
10	80.35	74.03	68.22	71.13	6.07
11	82.50	86.12	82.42	82.46	2.11
12	77.70	84.13	79.44	78.57	3.33

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม
และค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
3	32.37	34.24	33.74	33.99	0.97
5	23.67	23.13	24.99	23.40	0.96
7	29.98	28.57	28.97	28.77	0.73
9	30.79	30.09	31.99	30.44	0.96
10	34.65	35.13	34.99	35.04	0.24
11	39.51	40.17	41.35	39.84	0.93
12	35.84	36.97	36.52	36.75	0.57

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟฟลู 19 ของผงดักแดดใหม่ และปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณตัว ดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟฟลู 19				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	78.39	84.85	83.32	84.08	3.38
2	94.01	91.10	90.91	90.01	1.74
3	92.97	93.28	93.41	92.35	0.23
4	93.98	94.81	93.48	93.73	0.67
5	95.05	94.76	94.21	95.32	0.43
6	95.62	95.98	94.24	95.39	0.92
7	95.61	95.86	95.45	95.43	0.21
8	95.67	95.49	95.28	95.48	0.20

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 3 ของผงดักแดดใหม่ และปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณตัว ดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 3				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	44.59	35.81	37.68	36.75	4.62
2	59.95	63.59	62.75	63.17	1.91
3	77.99	75.82	73.61	76.91	2.19
4	85.71	86.01	85.48	85.60	0.27
5	88.64	86.99	89.53	89.09	1.29
6	94.25	93.11	92.76	92.54	0.78
7	92.88	92.35	91.35	92.61	0.78
8	95.09	93.18	92.73	92.95	1.26

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟฟลู 19 ของผงคักแค้ใหม่
และระยะเวลาปั่นกวน

ระยะเวลา ปั่นกวน (นาที)	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟฟลู 19				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
15	41.76	30.25	45.65	43.71	8.01
30	58.37	59.69	53.45	56.57	3.29
60	67.01	72.42	70.01	71.22	2.71
90	76.61	71.92	74.92	75.77	2.38
120	78.56	77.25	76.01	77.63	1.28
180	82.29	82.21	80.93	82.25	0.76
240	82.32	84.41	82.56	82.44	1.14
300	84.52	82.76	82.56	82.66	1.08
360	82.48	85.93	82.98	82.73	1.86

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 3 ของผงดักแดดไหม
และระยะเวลาปั่นกว

ระยะเวลา ปั่นกว (นาท)	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 3				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
15	42.35	48.91	45.81	47.36	3.28
30	58.60	57.59	56.38	58.60	1.11
60	60.33	61.13	69.84	60.73	5.27
90	71.69	67.98	61.29	69.73	5.27
120	71.88	78.12	71.63	71.76	3.68
180	79.53	80.08	81.03	79.81	0.76
240	85.14	88.36	87.01	87.69	1.62
300	87.71	87.87	88.46	87.79	0.40
360	87.94	87.66	88.54	87.80	0.45

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟปดูลู 19 ของผงดักแดดใหม่ และระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลา สัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟปดูลู 19				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
10	76.82	75.59	75.20	75.39	0.85
20	77.11	77.38	80.12	77.26	1.67
30	74.30	78.76	81.45	79.44	3.61
60	81.07	82.16	82.63	82.39	0.80
90	83.06	82.65	84.62	82.86	1.04
120	84.28	85.53	80.79	84.62	2.46
150	84.36	84.88	81.65	84.68	1.73
180	83.90	84.45	84.91	84.91	0.51

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 3 ของผงดักแดดใหม่ และระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลา สัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 3				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
10	71.10	69.44	72.02	71.56	1.31
20	70.32	80.57	75.10	72.71	5.13
30	77.57	76.66	77.09	76.88	0.46
60	77.42	79.31	78.37	78.34	0.95
90	80.60	80.41	79.40	80.51	0.65
120	81.94	81.58	84.77	81.56	1.75
150	81.29	82.04	81.66	81.67	0.38
180	82.27	81.85	81.65	81.75	0.32

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรเอกทีฟบลู 19 ของผงดักแดดไหม
และความเข้มข้นสรีรเอกทีฟเริ่มต้น

ความเข้มข้น สรีรเอกทีฟเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับสรีรเอกทีฟบลู 19				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
100	96.22	95.83	95.07	96.03	0.58
200	96.22	94.85	94.13	94.49	1.06
300	93.80	93.35	93.64	93.72	0.23
400	92.66	92.48	92.45	92.46	0.11
500	90.65	89.78	90.11	89.94	0.44
600	86.32	85.85	87.04	86.08	0.60
700	82.07	82.62	82.54	82.58	0.30
800	65.14	69.72	67.18	66.16	2.29
900	60.71	61.02	60.36	60.87	0.77
1000	56.37	55.46	56.32	56.35	0.27

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ของผงดักแดดไหม
และความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเริ่มต้น

ความเข้มข้น สีรีแอกทีฟเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
100	83.17	82.34	82.01	82.18	0.60
200	79.29	79.93	77.97	79.45	1.00
300	72.13	76.03	77.74	77.39	2.88
400	73.45	70.03	75.56	74.51	2.79
500	51.18	45.27	54.64	52.92	4.74
600	46.49	46.58	46.04	46.54	3.00
700	40.44	41.95	41.69	41.82	7.25
800	37.15	38.09	37.39	37.27	1.88
900	34.14	34.61	34.39	35.50	3.25
1000	30.78	31.11	30.75	30.77	2.43

ตารางผนวกที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีรแอทไฟฟลู 19 ของผงดักแด้ไหม

ปริมาณ ดักแด้ไหม (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
5	100	3.11	0.05	1.21	0.8257	0.3215	0.0832	0.4928
5	200	8.98	0.05	2.39	0.4188	0.1114	0.3780	0.9533
5	300	17.52	0.05	3.53	0.2832	0.0571	0.5479	1.2435
5	400	34.84	0.05	4.56	0.2191	0.0287	0.6594	1.5421
5	500	58.31	0.05	5.52	0.1811	0.0171	0.7420	1.7657
5	600	71.82	0.05	6.60	0.1515	0.0139	0.8197	1.8562
5	700	81.43	0.05	7.73	0.1293	0.0123	0.8883	1.9108
5	800	91.63	0.05	8.85	0.1129	0.0109	0.9472	1.9620
5	900	125.72	0.05	9.68	0.1033	0.0080	0.9858	2.0994
5	1000	148.63	0.05	10.64	0.0940	0.0067	1.0270	2.1721

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับสรีแอกทีฟเรด 3 ของผงดักแด้ไหม

ปริมาณ ดักแด้ไหม (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
6	100	13.36	0.05	0.72	1.3850	0.0749	-0.1415	1.1258
6	200	41.10	0.05	1.32	0.7552	0.0243	0.1219	1.6138
6	300	67.83	0.05	1.93	0.5169	0.0147	0.2866	1.8314
6	400	98.53	0.05	2.51	0.3980	0.0101	0.4001	1.9936
6	500	143.83	0.05	2.97	0.3369	0.0070	0.4725	2.1578
6	600	196.43	0.05	3.36	0.2973	0.0051	0.5267	2.2932
6	700	221.32	0.05	3.99	0.2507	0.0045	0.6009	2.3450
6	800	267.43	0.05	4.44	0.2253	0.0037	0.6472	2.4272
6	900	397.47	0.05	4.19	0.2388	0.0025	0.6220	2.5993
6	1000	437.93	0.05	4.68	0.2135	0.0023	0.6706	2.6414

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทไฟปดู 19 ของผงคักเค้ใหม่และ ปริมาตรสรีรแอทไฟปดู 19 ที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรสรีรแอทไฟปดู 19 ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	สรีรแอทไฟปดู 19				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
50	91.56	87.67	76.13	89.62	8.02
100	87.22	63.61	59.72	61.67	14.88
150	79.71	46.21	55.13	50.67	17.35
200	67.60	41.46	37.37	39.42	16.40
250	55.97	34.75	31.26	33.01	13.37

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสรีรแอทไฟเรด 3 ของผงคักเค้ใหม่และ ปริมาตรสรีรแอทไฟเรด 3 ที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรสรีรแอทไฟเรด 3 ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับ			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	สรีรแอทไฟเรด 3				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
50	79.09	77.69	66.46	74.41	6.92
100	75.75	71.86	53.39	67.00	11.95
150	66.09	60.38	50.04	58.84	8.14
200	62.27	50.05	40.01	50.78	11.15
250	59.39	38.56	33.18	43.71	13.84

ตารางผนวกที่ 15 การดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19 ของผงดักแค้ใหม่โดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟบลู 19				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ใช้งานครั้งแรก	84.28	85.53	80.79	84.62	2.46
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	80.39	81.49	80.02	80.21	0.76
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	73.96	76.93	72.91	73.44	2.09
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	54.25	60.32	59.47	59.89	3.29

ตารางผนวกที่ 16 การดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3 ของผงดักแค้ใหม่ โดยผ่านการใช้งานและฟื้นฟูสภาพแล้ว

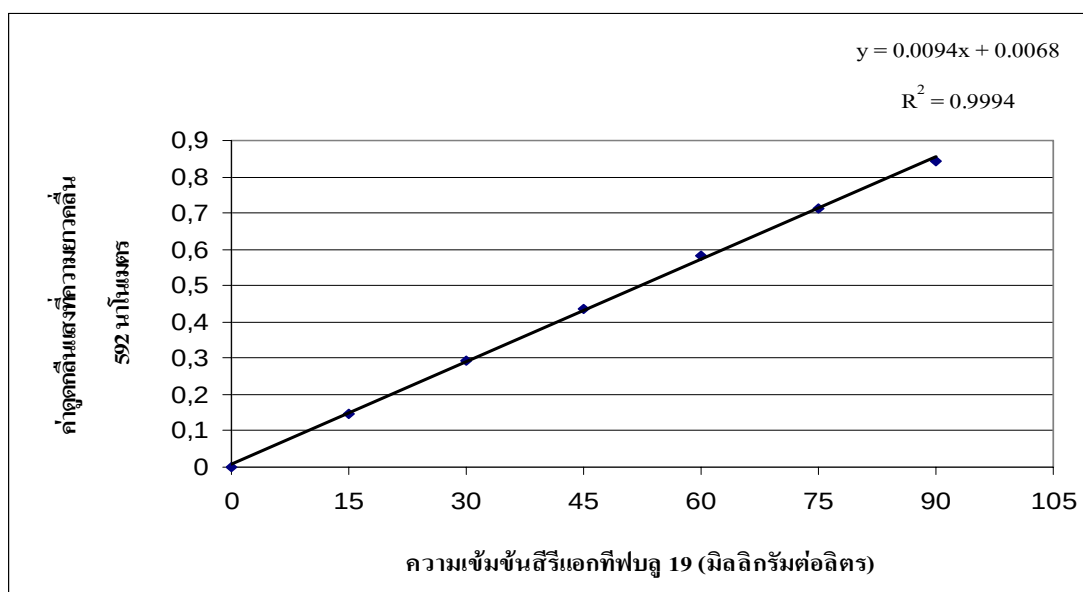
การฟื้นฟูสภาพ	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 3				S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ใช้งานครั้งแรก	81.94	81.58	84.77	81.56	1.75
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1	76.59	75.93	76.43	76.51	0.34
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 2	63.42	62.11	63.43	63.43	0.76
ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3	43.36	44.95	42.99	43.18	1.04

ตารางผนวกที่ 17 การดูค่าสีรีแอกทีฟในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ของผงดักแด้ไหม

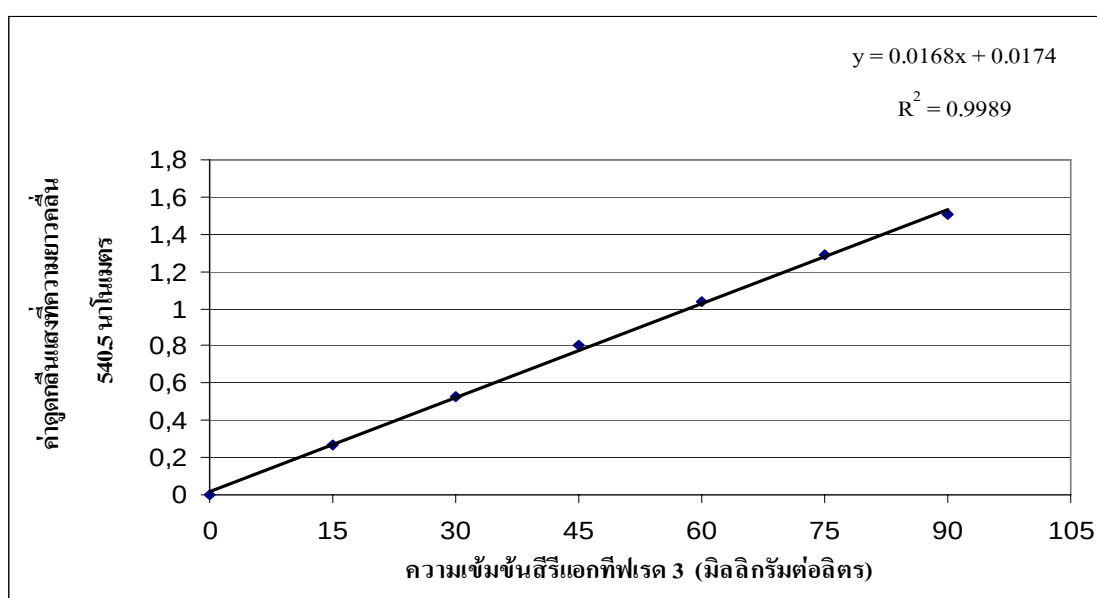
สีรีแอกทีฟ	ร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟน้ำทิ้ง				S.D.
	จากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
สีรีแอกทีฟบลู 19	70.11	75.15	73.63	74.39	2.59
สีรีแอกทีฟเรด 3	68.52	69.54	68.03	68.28	0.77

ตารางผนวกที่ 18 ค่า COD น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอหลังจากผ่านกระบวนการดูค่าสีรีแอกทีฟของ ผงดักแด้ไหม

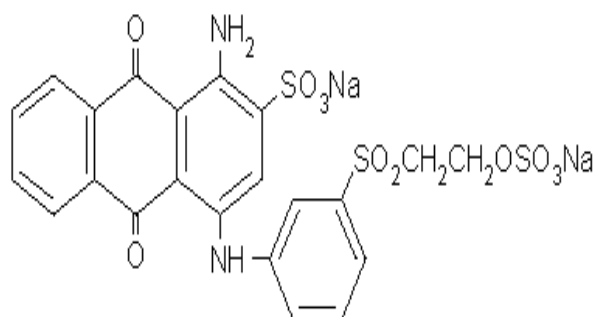
สีรีแอกทีฟ	ค่า COD น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอหลังจาก				S.D.
	ผ่านกระบวนการดูดซับ (mg/l)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
สีรีแอกทีฟบลู 19	422.4	387.2	404.8	404.8	20.24
สีรีแอกทีฟเรด 3	528	492.8	510.4	510.4	19.64



ภาพผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 592 นาโนเมตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมที่ฟลูออโร 19

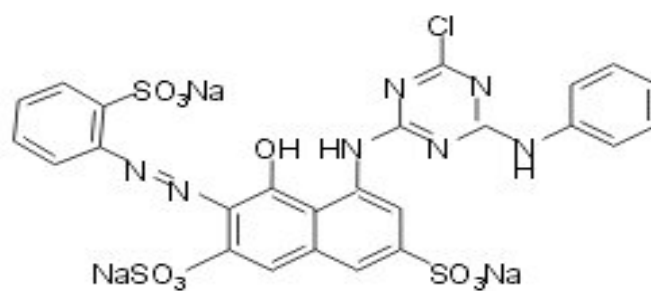


ภาพผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540.5 นาโนเมตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมที่ฟลูออโร 3



ภาพผนวกที่ 3 โครงสร้างสีรีแอทีฟบลู 19

ที่มา : Sheng และ Cheng (2000)



ภาพผนวกที่ 4 โครงสร้างสีรีแอทีฟเรด 3

ที่มา : Sheng และ Cheng (2000)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายชาติชาย อิ่มเกษรรุ่งเจริญ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 4 พฤศจิกายน 2526
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศิริราช
ประวัติการศึกษา	ศึกษาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรและสิ่งแวดล้อมศึกษา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนราชกรีฑาสโมสร