



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชา

เรื่อง การใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจาก
โรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

The Utilization of Chitosan from Shrimp Shell and Commercial Chitosan to Remove
Dyes in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project

นามผู้วิจัย นางสาวจุฑารัตน์ ควรดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... รองศาสตราจารย์กณิดา ดังคนานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสีย
จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคลองตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

The Utilization of Chitosan from Shrimp Shell and Commercial Chitosan to Remove Dyes
in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project

โดย

นางสาวจุฑารัตน์ กวรดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

จุฬารัตน์ ควรดี 2556: การใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กำจัดสี
ย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอยุ่ดง (พื้นที่ทรงงาน)
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)
สาขาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม. 95 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของไคโตซานจาก
เปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ ในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจาก
โรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอยุ่ดงฯ โดยทำการทดลองแบบเบดซ์และการนำไปประยุกต์ใช้
งานจริง สีย้อมผ้าที่ทำการศึกษาคือสีย้อมรีแอคทีฟทั้งหมด 9 ชนิดคือ 2% Yellow LS-R-01, 2%
Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy
LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G จากการทดลองแบบเบดซ์เพื่อหาสภาวะที่
เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมผ้า ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือได้แก่ ปริมาณไคโตซาน (0.5-3.0 กรัม) พีเอช
(5-9) ความเร็วรอบการเขย่า (0-200 รอบต่อนาที) ระยะเวลาการเขย่า (0-120 นาที) ระยะเวลากำจัด
(0-120 นาที) และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการทดลองพบว่า
ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด
คิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 99.22 และ 96.48 ตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ปริมาณไคโต
ซาน 2.0 กรัม พีเอช 7 ความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 60 นาที ระยะเวลา
กำจัด 60 นาที และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร การกำจัดสีย้อมผ้าของตัว
ดูดซับทั้งสองชนิดสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช สำหรับการทดลองเพื่อนำไปประยุกต์ใช้
งานจริงพบว่า การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอยุ่ดงฯ ด้วยไคโต
ซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์สามารถได้ร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 73.93 และ 68.69
ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า ไคโตซานทั้งสองชนิดสามารถบำบัดมลสารอื่น ๆ ได้ จากการ
พิจารณาค่าการนำไฟฟ้า ความขุ่น ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำ
ทั้งหมด น้ำมันและไขมัน ดีโอ บีโอดี และซีโอดี และลดค่าพีเอชจาก 9.3 เป็น 8.5 ในน้ำเสียได้อีก
ด้วย

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Jutarat Kuandee 2013: The Utilization of Chitosan from Shrimp Shell and Commercial Chitosan to Remove Dyes in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 95 pages.

The objective of this research was to study the optimal conditions and efficiency of chitosan from shrimp shell and commercial chitosan to remove dyes in textile synthetic wastewater and real wastewater from Doi Tung development project by batch experiments and real work application. The nine types of reactive dyes were 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN and 2% Br.Blue LS-G. Batch experiments were carried out for finding the dyes removal optimum condition. The studied factors were chitosan dose (0.5-3.0 g.), pH (5-9), shaking speed (0-200 rpm.), shaking time (0-120 min.), removal time (0-120 min.) and the concentration of synthetic wastewater (0-50 mg/L). The results show that, chitosan from shrimp shell and commercial chitosan gave the average efficiency of the removal of nine dyes at 99.22% and 96.48% respectively under the optimal condition, which were chitosan dose 2 g., pH 7, shaking speed 150 rpm., shaking time 60 min., removal time 60 min and the concentration of synthetic wastewater 10 mg/L. Both adsorbents of dyes removal were conformed to the Freundlich isotherm. For real work application experiment, the removal performance of dyes in textile wastewater from Doi Tung Development Project with chitosan from shrimp shell and commercial chitosan 73.93% and 68.69% respectively. In addition, the conductivity, turbidity, total solids, total suspended soild, total dissolved solids, fat oil and grease, DO, BOD and COD can be removed and decreased pH in wastewater from 9.3 to 8.5 by two types of chitosans.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ กรรมการร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ทำการศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมผักเป็ดอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาออยดุงฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างสีย้อมผ้าสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าออยดุง ตลอดจนทั้งเจ้าหน้าที่ที่ให้ความร่วมมือในการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อชูเกียรติ คุณแม่ขวัญใจ และคุณพี่วัจนรัตน์ ควรรติ ที่คอยเป็นแรงผลักดัน ให้กำลังใจ ช่วยเหลือ และสนับสนุนผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกาย และกำลังใจในการศึกษาวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จุฑารัตน์ ควรรติ

มกราคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	75
สรุป	75
ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ภาคผนวก	80
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	95

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี	11
2	ค่าที่แอลวีของสาร	18
3	ความเป็นพิษของสารที่ค่าแอลดี 50 ต่าง ๆ	19
4	ค่าแอลดี 50 ของสีย้อมเปรียบเทียบกับไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารพิษร้ายแรง	20
5	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำทั้งด้วยวิธีต่าง ๆ	22
6	ความยาวคลื่นที่สีย้อมผ้าแต่ละสีดูดกลืนแสงได้มากที่สุด	51
7	สมการเชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกราฟมาตรฐานสีย้อมผ้า 9 ชนิด	57
8	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์	68
9	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงฯ	70
10	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงฯ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์	72
11	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงฯ ภายหลังการกำจัดสีย้อมผ้าโดยใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์เป็นตัวดูดซับ	74

ตารางผนวกที่

1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซานเริ่มต้น 2.0 กรัม	85
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 7	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที	87
4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 60 นาที	88
5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลากำจัด 60 นาที	89
6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร	90
7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซานที่เหมาะสม 2.0 กรัม	91
8 ไอโซเทอร์มการดูดซับของไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	91
9 ไอโซเทอร์มการดูดซับของไคโตซานเชิงพาณิชย์	92
10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับการใช้งานซ้ำ	92
11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคลองฯ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซาน 400 กรัม โดยการประยุกต์ใช้งานจริง	94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของไคโตซาน	3
2	ขั้นตอนในการดูดซับ	25
3	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	26
4	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	27
5	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	27
6	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	29
7	ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	29
8	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	33
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	36
10	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	37
11	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช	38
12	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	39
13	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	40
14	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	40
15	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	41
16	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	42
17	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	43
18	ไคโตซานเชิงพาณิชย์	50
19	การทดลองในระดับ pilot scale	55
20	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	56
21	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซานเริ่มต้น	58
22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเร็วรอบการเขย่า	60
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า	61
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลากำจัด	62
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์	63
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซานที่เหมาะสม	64
28	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	65
29	ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	65
30	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์	66
31	ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์	67
32	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับการใช้งานซ้ำ	70
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอยุธยา ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์โดยการประยุกต์ใช้งานจริงกับปริมาณไคโตซาน	73

ภาพผนวกที่

1	กราฟมาตรฐานสี 2% Yellow LS-R-01	81
---	---------------------------------	----

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
2	กราฟมาตรฐานสี 2% Yellow LS-4G	81
3	กราฟมาตรฐานสี 2% Orange LS-BR	82
4	กราฟมาตรฐานสี 2% Red LS-B	82
5	กราฟมาตรฐานสี 2% Blue LS-3R	83
6	กราฟมาตรฐานสี 6% Super Black G	83
7	กราฟมาตรฐานสี 4% Navy LS-G	84
8	กราฟมาตรฐานสี 2% Turquoise H-GN	84
9	กราฟมาตรฐานสี 2% Br.Blue LS-G	85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
COD	=	Chemical Oxygen Demand
DO	=	Dissolve Oxygen
L	=	Liter
mg/L	=	milligram per Liter
min	=	minute
nm	=	nanometer
NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit
rpm	=	rotation per minute
$\mu\text{s/cm}$	=	microsiemens per centimeter

**การใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสีย
จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ**

**The Utilization of Chitosan from Shrimp Shell and Commercial Chitosan
to Remove Dyes in Textile Wastewater from Doi Tung Development Project**

คำนำ

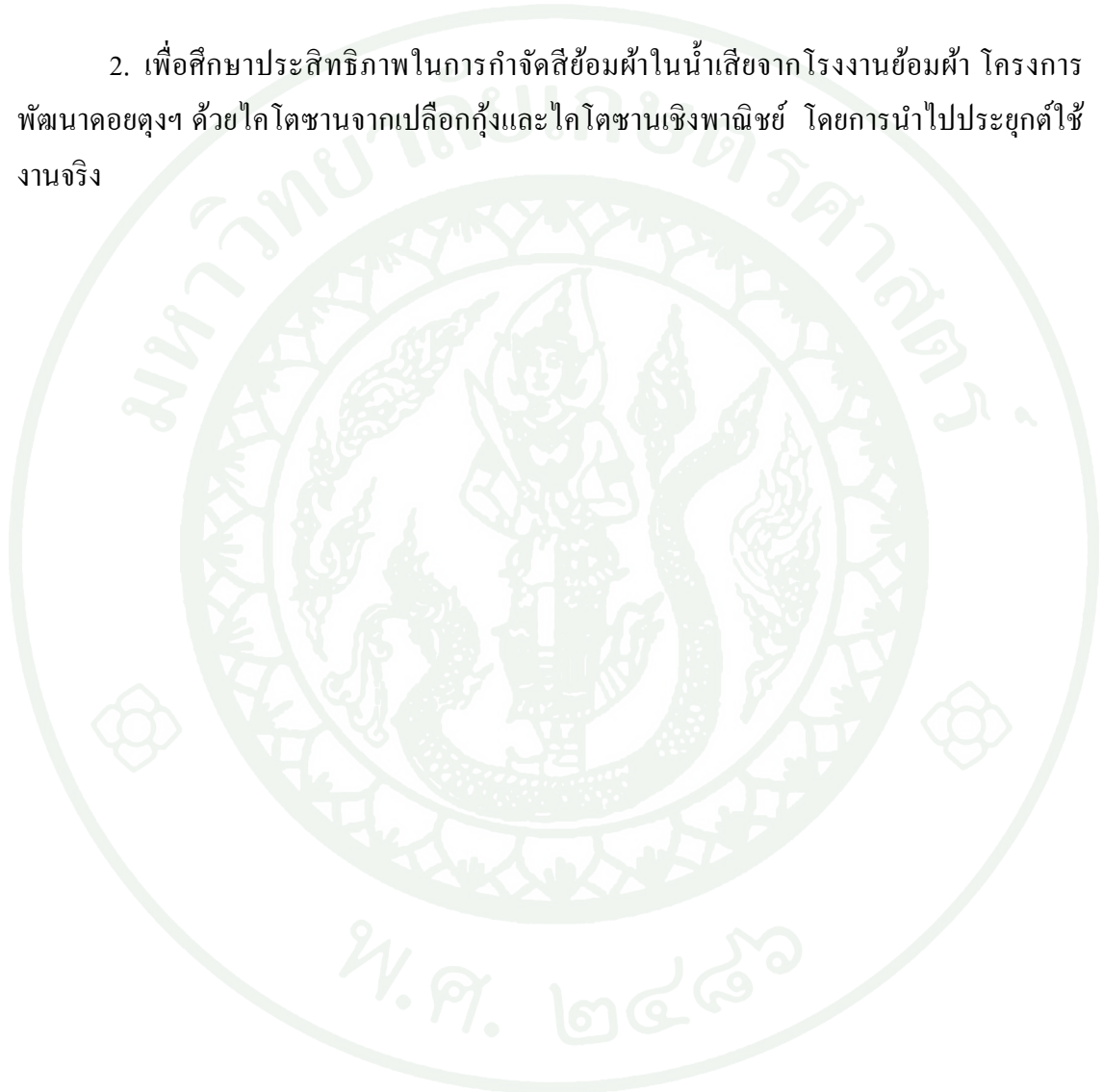
ไคโตซาน เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงบวก มีสมบัติเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์แบบเส้นตรง (linear polyelectrolyte) มีความหนาแน่นของประจุสูง ในสถานะที่เป็นกรดหมู่อะมิโนของไคโตซานสามารถยึดจับกับประจุลบที่ผิวได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และย่อยสลายได้ง่ายทางธรรมชาติ ด้วยคุณสมบัติพิเศษดังกล่าวของไคโตซาน ประกอบกับสีย้อมผ้าที่ใช้ในโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาโดยตุงฯ เป็นสีย้อมประเภทรีแอคทีฟ (reactive dyes) ซึ่งมีหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3^-$) สามารถดูดซับด้วยไคโตซานได้ดี

ผู้วิจัยจึงศึกษาการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยผู้วิจัยจะเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้ง ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหารและการบริโภคกุ้ง รวมทั้งประเทศไทยถือว่ามีความพร้อมและความได้เปรียบด้านวัตถุดิบเปลือกกุ้ง เนื่องจากมีศักยภาพในการส่งออกกุ้งแช่แข็งเป็นสินค้าส่งออกอันดับต้น ๆ ของโลก ซึ่งเป็นการนำทรัพยากรที่มีอย่างสิ้นเหลือของประเทศมาใช้ประโยชน์

การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้เพื่อการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงฯ โดยใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ ในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัด ด้วยวิธีแบบเบ็ดเสร็จในระดับห้องปฏิบัติการ และการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

วัตถุประสงค์

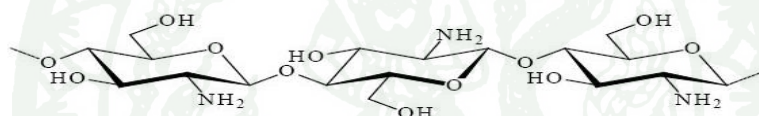
1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดุษฎี ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง



การตรวจเอกสาร

1. ไคโตซาน

ไคโตซาน คือ สารโพลิเมอร์ชีวภาพที่สกัดจากไคติน ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างที่สำคัญของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ได้แก่ สัตว์ในกลุ่มอาร์โทพอด เช่น กุ้ง ปู หอย รวมทั้งในผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น เห็ด รา คือการนำเอาอนุพันธ์ของไคตินที่ตัดเอาหมู่ acetyl ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกตั้งแต่ 50% ขึ้นไป มีสมบัติละลายในกรดอ่อน มีความเสถียรสูงสามารถเสถียรได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 260°C จึงจะสลายตัว และมีสี grayish-white มีชื่อทางเคมีว่า poly-β-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose หรือ Poly-(N-glucosamine) มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{11}NO_4)_n$ ดังภาพที่ 1 (พัฒน์, 2545)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของไคโตซาน

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2552)

1.1 คุณสมบัติของไคโตซาน

1.1.1 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

ในธรรมชาติไคโตซานจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1.0×10^5 ถึง 1.2×10^6 ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิต

1.1.2 การละลาย (Solubility)

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์สายยาวที่มีประจุบวก (Cationic polymer) เนื่องจากมีหมู่อะมิโน (NH_2) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้หลายชนิด ไคโตซานไม่ละลายในน้ำแต่จะละลายได้ดีในกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก กรดมาลิก กรดแลคติก กรดซิตริก เป็นต้น และสามารถละลายได้ในสารละลายที่มีพีเอชน้อยกว่า 5.5 (Winterowd and Sandford, 1995)

1.1.3 ค่าระดับของการเกิดดีอะซีทิลเลชัน (Degree of deacetylation, %DD)

เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างโมโนเมอร์สองชนิดคือ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนของ D-glucosamine มากกว่า N-acetyl-D-glucosamine คือ มีค่า Degree of deacetylation สูง ก็คือมีการกำจัดเอาหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกตั้งแต่ 50% ขึ้นไปจะแสดงสมบัติของไคโตซาน (ศิริณา, 2544)

1.1.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่า Degree of deacetylation น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้นของ ionic strength ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืดที่แตกต่างกัน (ศิริณา, 2544)

1.1.5 การตกตะกอน (Coagulate ability)

ไคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน (floculate and coagulating agent) ที่ดี เนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถจับกับสารที่เป็นประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถจับกับโลหะหนัก เช่น ทองแดง เหล็ก และสังกะสีได้ โดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้ไอออนโลหะสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อน (coordinate) กับหมู่อะมิโนได้ (ขวัญฤทัย, 2545)

1.2 กระบวนการสกัดไคโตซาน

กระบวนการสกัดไคโตซานมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ การสกัดไคโตซานทางเคมีและการสกัดไคโตซานทางเทคโนโลยีชีวภาพ สามารถสรุปได้ดังนี้

1.2.1 การสกัดไคโตซานทางเคมี แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ก. การสกัดแยกโปรตีน (Deproteination) ไคตินมักอยู่ร่วมกับโปรตีน มีการจับกันอย่างหลวม ๆ ด้วยพันธะไฮโดรเจน หรือพันธะโควาเลนต์ เกิดเป็นสารประกอบไกลโคโปรตีน มีสัดส่วนของไคตินและโปรตีนแตกต่างกัน (Austin *et al.*, 1981) ทำให้การกำจัดโปรตีนมีความยากง่ายต่างกันออกไป

ข. การสกัดแยกเกลือแร่ (Demineralization) การกำจัดแร่ธาตุส่วนใหญ่นิยมใช้กรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟริก ซึ่งละลายแคลเซียมคาร์บอเนตให้อยู่ในรูปแคลเซียมคลอไรด์ และเหลือไคตินซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่การกำจัดแร่ธาตุที่ดีควรใช้กรดที่มีความเข้มข้นต่ำในเวลาที่เหมาะสม และมีการคนอย่างสม่ำเสมอ

ค. การกำจัดหมู่อะซิติล (Deacetylation) ทำได้โดยใช้สารละลายด่าง ซึ่งสารละลายด่างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40-60 (น้ำหนักต่อปริมาตร) การใช้สารละลายด่างเข้มข้นที่อุณหภูมิสูงในเวลาอันสั้น จะทำให้การกำจัดหมู่อะซิติลเกิดได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากไคตินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้มีความต้านทานการดึงหมู่อะซิติล จึงมีความหนาแน่นของเซลล์ในโครงสร้างผลึกของไคติน พันธะไฮโดรเจนระหว่างอะตอมไนโตรเจน และหมู่คาร์บอกซิล (Muzzarelli, 1976)

1.2.2 การสกัดไคโตซานทางเทคโนโลยีชีวภาพ

การสกัดไคโตซานทางเทคโนโลยีชีวภาพเป็นวิธีที่สามารถควบคุมกระบวนการคุณภาพของการผลิต และสามารถหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่รุนแรงได้ โดยใช้จุลินทรีย์แลคโตบาซิลลัส (*Lactobacillus*) เพื่อเอาโปรตีนออกแทนการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ศิริภา, 2544)

1.3 การใช้ประโยชน์ของไคโตซาน

ไคโตซานถูกพิจารณาในแง่ของสารที่เป็นเบสอ่อนที่มีคุณสมบัติเป็น cationic polyelectrolyte สามารถเกิดประจุบวกจับกับสารที่มีประจุลบได้ดี เนื่องจากมีหมู่เอมีนอิสระบนหมู่อะมิโน ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ให้สารละลาย และอนุพันธ์ต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติหลากหลาย สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางดังนี้

1.3.1 ด้านการบำบัดน้ำเสีย

ไคโตซานมีคุณสมบัติเป็นสารโพลีอิเล็กโทรไลต์แบบเส้นตรง (Linear polyelectrolyte) มีความหนาแน่นทางประจุสูงจึงใช้ไคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอน และตกตะกอน (floculate and coagulating agent) ที่ดี เนื่องจากการมีหมู่อะมิโนที่สามารถจับกับสารที่เป็นประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และโพลีเมอร์อื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถจับกับโลหะหนักพวก Chelate metation ได้ เช่น ทองแดง เหล็ก และสังกะสี โดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้อิออนโลหะสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อน (coordinate) กับหมู่อะมิโน และมีงานวิจัยที่พบว่า ไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีธรรมชาติที่เกิดจากการเน่าเปื่อยย่อยสลายของพืชในแหล่งน้ำได้ดีด้วย (สุภาวดี และคณะ, 2550)

1.3.2 ด้านการเกษตร

นำไคโตซานและไคตินโปรตีนคอมเพล็กซ์มาทดแทนสารเคมีบางชนิดที่ใช้ในการกำจัดเชื้อรา *Sclerotium rolfii* ซึ่งทำให้เกิดโรคโคนเน่าในพืชตระกูลถั่ว โดยไคโตซานจะเป็นตัวชักนำยีนที่ต่อต้านเชื้อโรคพืช ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตให้เพิ่มมากขึ้น ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินทางด้านอินทรีย์วัตถุ

1.3.3 ด้านเภสัชกรรม

ไคโตซานสามารถใช้นำส่งตัวยาได้อย่างมีระบบเข้าไปยังร่างกายหรือเฉพาะที่ได้ สามารถใช้ในรูปแบบประจุเวลาเพื่อปล่อยตัวยาวอย่างช้า ๆ ตามเวลา ใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น ครีมและโลชั่นให้ความชุ่มชื้น (moisturizer) ผลิตภัณฑ์บำรุงรักษาผม ใช้ในการดูดซับโลหะหนักในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

1.3.4 ด้านการแพทย์

นำไคโตซานมาทำเป็นเยื่อไคโตซานรูปฝ้ายพันแผล ช่วยในการรักษาและด้านการติดเชื้ของบาดแผล สามารถทำให้นื้อเยื่อเป็นปกติ ทำให้เซลล์เม็ดเลือดขาวมารวมตัวอย่างรวดเร็วที่บริเวณแผล นำมาประยุกต์ใช้ในกรณีแผลไฟไหม้โดยแปรรไคโตซานให้อยู่ในรูปไคโตซานอะซิเตทเป็นสารละลายใส่แผลโดยตรง จะช่วยบรรเทาอาการปวดและลดการติดเชื้ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ไคโตซานด้านการแพทย์อีกหลายอย่าง ได้แก่ การรักษากระดูกและฟัน การผ่าตัด การรักษาโรคตาและเหงือก

1.3.5 ด้านอาหาร

ใช้เป็นองค์ประกอบของอาหารหลายรูปแบบ ได้แก่ อาหารบำรุงสุขภาพ (nutraceuticals) ใช้ในการช่วยลดคอเลสเตอรอลในเลือดที่เป็นปัจจัยเสี่ยงของโรคหัวใจ นำมาใช้ในการตกตะกอนไวน์ขาวและไวน์แดงได้ดี ใช้เป็นฟิล์มเคลือบอาหาร ช่วยในการลดแบคทีเรียและยืดอายุการเก็บได้นานขึ้น สามารถดัดแปลงไปใช้ได้กับเนื้อสัตว์และอาหารทะเลได้ โดยการแปรรให้อยู่ในรูปของ SPH (shrimp protein hydrolysate) ใช้ผลิตซอสปรุงรสกุ้ง และใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นกุ้ง

1.3.6 ด้านอื่น ๆ

นำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์กระดาษและสิ่งทอ ได้แก่ การผลิตไส้กรองสำหรับน้ำและอากาศ บรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับอาหารหรือผลิตผลทางการเกษตร ทำไคโตซานไฮพอลิโซนิค (polysonic) เป็นไฮที่ทำจากเยื่อไม้ นำมาทอกับเส้นใยฝ้ายเพื่อใช้ในการทำชุดชั้นใน มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกลิ่นและเชื้อราที่ทำให้เกิดอาการผื่นคัน

2. สีย้อม

2.1 คุณลักษณะของสีย้อม

สีย้อม (dyestuff) คือ สียชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมวัสดุสิ่งทอ โดยสีย้อมเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียดที่สร้างมาเพื่อดูดซึมหรือดูดซับแสงโดยการทำให้ยู่บนหรือในผิวหน้าของวัตถุ แล้วเกิดการแพร่แทรกซึมเข้าสู่ภายในโครงสร้างของวัตถุ เพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ กันไป ซึ่งสายตาสถาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาออกมาเป็นสีต่างกันไป ซึ่งความคงทนจะต่างกันออกไปตามแต่ละประเภท และการยิดเกาะของสีประเภทนั้น ๆ ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.1.1 สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากถั่วมะเกลือ สีนํ้าเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกระดังงา สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

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

สีย้อมถูกผลิตขึ้นมามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการใช้งานกับเส้นใยและกระบวนการย้อม การย้อมสีเส้นใยให้ได้ผลขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการ

รวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสภาวะนี้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอม ซึ่งถูกจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใย แล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยได้คือ พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไอออน และพันธะโควาเลนต์ (กาวิ, 2545ก)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกันไป แรงดึงดูดทางเคมีที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุดได้แก่ พันธะโควาเลนต์ นอกจากอิทธิพลของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลของรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติด หรือมีผลกระทบต่อการใช้ย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดเล็กและยาวเท่าไร ก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนมีความกว้างและความยาวมาก ๆ จะทำให้เกิดการยึดติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น

2.2 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกได้หลายแบบดังต่อไปนี้ (กาวิ, 2545ข)

2.2.1 จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี สีย้อมที่จำหน่ายในปัจจุบัน มีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่เป็นโครงสร้างหลัก ๆ อยู่มากกว่า 30 ชนิด แต่ที่ใช้งานกันมากจริง ๆ มีอยู่ไม่ถึง 10 ชนิด ซึ่งโครงสร้างที่สำคัญได้แก่

ก. สีย้อมอะโซ (Azo dyes) คือ สีย้อมที่มีกลุ่มอะโซ ($N=N$) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 50 ของสีย้อมที่ใช้ทั้งหมด คุณลักษณะที่สำคัญของสีย้อมในกลุ่มนี้คือ มีสีให้เลือกครบทุกโทนสี แต่โดยทั่วไปจะมีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และดำ มีกรรมวิธีการสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความเสถียรและความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี และราคาไม่แพง

ข. สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) เป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล และส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้โดยอาศัยแอนทราควิโนนเป็นสารเริ่มต้น สีย้อมกลุ่มนี้มีความสำคัญเป็นอันดับสองรองจากสีอะโซ โดยครอบคลุมถึงประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมด สีที่มีความสำคัญคือ สีม่วง ฟ้า เขียว และแดง

สด เป็นสีที่มีความสว่างสดใสดี และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มของสีน้อยกว่าสีอะโซ และยังมีราคาแพงอีกด้วย

ก. สีซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) เป็นสีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีกุุ่มนี้เป็นสีที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในบรรดาสีทั้งหมด เนื่องจากเป็นสีที่มีราคาถูก นิยมใช้สีซัลเฟอร์ทึบ ๆ ที่ต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ น้ำตาล และน้ำเงิน สีกุุ่มนี้มีให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีทึบไม่สดใส

ง. สีอินดิโกออยด์ (Indigoid dyes) เป็นสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน (Indigotin) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของสีอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

2.2.2 จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อม โดยทั่วไปสีย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมเส้นใยประเภทโปรตีน เช่น ขนสัตว์ และไหม ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับเส้นใยประเภทเซลลูโลส สีย้อมที่เหมาะสมกับการย้อมไหม ขนสัตว์ ฝ้าย และเรยอน ส่วนใหญ่จะไม่สามารถย้อมเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นมาได้ สีย้อมประเภทดิสเพอร์สก็เหมาะสำหรับเส้นใยประเภทอะซิเตท (Acetate) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) และเช่นเดียวกันก็ไม่เหมาะที่จะนำมาย้อมฝ้ายหรือขนสัตว์ (สิงห์น้อย, 2540) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

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

ที่มา: นิรนาม (2536)

2.2.3 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท (Amornsri, 2003) ดังนี้

ก. สีย้อมประเภทละลายน้ำได้ สีย้อมประเภทละลายน้ำได้จะเกิดจากการแตกตัวเมื่อละลายน้ำได้ โดยสีย้อมที่อยู่ในรูปเกลือโซเดียมเมื่อละลายน้ำแล้วจะให้ประจุลบ ได้แก่ สีย้อมแอซิด (Acid dye) สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye) และสีย้อมไดเรกต์ (Direct dye) แต่ถ้าเมื่อละลายน้ำแล้วเกิดการแตกตัวให้ประจุบวก ได้แก่ สีย้อมเบสิก (Basic dye)

ข. สีย้อมประเภทละลายน้ำไม่ได้ สีย้อมที่ไม่ละลายในน้ำแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่

1) สีย้อมที่ละลายในสารตั้งต้น เช่น สีย้อมดิสเพิร์ส (Disperse dye) และสีย้อมที่ละลายได้ในตัวทำละลาย

2) สีย้อมที่ละลายได้ชั่วคราว เช่น สีย้อมวัต (Vat dye) และสีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dye)

3) สีย้อมพอลิคอนเดนเซชัน (Poly condensation dye)

4) สีย้อมที่อยู่ภายในเส้นใย (Dyes formed within the fiber)

5) รังควัตถุ (Pigment)

2.2.4 จำแนกตามวิธีการใช้งานมีดังต่อไปนี้

ก. สีไคเรกต์ (direct Dyes) หรือเรียกว่าสีย้อมฝ้าย เป็นสีที่ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมจากน้ำละลายสีโดยตรงให้ซึมเข้าไปภายในเซลล์ลูลอส สามารถย้อมผ้าได้ทันทีโดยไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดเหมือนสีตัวอื่น ๆ จึงเรียกว่าสีไคเรกต์ หรือสีย้อมโดยตรง สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลล์ลูลอส เนื่องจากสีจะติดเส้นใยได้ด้วยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน รวมทั้งการย้อมสีประเภทนี้จะอาศัยเกลือเพื่อช่วยเร่งการดูดซึมของสี แต่สีชนิดนี้จะไม่ทนต่อการซักน้ำและสีตกง่าย อย่างไรก็ตามในการย้อมสีไคเรกต์จะต้องมีการใส่สารพวกอิเล็กโทรไลต์ เช่น โซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟต ซึ่งมีสมบัติในการช่วยลดประจุบนผิวหน้าเส้นใยผ้า

ข. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นเบส ใช้ย้อมใยเซลล์ลูลอสได้ดีที่สุด มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนเมื่อนำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) ในเซลล์ลูลอส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กลายเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลล์ลูลอส มีคุณสมบัติละลายน้ำและดูดติดเส้นใย ทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะยึดติดเส้นใย

สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟจะให้สีที่สดใสและสีติดทนในทุกสภาวะ เนื่องจากสีรีแอคทีฟมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างเล็กจึงทำให้สีแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ดี อีกทั้งยังมีความคงทนต่อแสงและการซักได้ดี

ค. สีเบสิก (Basic Dyes) เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) สามารถละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแคทไอออน บางครั้งเรียกว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) สี

ประเภทนี้มีความคงทนต่ำ สามารถใช้ย้อมใยอะคริลิกได้ จึงไม่สมควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เพราะจะไม่ทนต่อการซักและแสงแดด นิยมใช้กันในประเทศแถบตะวันออกที่นิยมความสดใสของสีมากกว่าความคงทนของสี การเกาะติดของสีย้อมในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกบนสี ย้อมกับประจุลบบนเส้นใย สีกกลุ่มนี้มักมีหมู่เอมีน (Amine Group) ในโมเลกุล

ง. สีแอซิด (Acid Dyes) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ โมเลกุลสีมีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีกรดเกือบทุกตัวเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี สีในกลุ่มนี้ต้องย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด สีแอซิดดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บรักษาจึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าสีดูดความชื้นเข้าไป จะทำให้เสื่อมสภาพเร็ว ตัวสีประเภทนี้จะดูดติดใยโปรตีนโดยตรง จึงนิยมใช้ในการย้อมพวกขนสัตว์ และไหม

สำหรับการเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนโมเลกุลของสีกับประจุบวกบนโมเลกุลของเส้นใย และสีกกลุ่มนี้มักมีกลุ่มซัลโฟนิค (Sulfonic group) ซึ่งเป็นตัวให้ประจุลบในน้ำ สีแอซิดบางประเภทสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ และไหม แต่ข้อจำกัดของสีแอซิดจะไม่ทนต่อการซักและไม่ทนต่อเหงื่อ

จ. สีมอร์แดนต์ (Mordant Dyes) สีมอร์แดนต์ หรือสีโครม เป็นสีที่มีโครงสร้างเหมือนกันกับสีแอซิด เพียงแต่จะสามารถเชื่อมโยงกับโครเมียมเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนตที่ถาวรขึ้น สารประกอบโคออร์ดิเนตใหม่นี้จะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า จึงทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำเพิ่มขึ้น สีมอร์แดนต์มีคุณสมบัติในการย้อมเหมือนกับสีแอซิดไม่ได้ เพราะว่าถ้ายังไม่ได้ให้ตัวสีทำปฏิกิริยากับโครเมียม สีจะไม่คงทนต่อค่า

ฉ. สีวอต (Vat Dyes) สีวอตได้ชื่อมาจากการที่ตัวมันเองไม่ละลายน้ำ ต้องอาศัยรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยในการละลาย สีวอตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงสามารถย้อมติดกับเส้นใยเซลลูโลสได้ โครงสร้างของสีประเภทนี้แตกต่างกันมาก สารประเภทเชิงซ้อนของสีทุกตัวจะต้องมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl, C=O) อย่างน้อยหนึ่งหมู่รวมอยู่ด้วยเสมอ ส่วนใหญ่ใช้ย้อมในเส้นใยฝ้าย

สีตัวมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโกยด์ และสีแอนทราควิโนน อย่างไรก็ตามสีตัวทุกชนิดควรใช้น้ำอ่อนในการละลาย ถ้าในน้ำมีไอออนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมจะทำให้การละลายของสีไม่ดี

ข. สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) หรือสีกำมะถัน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบในส่วนที่เป็นโครโมฟอร์และส่วนของสายโซ่พอลิซัลไฟด์ เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบในโตรเจน สีชนิดนี้ย้อมง่าย มีราคาถูก และมีความทนต่อน้ำดี แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

ข. สีดิสเพิร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำต่ำ สามารถย้อมเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยอะซิเตต เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดีในสภาวะที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีสมบัติกระจายได้ดี ซึ่งการย้อมจะใช้สารพา เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง และการย้อมจะใช้ในรูปแขวนลอย ซึ่งในรูปนี้สามารถใช้กับเส้นใยที่ไม่ชอบดูดซึมสีที่ไม่ชอบน้ำได้ การทำให้สีอยู่ในรูปแขวนลอยหรือกระจายตัวนั้นได้มาจากการบดผงสีในน้ำที่มีสารทำให้กระจายตัวที่มีประจุลบจนกระทั่งขนาดของสีประมาณ 1-3 ไมครอน

สีดิสเพิร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanolamine; $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน ทั้งนี้สีดิสเพิร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ เป็นต้น

3. สีในน้ำทิ้ง

สีของน้ำตามธรรมชาติเป็นผลจากการที่น้ำนั้นไหลผ่านสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่าง ๆ เช่น ใบไม้ ใบหญ้า และซากสัตว์ ซึ่งมีลิวินเป็นองค์ประกอบ เมื่อสลายตัวจะให้สารพวกแทนนิน กรดฮิวมิก และฮิวเมต ซึ่งเป็นสารที่มีสี และจากไอออนของโลหะในน้ำ เช่น เหล็ก แมงกานีส รวมทั้งจากแพลงก์ตอนและการปะปนของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม U.S. Public Health Service จึงได้กำหนดว่าน้ำที่จะใช้บริโภคไม่ควรมีสีเกิน 15 หน่วย (กรณิการ์, 2525)

3.1 สาเหตุการเกิดสีในน้ำ เกิดจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการคือ

3.1.1 เกิดจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) สีของน้ำที่เกิดจากอินทรีย์วัตถุ เช่น ต้นหญ้า ใบไม้เน่าเปื่อย ฯลฯ โดยมากมักจะมีสีน้ำตาลปนเหลือง หรือสีน้ำชา ทั้งนี้เนื่องจากเกิดสารประกอบของพวก tannin acid ขึ้น

3.1.2 เกิดจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial waste) สีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มักจะมีสีตามกระบวนการผลิตของโรงงาน

3.2 ประเภทของสี สีของน้ำแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

3.2.1 สีแท้หรือสีจริง (True color) คือสีของน้ำที่เป็นสีที่วัดได้หรือมองเห็นหลังจากที่แยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้น้ำขุ่นออกไปแล้วนั่นคือ สีจริงเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำ

3.2.2 สีปรากฏ (Apparent color) คือสีของน้ำที่เป็นสีที่วัดได้หรือมองเห็นจริง ๆ ในตัวอย่างน้ำ โดยไม่มีการแยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้น้ำขุ่นออกไป นั่นคือ สีปรากฏเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำและที่ไม่ละลายได้ในน้ำรวมกัน

สีของน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีสีแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อม ชนิด ปริมาณ ความเข้มข้นของสารละลาย และสารแขวนลอย รวมทั้งคุณภาพของแสง เช่น แหล่งน้ำที่มีหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตปะปนอยู่มากจะมีสีเขียว หรือมีสีแดงหากมีออกไซด์ปะปนอยู่

4. น้ำเสียและมลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีสดใสสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้มักอาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก จึงทำให้เกิดของเสียและมลพิษมากขึ้นด้วย

4.1 ปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม

หากคิดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตสิ่งทอแล้วจะพบว่า โดยเฉลี่ยแล้วในการผลิตน้ำหนัก 1 ปอนด์ จะใช้น้ำในกระบวนการ 20 แกลลอน หรือผ้า 1 กิโลกรัม จะใช้น้ำ 167 ลิตร ส่วนปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นคำนวณในแง่ของการใช้น้ำแต่ละกระบวนการและการผลิตสิ่งทอ นอกจากปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการแล้ว ยังมีการใช้สารเคมีต่าง ๆ มากมาย เช่น สีย้อม สีพิมพ์ เกลือ สารช่วยย้อม/พิมพ์ เป็นต้น ส่วนที่เหลืออยู่จากกระบวนการผลิตก็จะกลายเป็นมลพิษในน้ำ ซึ่งต้องทำการบำบัดต่อไป

4.2 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

4.2.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม พิมพ์ และ ตกแต่งเสร็จ น้ำส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ น้ำที่ใช้ในการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้将有ความเข้มข้นของสีสูง และน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม โดยน้ำในส่วนนี้将有ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

4.2.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำ จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง มันจะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย

4.2.3 น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการย้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น และส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4.2.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องและทำความสะอาดโรงงาน

4.3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

4.3.1 มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD และ COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ สีย้อม เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมากับกระบวนการย้อม และตกแต่ง รวมถึงไขมัน และตัวทำละลายต่าง ๆ

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

4.3.3 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (Dissolved Solid) สูง ปริมาณของของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่าง ๆ

4.3.4 มีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า

4.3.5 มีโลหะหนักเจือปน โลหะหนักนี้จะมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นพวกทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี

4.3.6 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในปริมาณมาก

4.4 ความเป็นพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (นันทยา, 2537)

สารเคมีและสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมียู่มากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีความเป็นพิษและทำให้เกิดมลพิษที่แตกต่างกันไป ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติความเป็นพิษ มลพิษของสีย้อม และสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอไว้มากมาย ทำให้ทราบสมบัติความเป็นพิษของสารที่ใช้

4.4.1 การตรวจวัดความเป็นพิษของสาร

ความเป็นพิษของสาร คือ อันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เมื่อสัมผัสกับสารนั้น โดยมนุษย์จะได้รับอันตรายจากสารพิษ 3 ทาง คือ

ก. โดยการสูดดมเข้าไปทางจมูก ในกรณีที่สารนั้นเป็นก๊าซหรือสารระเหย

ข. โดยการสัมผัสทางผิวหนัง

ค. โดยการบริโภค

โดยปกติการตรวจวัดอันตรายที่อาจเกิดขึ้น 3 ทางข้างต้น นิยมใช้หนูเป็นสัตว์ทดลอง และได้มีการกำหนดหน่วยวัดที่นิยมนำใช้กันมากมีดังนี้

4.4.2 ค่าทีแอลวี (TLV)

ค่าทีแอลวี ย่อมาจาก Threshold Limit Value หมายถึง สารที่อาจเกิดจากการสูดดมเข้าไปทางจมูก และมีความสำคัญโดยเฉพาะกับสารที่ระเหย หรือเป็นแก๊สในบรรยากาศ ปกติสารที่มีค่าทีแอลวีต่ำจะมีความเป็นพิษสูง ตัวอย่างค่าทีแอลวีของสารเคมีบางตัว ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าทีแอลวีของสาร

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

ที่มา: นันทยา (2537)

4.4.3 ค่าแอลดี 50 (LD₅₀)

ค่าแอลดี 50 ย่อมาจาก Lethal Dose หมายถึง ปริมาณสารที่ให้กับหนูทดลอง แล้วทำให้หนูที่ถูกทดลองตายไป 50% ของจำนวนหนูทดลองที่ใช้ทั้งหมด หน่วยวัดนี้สามารถใช้ ประเมินความเป็นพิษของสาร หากมีการบริโภคเข้าไป สารที่มีค่าแอลดี 50 ต่ำจะแสดงความเป็นพิษสูง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเป็นพิษของสารที่ค่าแอลดี 50 ต่าง ๆ

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

ที่มา: นันทยา (2537)

4.4.4 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่ได้มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศ ไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมและพิมพ์ผ้ามีอันตราย ตายหรือเจ็บป่วยสูงกว่าอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางดังกล่าวข้างต้น ตัวอย่างค่าแอลดี 50 ของสีย้อม ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าแอลดี 50 ของสีย้อมเปรียบเทียบกับไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารพิษร้ายแรง

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

ที่มา: นันทยา (2537)

4.5 มลพิษที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปมลพิษที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม มีดังนี้

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

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

4.5.3 ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง (Physical Impairment of Stream Condition) น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดความรู้สึกรำรังเกียจต่อผู้พบเห็น ทำให้สภาพลำนน้ำไม่น่าดู นอกจากนี้สีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น

5. การบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

แม้ว่าโรงงานสิ่งทอจะมีหลายประเภทแตกต่างกันก็ตาม แต่ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียก็จะมีหลักการที่คล้ายคลึงกัน กระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้ในการบำบัดจะต้องใช้ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพประกอบกัน โดยมีกระบวนการย่อย ๆ ดังต่อไปนี้

5.1 กระบวนการทางกายภาพ

กระบวนการทางกายภาพโดยทั่วไปจะใช้เป็นตะแกรงเพื่อทำหน้าที่ป้องกันการอุดตันของท่อน้ำเสีย และอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องสูบน้ำช่วยป้องกันไม่ให้เส้นใยและขยะต่าง ๆ ไหลเข้าไปในระบบบำบัดน้ำเสีย

5.2 กระบวนการทางเคมี

กระบวนการทางเคมี โดยทั่วไปประกอบด้วย

5.2.1 Neutralization ใช้ในกรณีที่น้ำเสียมี pH สูงหรือต่ำเกินไป จำเป็นต้องมีการปรับ pH ให้มีระดับที่เหมาะสม

5.2.2 Coagulation คือกระบวนการทางเคมีที่ใช้สารเคมีบางชนิด เช่น สารส้ม ทำให้ตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากจนกระทั่งสามารถกำจัดได้ด้วยการตกตะกอน โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีนี้ในการกำจัดสีของน้ำเสีย โดยเฉพาะสีที่ไม่ละลายน้ำ เช่น สีวอต สีซัลเฟอร์ และสีดิสเพอร์ส ซึ่งจะถูกกำจัดได้ดี เมื่อทำการ Coagulation ด้วยสารส้มหรือปูนขาว แต่สำหรับสีที่ละลายน้ำ เช่น สีไดเรกต์ และสีรีแอคทีฟไม่อาจกำจัดได้ด้วยกระบวนการนี้

5.2.3 Ozone treatment คือกระบวนการทางเคมี ที่ใช้กำจัดสีจากน้ำทิ้งโดยการทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออกกลายเป็นสารที่ไม่มีสี ซึ่งเทคนิคนี้สามารถใช้กับน้ำทิ้งปริมาณมาก และปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้รวดเร็ว แต่มีต้นทุนอุปกรณ์สูง ข้อเสียของวิธีนี้ก็คือ สารใหม่ที่เกิดจากการแตกพันธะเคมีนั้นอาจเป็นพิษได้ เนื่องจากสีย้อมโดยส่วนใหญ่มักประกอบด้วยสารไนโตรเจน

คลอรีน และซัลเฟอร์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลที่ซับซ้อนเหล่านี้จะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้น แต่ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถลดค่า COD ในน้ำทิ้งได้ดี

5.2.4 Adsorption คือกระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษออกจากสิ่งแวดล้อม โดยมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้ของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ ถ่านหิน ไคติน และซิลิกา ซึ่งบางครั้งความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับยังไม่มากพอ ทำให้มีการปรับปรุงหาตัวดูดซับชนิดใหม่ ๆ เรื่อยมา

5.3 กระบวนการทางชีวภาพ

ระบบทางชีวภาพที่เป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำเสียของโรงฟอกย้อมในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบ Activated sludge เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD และ COD และใช้พื้นที่ไม่มากนัก แต่การบำบัดที่ใช้ในน้ำทิ้งไม่ค่อยเป็นที่น่าพอใจนัก ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งด้วยวิธีต่าง ๆ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งด้วยวิธีต่าง ๆ

Dye Type	Solubility	Coagulation by Alum	Activated carbon	Biological	Physicochemical Biological	Ozone	Sludge adsorption
Acid	+	-	+	-	+	+	-
Basic	+	-	++	+	+	+	+
Direct	+	N	N	N	+	N	+
Reactive	+	-	+	-	+	++	-
Vat	-	+	-	-	+	+	N
Sulphur	-	+	-	-	+	+	N
Disperse	-	+	-	-	+	+	-

หมายเหตุ ++ ให้ผลดีมาก + ให้ผลดี - ใช้ไม่ได้ N ไม่มีข้อมูล

ที่มา: นันทยา (2537)

6. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่น ๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (Landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และ โมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วย

จุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ กณิตา, 2550)

6.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

6.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

6.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

6.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

6.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ

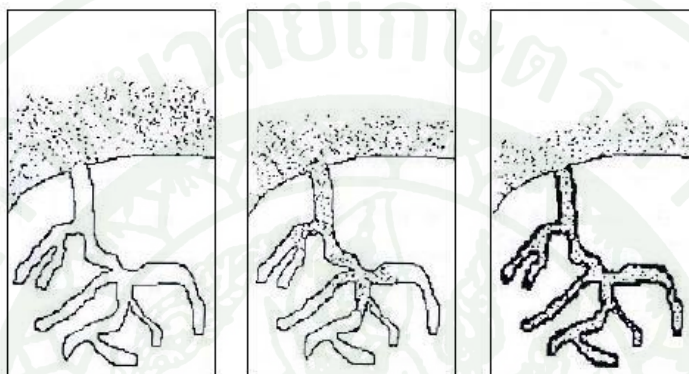
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย (ภาพที่ 2) ดังนี้

6.2.1 การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ

6.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับ ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวขั้นตอนหนึ่ง

6.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวดูดซับที่อยู่ผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายใน ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน

ขั้นตอนที่ 1: Bulk transport ขั้นตอนที่ 2: Film transport ขั้นตอนที่ 3: Intraparticle transport



ภาพที่ 2 ขั้นตอนในการดูดซับ

ที่มา: Noll *et al.* (1992)

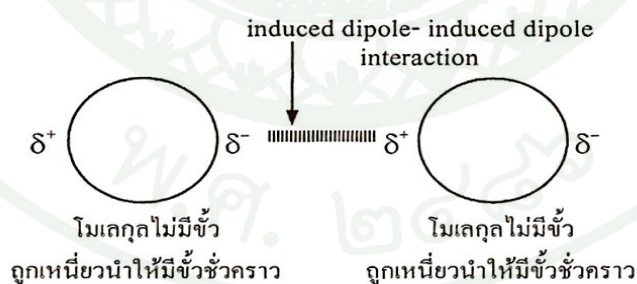
6.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)

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

6.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกันโดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (Induce Dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อ ๆ ไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Attraction)

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

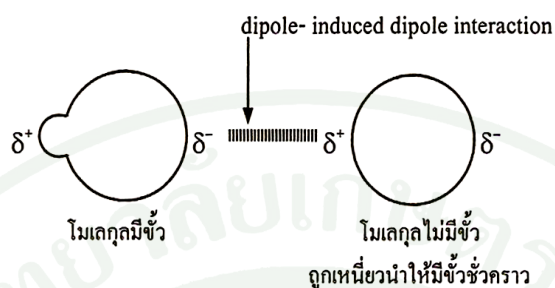


ภาพที่ 3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็น

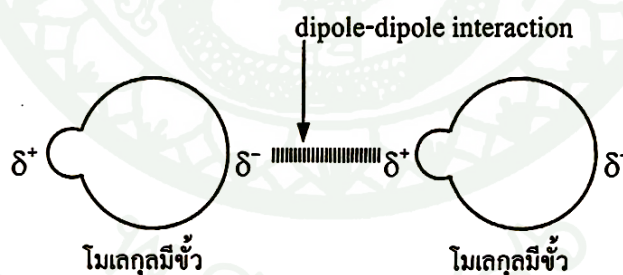
โมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Dipole-Induced Dipole Attraction)



ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole attraction)



ภาพที่ 5 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์สูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอม

ที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงใน โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)

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

6.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และ โปรตอนกับโปรตอน)

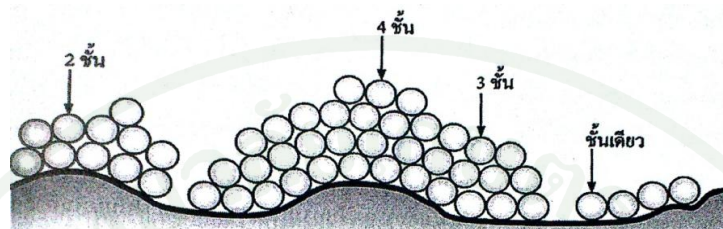
การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

6.4 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

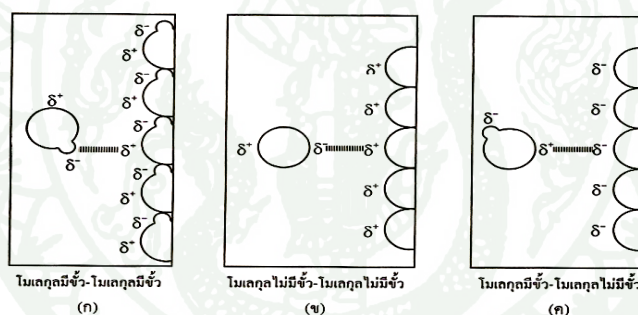
6.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (ภาพที่ 6) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้า และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูด

ชั้น และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง เป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 7 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

6.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

6.5.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม หรือแพร่ผ่านรูพรุน ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้ดีกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

6.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะนั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับให้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

6.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้

ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

6.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

6.5.5 ค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

6.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

6.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

6.6 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับ แบ่งได้ 5 ประเภท ดังนี้คือ

6.6.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอคติเวเตดซีลิกา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สาร

สังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

6.6.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม

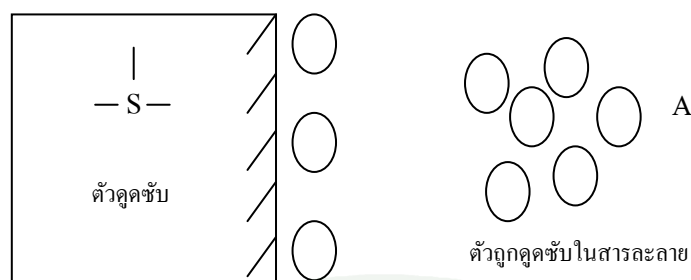
6.6.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตร/กรัม

6.6.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จีเลียว ไคโตซาน กาแฟที่ใช้แล้ว ชาและชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว เปลือกไม้ ถั่วแกลบดำ เป็นต้น

6.6.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่าง ๆ และสาหร่าย

6.7 สมดุลการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลจะถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ ภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

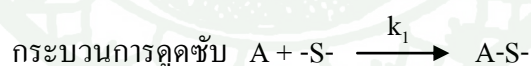
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

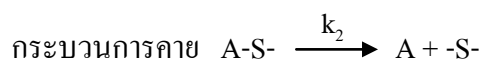
(1-q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคายซับ ซึ่งจะแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

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

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

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) หรือลิตร (l)

C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

q อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (Adsorption Capacity)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

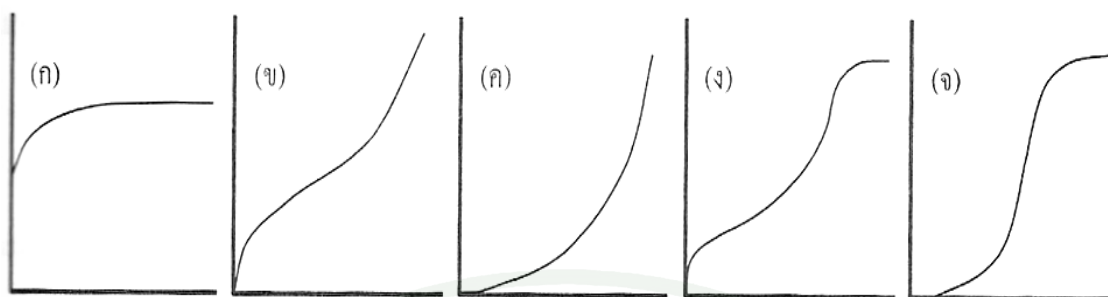
ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

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

6.8 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

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

จากภาพที่ 9 (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนภาพ (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

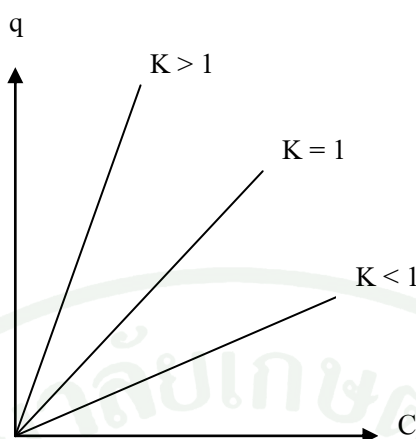
สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้กันดังนี้

6.8.1 สมการการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และค่า C ตามสมการ

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

จะได้ $q = KC$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัด แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแรงแบบแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

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

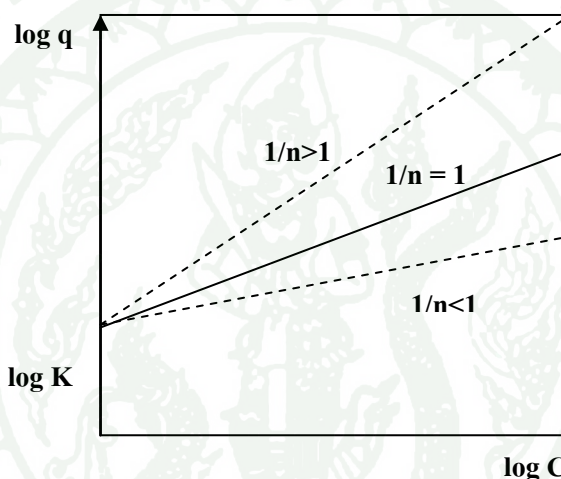
$$q = KC^{1/n} \quad \dots\dots\dots(4)$$

สมการที่ (4) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่ว ๆ ไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช

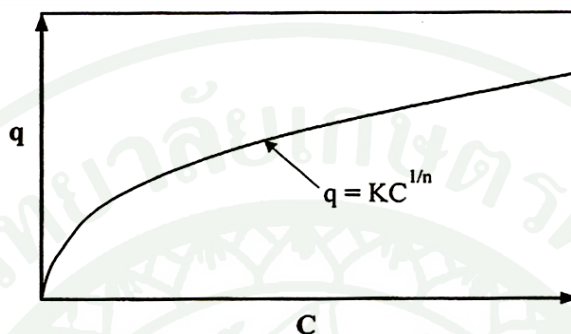
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

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

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

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

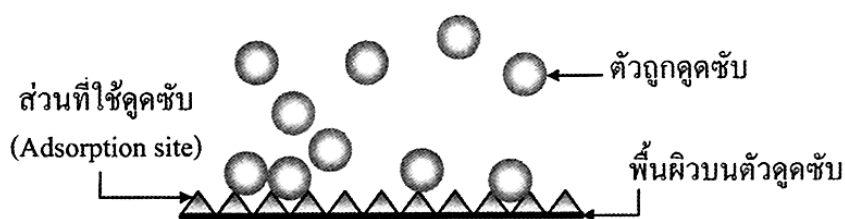
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (4) ดังภาพที่ 12 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

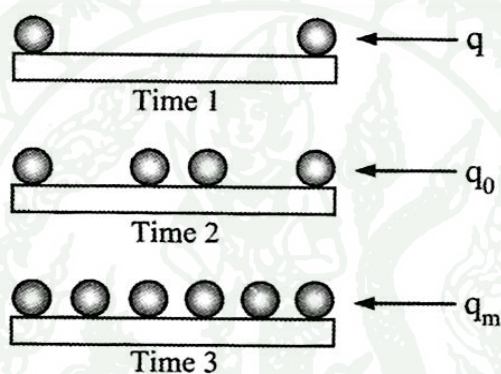
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

6.8.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932 โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 13 และ 14



ภาพที่ 13 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 14 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

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

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

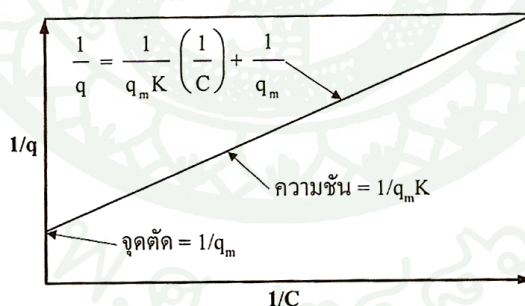
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

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

ก. การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (multi-layer adsorption)

ข. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ค. ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน

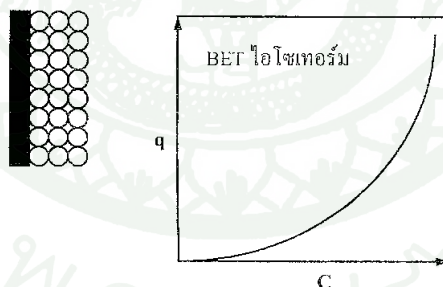
ง. แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบทถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



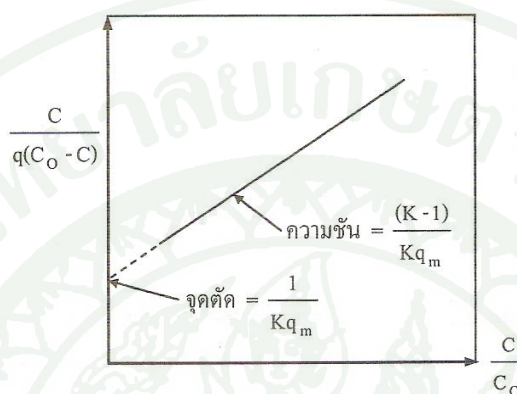
ภาพที่ 16 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับค่า $\frac{C}{C_0}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $\frac{(K-1)}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดพอสรุปได้ว่า สมดุลการดูดซับเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ที่สภาวะสมดุลอิทธิพลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับจะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งจะบอกด้วยอัตราส่วนปริมาณของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รัตน (2543) ได้ศึกษาการดูดซับของสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคดินและไคโตซาน โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม 4 ชนิด (C.I. Acid Red 360, C.I. Reactive Red 158, C.I. Direct Red 80 และ C.I. Basic Red 24) บนตัวดูดซับ 3 ชนิด (เปลือกกุ้ง ไคดิน และไคโตซาน) พบว่า ตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสีแอซิด สีรีแอคทีฟ และสีไบเรกที่ได้ดีในสารละลายกรดที่มีค่าพีเอช 5 หรือต่ำกว่า โดยไคโตซานจะดูดซับสีย้อมดังกล่าวได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคดินและเปลือกกุ้ง ตรงข้ามกับสีเบสิกจะถูกดูดซับได้ดีในสารละลายด่างที่มีค่าพีเอช 10 หรือสูงกว่า โดยเปลือกกุ้งจะดูดซับสีเบสิกได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคดินและไคโตซานมาก และในการกำจัดสีย้อม

ออกจากรูปร่างของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอพบว่า ไคโตซานสามารถดูดซับสีแอซิด สีรีแอคทีฟและสีไคเรกท์ได้ในปริมาณสูงสุดเกือบถึงร้อยละ 72, 61 และ 94 ตามลำดับ ส่วนเปลือกกุ้งสามารถดูดซับสีเบสิกจากน้ำทิ้งได้ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 43 ปริมาณสีย้อมที่กำจัดได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมในน้ำทิ้ง

โชติรส (2545) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ (สีแอซิด สีไคเรกท์ สีรีแอคทีฟ และสีเบสิก) ด้วยไคโตซานโดยการดูดซับพบว่า ไคโตซานสามารถกำจัดสีย้อมทั้ง 4 ชนิดได้ โดยความสามารถในการดูดซับสีแอซิด สีไคเรกท์ และสีรีแอคทีฟในสภาวะเป็นกรด (พีเอชต่ำ) ดีกว่าสภาวะเป็นกลางและเบส ส่วนสีเบสิกนั้นที่สภาวะเป็นเบสดีกว่าที่สภาวะเป็นกลางและกรด ทั้งนี้ไคโตซานสามารถดูดซับสีย้อมผ้าได้ดีขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคของตัวดูดซับมีขนาดเล็กลง

สกล (2546) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิก ได้แก่ Reactive Red 141 และ Basic Red 14 ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซานเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ธรรมดาพบว่า ถ่านกัมมันต์หลังเคลือบไคโตซานมีรูพรุนลดต่ำลง การดูดซับด้วย Freundlich Isotherm ของถ่านกัมมันต์ที่เคลือบไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีรีแอคทีฟได้มากขึ้น ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ไม่เคลือบไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีเบสิกได้สูงสุด และค่าพีเอชของสารละลายสีย้อมมีผลต่อกระบวนการดูดซับ โดยเมื่อค่าพีเอชของสารละลายสีย้อมลดต่ำลง ความสามารถในการดูดซับสีรีแอคทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สีเบสิกมีค่าลดต่ำลง

จันทรา (2547) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ไคโตซานปิดสัในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชนภายใต้ 2 ระบบคือ ระบบการเขย่า และการใช้คอลัมน์พบว่า ไคโตซานปิดสัภายใต้ระบบการเขย่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่าการใช้คอลัมน์ไคโตซานปิดสั น้ำเสียผ่านการบำบัดด้วยไคโตซานปิดสั โดยนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ใช้ไคโตซานปิดสัขนาด 0.2 มิลลิเมตร ในปริมาณร้อยละ 10 (น้ำหนักต่อปริมาตร) มีค่าบีโอดีลดลงร้อยละ 44.52 โดยไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำเสีย (พีเอชของน้ำเสียมีค่าประมาณ 5) นอกจากนี้ยังไม่สามารถตรวจพบปริมาณสารแขวนลอย และความขุ่นของน้ำเสียได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชน โดยใช้ระบบตะกอนเร่งพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนได้ดีกว่าการใช้ไคโตซานปิดสั กล่าวคือ ภายหลังการบำบัดด้วยตะกอนเร่งเป็นเวลา 3 วัน พบว่า น้ำเสียมีค่าบีโอดีลดลงร้อยละ 70.32 และมีค่าความขุ่นลดลงร้อยละ 88.28 ส่วนปริมาณสารแขวนลอยของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้ เมื่อนำไคโต

ซานปีดส์มาใช้ร่วมกับตะกอนเร่งเพื่อบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชน โดยนำน้ำเสียบำบัดด้วยตะกอนเร่ง 3 วัน ต่อด้วยการบำบัดด้วยไคโตซานปีดส์ภายใต้ระบบการเขย่าพบว่า สามารถลดค่าบีโอดีได้ร้อยละ 90.07

Feng *et al.* (2000) ศึกษาความสามารถในการดูดซับของโลหะหนักและสีย้อมโดยใช้เกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานที่เตรียมได้จากของเสียจากการประมง ตัวแปรที่ศึกษาคือ ชนิดของไคโตซาน (เม็ด, เกล็ด) และชนิดของของเสียจากการประมง (เปลือกกุ้ง, เปลือกกุ้งมังกร, เปลือกปู) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของไคโตซานที่ได้จากเปลือกปู เปลือกกุ้งมังกร และเปลือกกุ้ง จะมีค่าลดลงตามลำดับ (เปลือกปู > เปลือกกุ้งมังกร > เปลือกกุ้ง) เป็นผลให้ไคโตซานเม็ดมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าไคโตซานเกล็ด และไคโตซานเม็ดที่เตรียมได้จากเปลือกปูจะมีประสิทธิภาพมากกว่าไคโตซานเม็ดชนิดอื่น ๆ ทั้งการดูดซับอออนทองแดงและการดูดซับสีย้อมชนิด RR222

Chiou and Li (2002) ได้ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 189 โดยใช้เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยโครงร่างตาข่ายด้วยอีพิกโลโรไฮดรินเป็นตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม และค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมมีผลอย่างมากต่อการดูดซับสีย้อม แต่อุณหภูมิและอัตราการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายมีผลน้อยต่อการดูดซับสีย้อม ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมจะเพิ่มการดูดซับสีย้อม แต่การลดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมจะเพิ่มการดูดซับสีย้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)

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

1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด อ่านค่าละเอียด 0.0001 g รุ่น WB-0250003 บริษัท KERN & Sohn GmbH

1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0 กรัม รุ่น WB-0250003 บริษัท Mettler Toledo รุ่น PB-1501

1.5 เดสซิเคเตอร์ (Dessicator)

1.6 เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Model UM-S4050 UMAC scientific Co., LTD.

1.7 เครื่องปั่นกวน

1.8 เครื่องปั่นละเอียด

1.9 แท่นให้ความร้อน (Hot plate)

1.10 pH meter รุ่น Model 410 บริษัท SCIENCE TECH Co., LTD.

1.11 เครื่องแก้ว

1.12 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman

2. สารเคมี

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

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

2.3 ไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric acid, HCl)

2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

3. วัสดุคูดซับ

3.1 ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

3.2 ไคโตซานเชิงพาณิชย์

4. น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงฯ

วิธีการ

1. การเตรียมสารละลาย

1.1 สารละลายสีย้อมผ้ามาตรฐานผสม 9 ชนิด ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งสีย้อมผ้าชนิดละ 0.01 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1.0 ลิตร เติมน้ำกลั่นผสมให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรเป็น 1.0 ลิตร จะได้สารละลายสีย้อมผ้ามาตรฐานผสม ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซังสีย้อมผ้าชนิดละ 0.02 กรัม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น จะได้สารละลายสีย้อมผ้ามาตรฐานผสม ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสารละลายสีย้อมผ้ามาตรฐานผสมที่เตรียมได้ทั้งสองความเข้มข้นใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลอง

1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 โมลาร์

ซังโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

1.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 50% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ซังโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 500 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

1.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 โมลาร์

นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมา 85 มิลลิลิตร เทใส่ในขวดปรับปริมาตรที่มีน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2. การเตรียมตัวดูดซับ

2.1 ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

กระบวนการผลิตไคโตซานจากเปลือกกุ้งที่ทำการศึกษาเป็นการสกัดไคโตซานทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

นำเปลือกกุ้งมาล้างให้สะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก ตากแดดให้แห้ง นำไปปั่นให้มีขนาด 1.4-40 มิลลิเมตร

2.1.2 ขั้นตอนการกำจัดโปรตีน (Deproteinization)

ซังเปลือกกุ้งที่ป่นแล้ว 125 กรัม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 750 มิลลิลิตร (สัดส่วน 1:6 น้ำหนักต่อปริมาตร) นำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วนำไปตากแดดจนแห้ง

2.1.3 ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization)

นำสารที่แยกโปรตีนออกแล้วมาเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 800 มิลลิลิตร (สัดส่วน 1:10 น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วนำไปตากแดดจนแห้งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไลติน

2.1.4 ขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซิติก (Deacetylation)

นำสารที่สกัดได้มาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 800 มิลลิลิตร (สัดส่วน 1:10 น้ำหนักต่อปริมาตร) นำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วนำไปตากแดดจนแห้งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไลโดซานจากเปลือกกุ้ง

2.2 ไลโดซานเชิงพาณิชย์

ในงานวิจัยนี้ใช้ไลโดซานเชิงพาณิชย์จากบริษัท เอ็นเอ็นซี. โปรดักส์ จำกัด ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ดสีน้ำตาลอ่อน ๆ ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ไคโตซานเชิงพาณิชย์

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อมผ้า

เตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อมผ้าแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายสีย้อมผ้ามาตรฐานแต่ละชนิด ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ จะได้สารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้า ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

นำสารละลายสีย้อมผ้ามาตรฐานทั้ง 9 ชนิด ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของแต่ละสีดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (ตารางที่ 6) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกน Y) และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผ้ามาตรฐาน (แกน X) จะได้กราฟมาตรฐานสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด

ตารางที่ 6 ความยาวคลื่นที่สีย้อมผ้าแต่ละสีดูดกลืนแสงได้มากที่สุด

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

ที่มา: อคปภา (2555)

4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์

ปัจจัยที่ทำการศึกษาเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ มีดังนี้

4.1 อิทธิพลของปริมาณไคโตซานเริ่มต้น

ชั่งไคโตซานจากเปลือกกุ้งปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (ระยะเวลากำจัด) กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ λ_{max} ของแต่ละสี และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัด พร้อมทั้งนำไคโตซานเชิงพาณิชย์มาทดลองเช่นเดียวกับไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

4.2 อิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

ซึ่งโคโคซานจากเปลือกกุ้งปริมาณที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองข้อ 4.1 โดยแปรผันค่าพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าเท่ากับ 5, 6, 7, 8 และ 9 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1 และนำโคโคซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.3 อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.2 โดยปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองข้อ 4.2 โดยแปรผันความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 0, 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที และนำโคโคซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.4 อิทธิพลของระยะเวลาเขย่า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.3 โดยเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3 โดยแปรผันระยะเวลาเขย่าเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที และนำโคโคซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.5 อิทธิพลของระยะเวลากำจัด

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.4 โดยนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ระยะเวลาเขย่าที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4 โดยแปรผันระยะเวลากำจัดเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที และนำโคโคซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.6 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.5 โดยตั้งทิ้งไว้นานเท่ากับระยะเวลากำจัดที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5 โดยแปรผันความเข้มข้นของ

น้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำโคโคซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.7 อิทธิพลของปริมาณโคโคซานที่เหมาะสม

ชั่งโคโคซานจากเปลือกกุ้งปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.6 โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.6 และนำโคโคซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

4.8 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์กับไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อมผ้า

นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 4.6 มาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

5. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยโคโคซานจากเปลือกกุ้งและโคโคซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบดซ์

ทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสม โดยชั่งโคโคซานจากเปลือกกุ้งและโคโคซานเชิงพาณิชย์ปริมาณ 2.0 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิตร ความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 60 นาที ระยะเวลากำจัด 60 นาที และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ $\lambda_{\max}$ ของแต่ละสี และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัด

6. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยโคโคซานจากเปลือกกุ้งและโคโคซานเชิงพาณิชย์

นำโคโคซานจากเปลือกกุ้งทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5 จากนั้นนำโคโคซานจากเปลือกกุ้งมาใช้ซ้ำเรื่อย ๆ จนประสิทธิภาพลดลงเหลือน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของประสิทธิภาพในการกำจัดครั้งที่ 1 และนำโคโคซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

7. ศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงฯ

นำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ พีเอช การนำไฟฟ้า ความขุ่น ความเค็ม ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด น้ำมัน และไขมัน ดีโอ บีโอดี และซีโอดี

8. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงฯ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์

นำไคโตซานจากเปลือกกุ้งมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงฯ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในข้อ 4 และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัด พร้อมทั้งนำไคโตซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน

9. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงฯ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ ในระดับ pilot scale

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงฯ ปริมาตร 10 ลิตร ใส่ในถังทดลอง ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 แล้วใส่ไคโตซานจากเปลือกกุ้งปริมาณ 100 กรัม จากนั้นใช้เครื่องปั่นกวนที่ปรับความเร็วและระยะเวลาของการปั่นกวนให้เท่ากับที่ศึกษาได้ในข้อ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ (ภาพที่ 19) ตั้งทิ้งไว้เท่ากับระยะเวลากำจัดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5 นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้า (ใส่ไคโตซานจากเปลือกกุ้งครั้งแรก 100 กรัม ครั้งต่อไปเพิ่มครั้งละ 50 กรัม จนครบ 400 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่ศึกษาได้จากการทดลองแบบแบตช์ โดยใช้สภาวะที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าที่ดีที่สุด และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าทุก ๆ ครั้งที่ทำการใส่ไคโตซานจากเปลือกกุ้งเพิ่ม) และวิเคราะห์คุณภาพน้ำภายหลังการกำจัดสีย้อมผ้า ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ เช่นเดียวกับข้อ 7 พร้อมทั้งนำไคโตซานเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 19 การทดลองในระดับ pilot scale

สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาทำการทดลองทั้งสิ้น 12 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2554 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2555

ผลและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการกำจัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด ได้แก่ 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยุงฯ โดยใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์เป็นตัวดูดซับ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทำการทดลองแบบเบดซ์กับน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมผ้า ได้แก่ ปริมาณไคโตซาน พีเอช ความเร็วรอบการเขย่า ระยะเวลาเขย่า ระยะเวลากำจัด และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ รวมทั้งศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และในส่วนที่สองเป็นการทดลองในระดับ pilot scale เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาคอยุงฯ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

1. ลักษณะของไคโตซานจากเปลือกกุ้งที่เตรียมได้

จากการทดลองเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้งด้วยวิธีการสกัดทางเคมีพบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์มากกว่าไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ดังภาพที่ 20 แต่ไคโตซานเชิงพาณิชย์มีลักษณะเป็นเกร็ดสีน้ำตาลอ่อน ๆ ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 20 ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

2. ผลการเตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อมผ้า

จากการทดลองเตรียมกราฟมาตรฐานของสีย้อมผ้ามาตรฐานทั้ง 9 ชนิด ได้แก่ 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังการทดลองในข้อ 3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) เท่ากับ 0.9889, 0.9880, 0.9813, 0.9970, 0.9851, 0.9872, 0.9796, 0.9840 และ 0.9801 ตามลำดับ ดังตารางที่ 7 และภาพผนวกที่ 1 ถึง 9 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.0200)

ตารางที่ 7 สมการเชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกราฟมาตรฐานสีย้อมผ้า 9 ชนิด

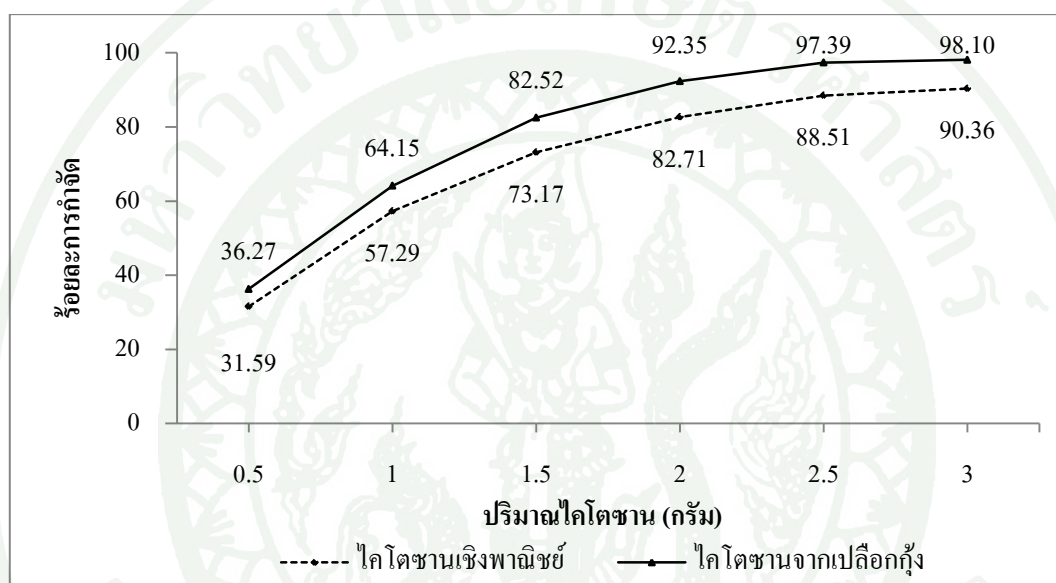
สี	สมการเชิงเส้น	R ²
2% Yellow LS-R-01	$y = 0.8329x + 0.0685$	0.9889
2% Yellow LS-4G	$y = 0.7914x + 0.1325$	0.9880
2% Orange LS-BR	$y = 0.7960x + 0.0913$	0.9813
2% Red LS-B	$y = 0.6966x + 0.0251$	0.9970
2% Blue LS-3R	$y = 0.6831x + 0.1972$	0.9851
6% Super Black G	$y = 0.7508x + 0.1545$	0.9872
4% Navy LS-G	$y = 0.6970x + 0.2417$	0.9796
2% Turquoise H-GN	$y = 0.3878x + 0.1332$	0.9840
2% Br.Blue LS-G	$y = 0.3442x + 0.1658$	0.9801

3. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

3.1 อิทธิพลของปริมาณไคโตซานเริ่มต้น

จากการทดลองในข้อ 4.1 ทำการแปรผันปริมาณไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ให้เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ปริมาณ 2.5 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดได้ร้อยละการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ

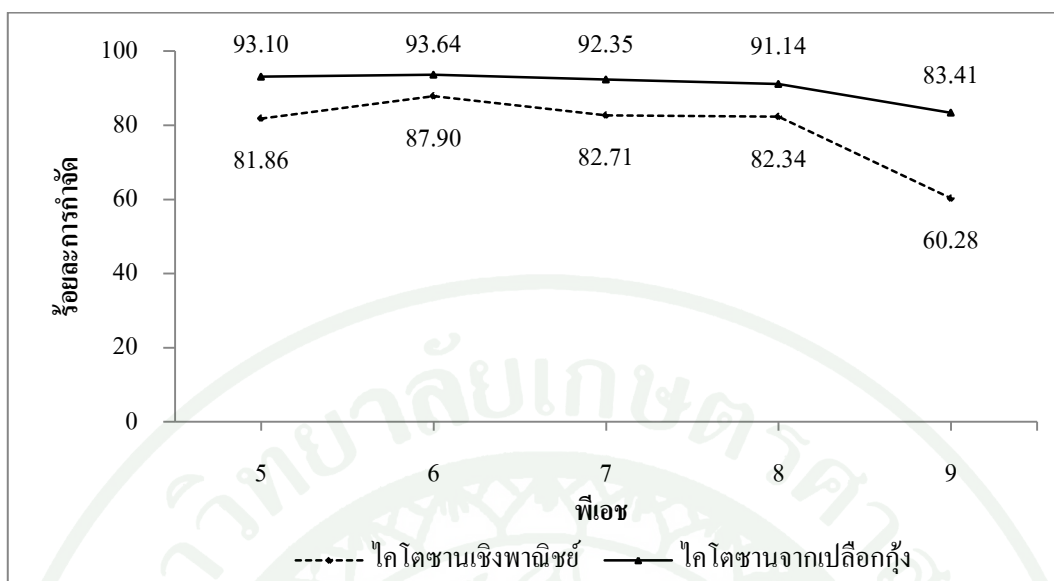
97.39 และ 88.51 ตามลำดับ คิดเป็น 0.4027 และ 0.3861 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ ส่วนไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ปริมาณ 2.0 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดได้ร้อยละการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 92.35 และ 82.71 ตามลำดับ คิดเป็น 0.5004 และ 0.4949 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ ดังภาพที่ 21 และตารางผนวกที่ 1 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ที่ปริมาณ 2.0 กรัม มาใช้ในการทดลองปัจจัยอื่น ๆ ต่อไป



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซานเริ่มต้น

3.2 อิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

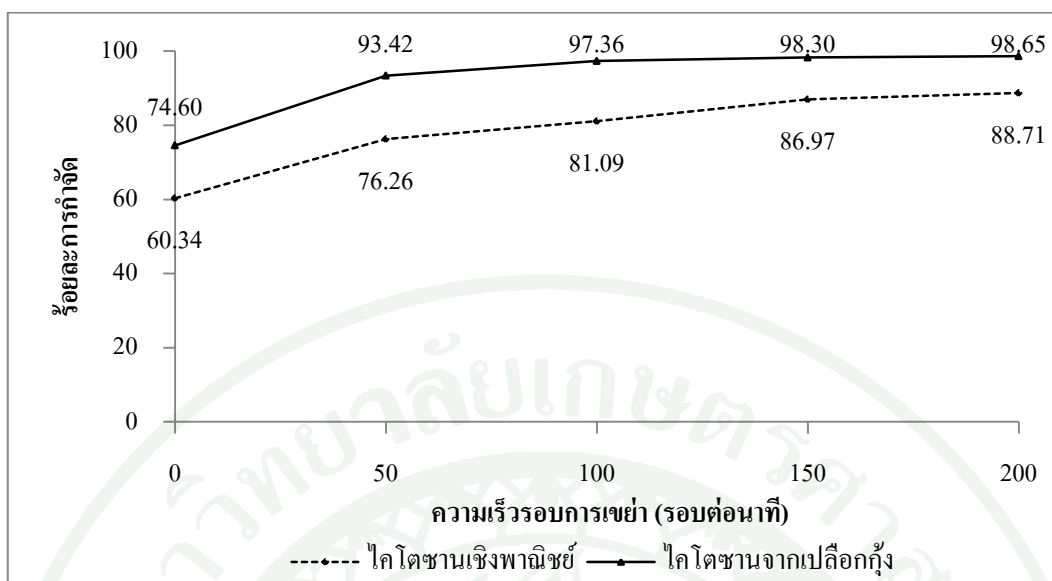
จากการทดลองในข้อ 4.2 ทำการแปรผันค่าพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าเท่ากับ 5, 6, 7, 8 และ 9 ผลการทดลองพบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดได้ดีที่สภาวะพีเอชที่เป็นกรด (pH 5 และ 6) แต่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกันที่สภาวะพีเอช 7 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกที่พีเอช 7 เป็นสภาวะที่ใช้ในการทดลองต่อไป โดยที่พีเอช 7 ให้ร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 92.35 และ 82.71 ตามลำดับ ดังภาพที่ 22 และตารางผนวกที่ 2 อธิบายได้ว่า ที่ค่าพีเอชต่ำหมู่อะมิโนของไคโตซานถูกโปรโทเนตด้วยโปรตอน ทำให้หมู่อะมิโนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ซึ่งจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับสีย้อมผ้าที่มีประจุลบ ทำให้ไคโตซานมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้ดีที่พีเอชต่ำ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตะชานจากเปลือกกุ้งและไคโตะชานเชิงพาณิชย์กับค่าพียะเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

3.3 อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่า

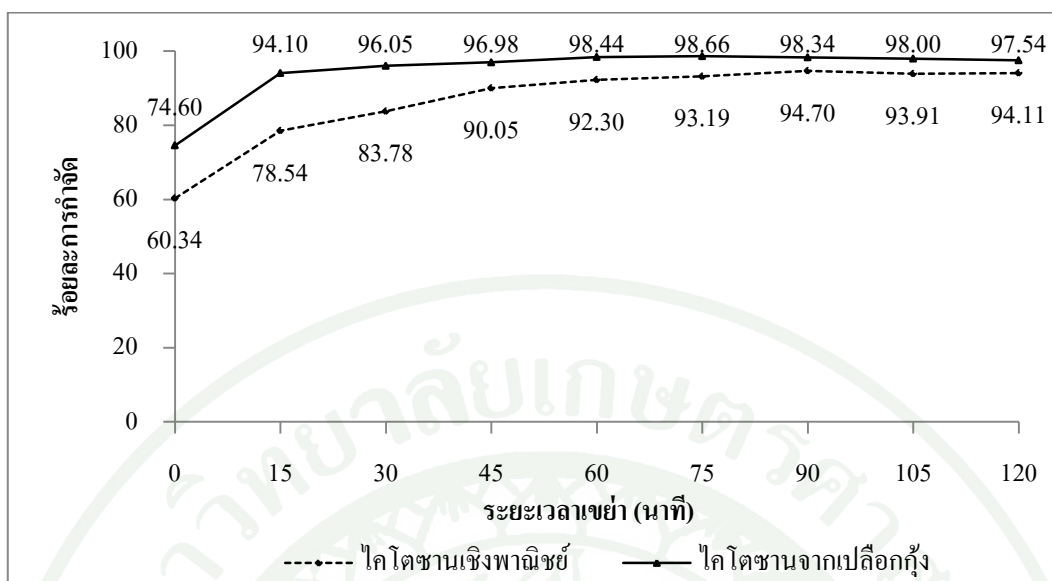
จากการทดลองในข้อ 4.3 ทำการแปรผันความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 0, 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบการเขย่ามีผลทำให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าเพิ่มขึ้น โดยไคโตะชานจากเปลือกกุ้งและไคโตะชานเชิงพาณิชย์สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดได้ดีที่ความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที คิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 98.30 และ 86.97 ตามลำดับ ดังภาพที่ 23 และตารางผนวกที่ 3 เนื่องจากการเพิ่มความเร็วรอบการเขย่าทำให้โมเลกุลของสีย้อมผ้าและน้ำเคลื่อนที่ได้มากขึ้น มีผลทำให้ฟิล์มน้ำที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับบางลง โมเลกุลของสีย้อมผ้าจึงเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับ และถูกดูดซับได้ดีขึ้น (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเร็วรอบการเย็บ

3.4 อิทธิพลของระยะเวลาเย็บ

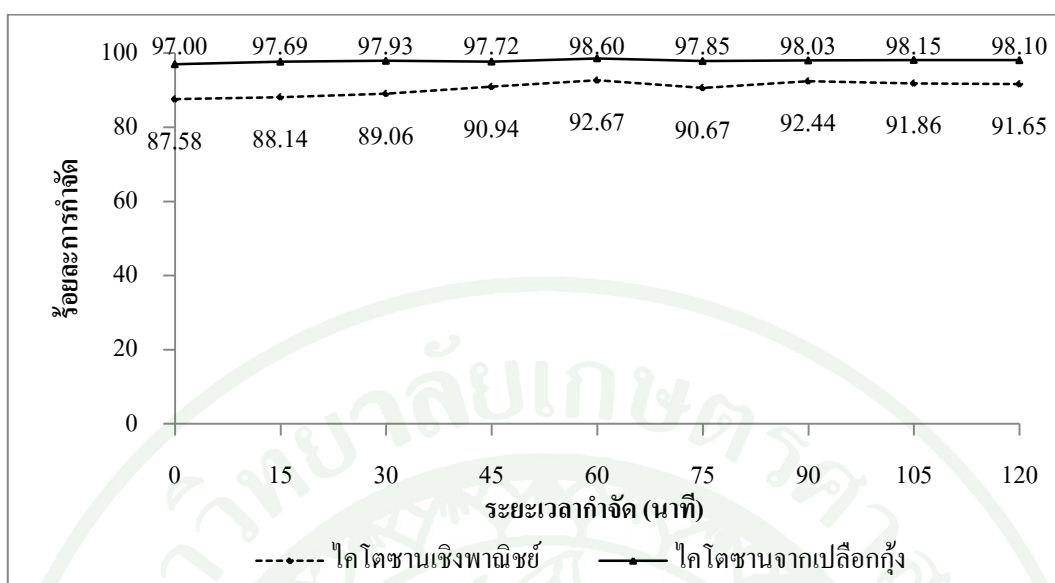
จากการทดลองในข้อ 4.4 ทำการแปรผันระยะเวลาเย็บเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ผลการทดลองพบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดที่ระยะเวลาเย็บ 60 นาทีได้คิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 98.44 และ 92.30 ตามลำดับ ดังภาพที่ 24 และตารางผนวกที่ 4 อธิบายได้ว่า การเย็บเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลของสีย้อมผ้าเคลื่อนที่มากขึ้น ก็มีโอกาสดูดซับด้วยไคโตซานได้มากขึ้น แต่เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวของไคโตซานดูดซับเต็มพื้นผิวแล้ว การกำจัดสีย้อมผ้าจะคงที่และลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากเปลือกกึ่งและโคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า

3.5 อิทธิพลของระยะเวลากำจัด

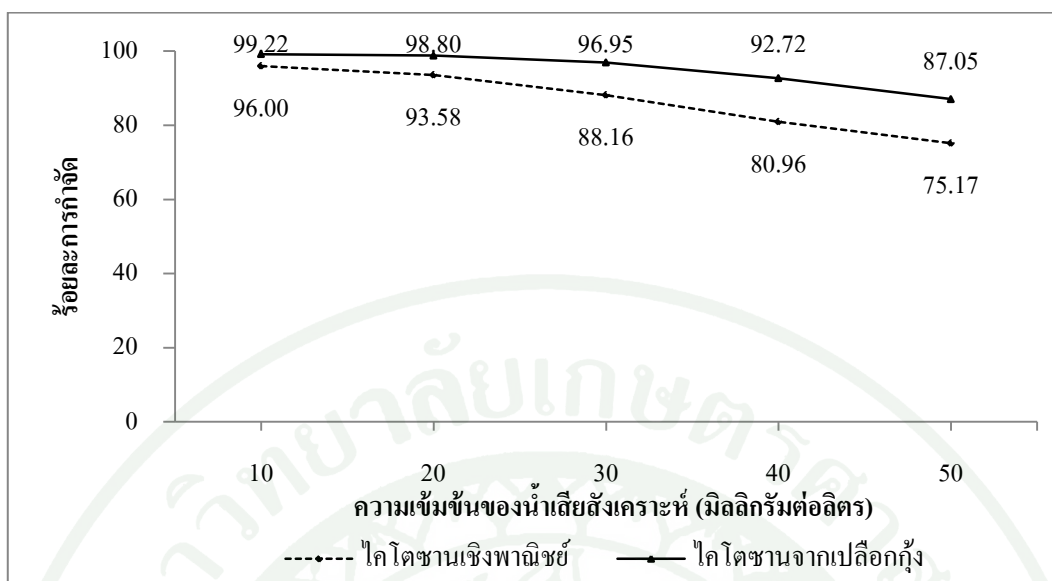
จากการทดลองในข้อ 4.5 ทำการแปรผันระยะเวลากำจัดเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ผลการทดลองพบว่า โคโตซานจากเปลือกกึ่งและโคโตซานเชิงพาณิชย์สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ที่ระยะเวลากำจัด 60 นาทีได้ดีที่สุด คิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 98.60 และ 92.67 ตามลำดับ ดังภาพที่ 25 และตารางผนวกที่ 5 อธิบายได้ว่า ในระยะเวลาเริ่มต้นพื้นผิวของโคโตซานมีมาก ทำให้การกำจัดสีย้อมผ้ามีมากขึ้น จนถึงระยะเวลานึ่งบริเวณพื้นผิวของโคโตซานดูดซับเต็มพื้นผิวและเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้ร้อยละการดูดซับค่อนข้างคงที่และอาจมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการคายซับมากกว่าการดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลากำจัด

3.6 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

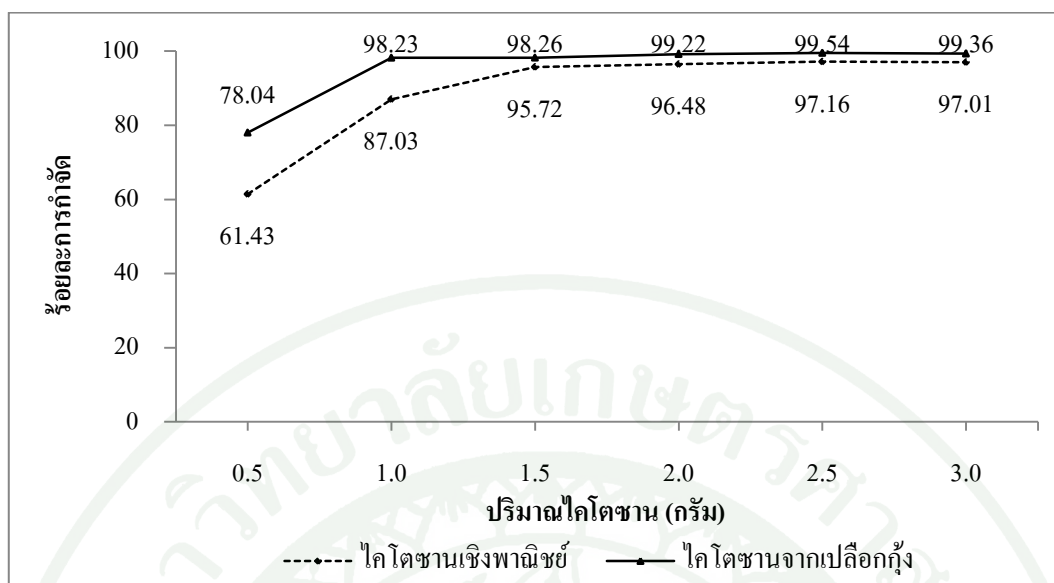
จากการทดลองในข้อ 4.6 ทำการแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด สูงสุดเฉลี่ยที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 99.22 และ 96.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 26 และตารางผนวกที่ 6 โดยความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้าลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงจะมีจำนวนโมเลกุลของสีย้อมผ้ามาก ในขณะที่พื้นผิวของไคโตซานมีจำกัด สีย้อมผ้าจึงไม่สามารถดูดซับไว้บนพื้นผิวของไคโตซาน ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

3.7 อิทธิพลของปริมาณไคโตซานที่เหมาะสม

จากการทดลองในข้อ 4.7 ทำการแปรผันปริมาณไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ให้เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 กรัม ผลการทดลองพบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ปริมาณ 2.0 กรัม สามารถกำจัดสีของผ้าทั้ง 9 ชนิดได้ดี คิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ยเท่ากับ 99.22 และ 96.48 ตามลำดับ ดังภาพที่ 27 และตารางผนวกที่ 7 อธิบายได้ว่า เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น ทำให้สีของผ้าถูกกำจัดมากขึ้นด้วย แต่เมื่อถึงจุดสมดุลความสามารถในการกำจัดสีของผ้าด้วยไคโตซานจะคงที่และมีแนวโน้มลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

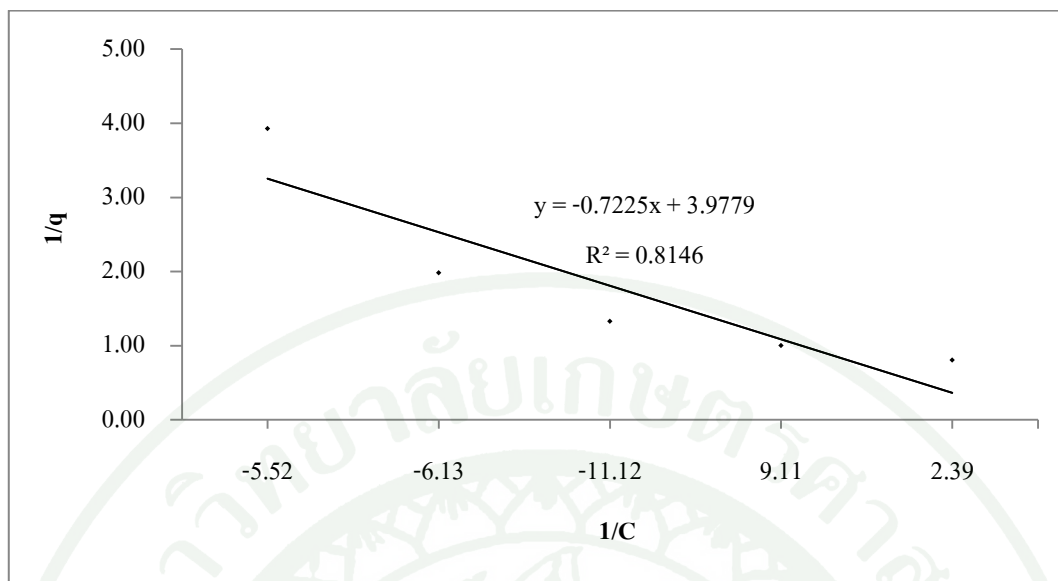


ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการจัดสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากเปลือกกึ่งและโคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณโคโตซานที่เหมาะสม

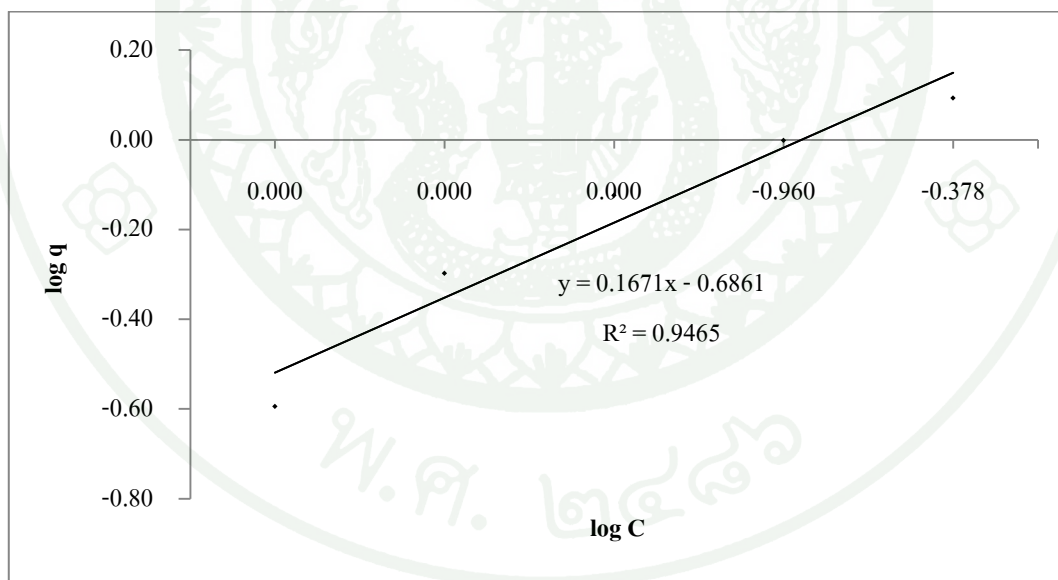
3.8 อิทธิพลความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์กับไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อมผ้า

3.8.1 ไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากเปลือกกึ่ง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.8 โดยใช้โคโตซานจากเปลือกกึ่ง จำนวนตัวแปรในไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชดังตารางผนวกที่ 8 แล้วนำมาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิชพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโคโตซานจากเปลือกกึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8146 และ 0.9465 ตามลำดับ ดังภาพที่ 28 และ 29 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของฟรุนดลิชมากกว่าแลงเมียร์ นั่นคือ การกำจัดสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากเปลือกกึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช โดยกลไกการดูดซับของฟรุนดลิชแสดงได้ว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด การดูดซับไม่สามารถบอกปริมาณของตัวถูกดูดซับได้ เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ เมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับได้ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



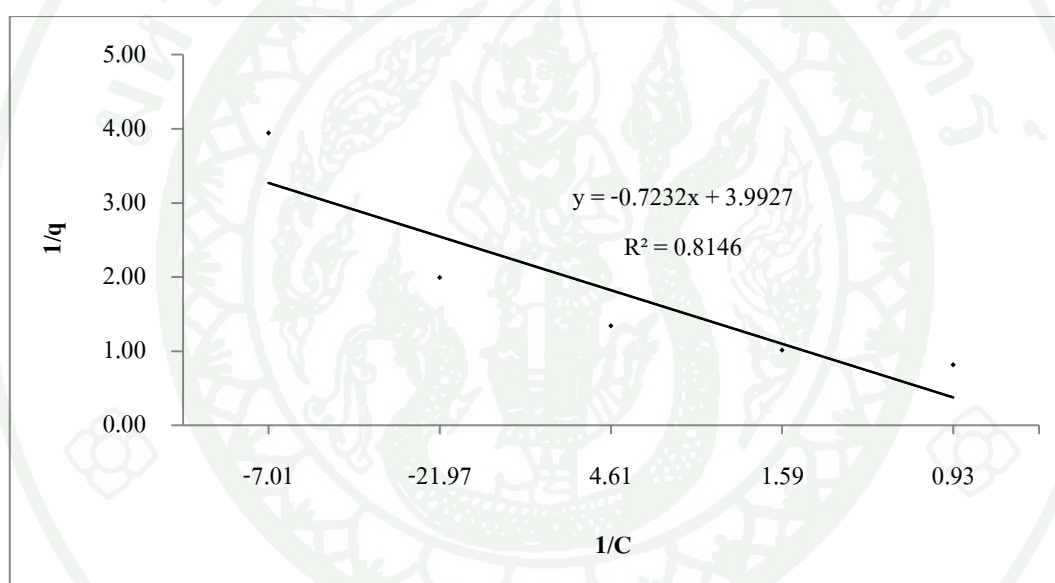
ภาพที่ 28 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง



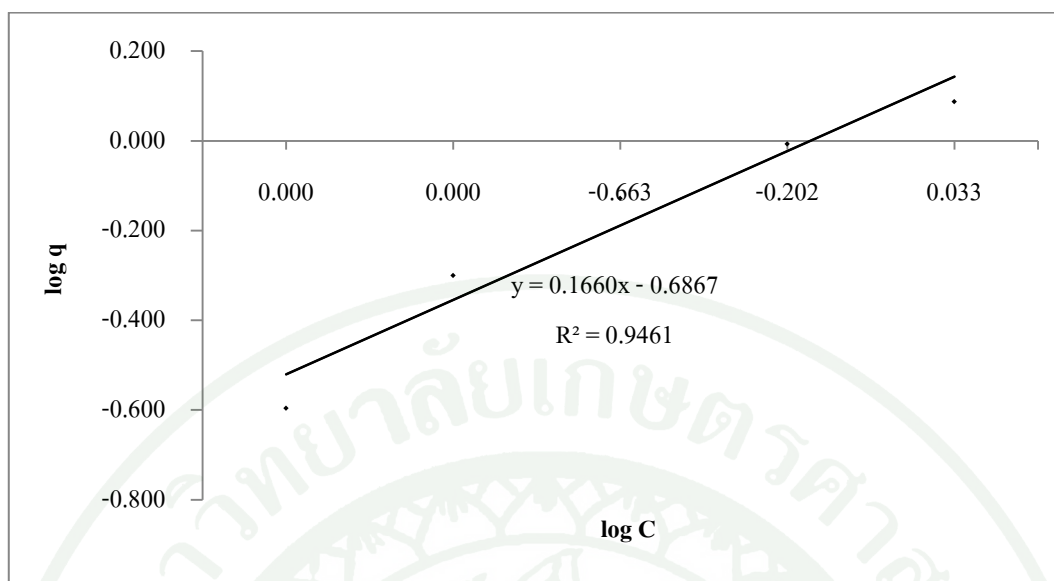
ภาพที่ 29 ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

3.8.2 ไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.8 โดยใช้ไคโตซานเชิงพาณิชย์ จำนวนตัวแปรในไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชดังตารางผนวกที่ 9 แล้วนำมาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิชพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์มีค่าเท่ากับ 0.8146 และ 0.9461 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30 และ 31 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของฟรุนดลิชมากกว่าแลงเมียร์ นั่นคือ การกำจัดสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์สอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช โดยกลไกการดูดซับของ ฟรุนดลิชอธิบายได้เช่นเดียวกับการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง



ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 31 ไอโซเทอร์มฟรอนด์ของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์

4. ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบดซ์

จากการทดลองในข้อ 5 พบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด คิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 99.22 และ 96.48 ตามลำดับ (ปริมาณสีย้อมผ้าที่เหลือ 0.1809 และ 0.1427 mg/L ตามลำดับ) ดังตารางที่ 8 โดยไคโตซานจากเปลือกกุ้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ได้มากกว่าไคโตซานเชิงพาณิชย์ เนื่องจากไคโตซานจากเปลือกกุ้งมีลักษณะค่อนข้างบริสุทธิ์ และมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียดมากกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่า แต่ค่าที่ได้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ เพราะลักษณะโครงสร้างของไคโตซานเหมือนกัน

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	98.97	93.31
2% Yellow LS-4G	98.85	93.89
2% Orange LS-BR	99.08	93.62
2% Red LS-B	99.23	97.49
2% Blue LS-3R	99.44	97.90
6% Super Black G	99.28	97.77
4% Navy LS-G	99.53	97.88
2% Turquoise H-GN	99.46	98.60
2% Br.Blue LS-G	99.09	97.85
เฉลี่ย	99.22	96.48

จากสมการที่ 3 ($q_w = V(C_0 - C)$) สามารถคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมได้ดังนี้

$$q(2) = 0.05[10 - (-0.1809)]$$

$$q = \frac{0.05(10 + 0.1809)}{2}$$

$$q = 0.2545 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ดังนั้น ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง 1.0 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมผ้าได้ 0.2545 มิลลิกรัม

นอกจากนี้แล้วจากสมการที่ 3 ($qW = V(C_0 - C)$) สามารถคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานเชิงพาณิชย์เป็นมิลลิกรัมต่อกรัมได้ดังนี้

$$q(2) = 0.05[10 - (-0.1427)]$$

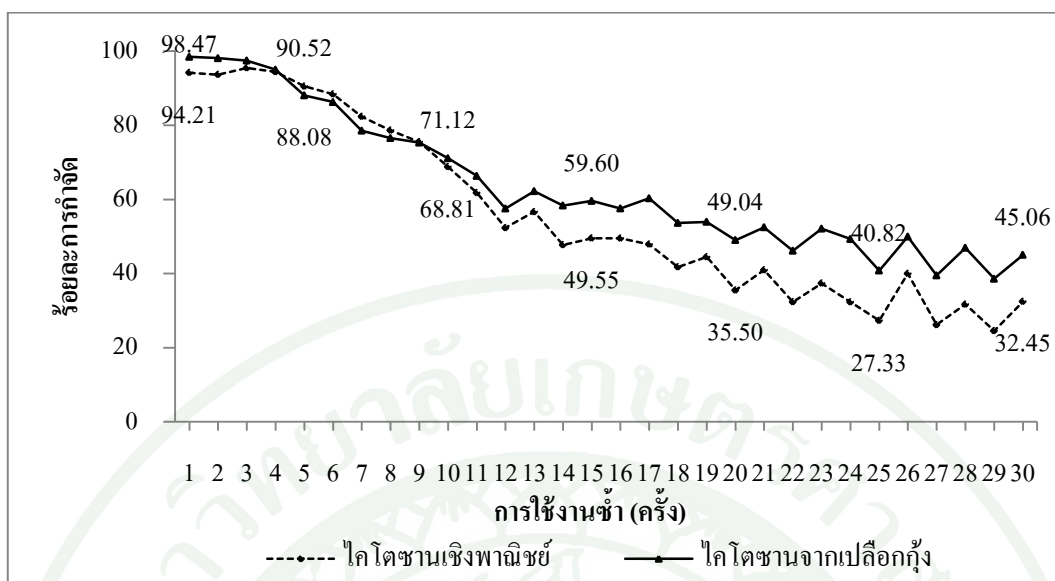
$$q = \frac{0.05(10 + 0.1427)}{2}$$

$$q = 0.2536 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ดังนั้น ไคโตซานเชิงพาณิชย์ 1.0 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมผ้าได้ 0.2536 มิลลิกรัม

5. ประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์

เมื่อนำไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์มาทดลองซ้ำ ๆ จนกว่าไคโตซานมีประสิทธิภาพที่หรือลดลงจนไม่สามารถดูดซับได้ จากการทดลองในข้อ 6 พบว่า ไคโตซานทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์ลดน้อยลงตามจำนวนครั้งของการใช้งานซ้ำเมื่อเทียบกับการใช้งานครั้งแรก ซึ่งการใช้งานครั้งแรกให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้ามากที่สุดคือ สามารถกำจัดสีย้อมผ้าได้ร้อยละ 98.47 และ 94.21 ตามลำดับ และค่อย ๆ ลดลง จนถึงการใช้งานซ้ำในครั้งที่ 30 สามารถกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ได้ร้อยละ 45.06 และ 32.45 ตามลำดับ ดังภาพที่ 32 และตารางผนวกที่ 10 เมื่อใช้งานซ้ำแล้วไคโตซานทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง และคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง เนื่องจากตัวดูดซับมีการดูดซับจนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวจึงไม่สามารถดูดซับได้อีก (นิพนธ์ และ คณิดา, 2550)



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโคโตซานจากเปลือกกุ้งและโคโตซานเชิงพาณิชย์กับการใช้งานซ้ำ

6. คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ พีเอช การนำไฟฟ้า ความขุ่น ความเค็ม ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด น้ำมันและไขมัน ดีไอ บีไอดี และซีไอดี ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง อุตสาหกรรม
พีเอช	9.3	5.5-9.0
การนำไฟฟ้า (μs/cm)	108,000	ไม่ได้กำหนด
ความขุ่น (NTU)	46.3	ไม่ได้กำหนด
ความเค็ม	1.9	ไม่ได้กำหนด
ของแข็งทั้งหมด (mg/L)	166,000	ไม่ได้กำหนด
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)	520	ไม่เกิน 50

ตารางที่ 9 (ต่อ)

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यุงฯ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง อุตสาหกรรม
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/L)	165,480	ไม่เกิน 3,000
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	0.022	ไม่เกิน 5
ดีไอ (mg/L)	0.9	ไม่ได้กำหนด
บีโอดี (mg/L)	40.43	ไม่เกิน 20
ซีโอดี (mg/L)	809.6	ไม่เกิน 120

7. ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यุงฯ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบตช์

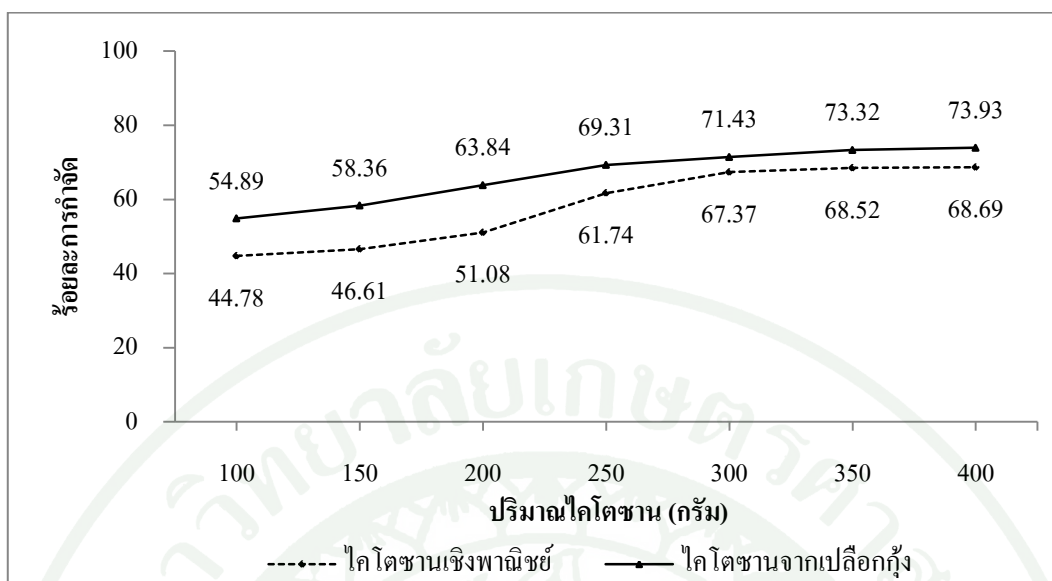
จากการทดลองในข้อ 8 โดยซั่งไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ปริมาณ 2 กรัม เติมน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यุงฯ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์คือ พีเอช 7 ความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 60 นาที และระยะเวลากำจัด 60 นาที ผลการทดลองพบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 53.53 และ 51.98 ตามลำดับ ดังตารางที่ 10 จากการทดลองแบบแบตช์เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์ (ตารางที่ 8) กับน้ำเสียจริง (ตารางที่ 10) จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าของไคโตซานทั้งสองชนิดมีค่าที่แตกต่างกัน โดยร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจริงมีค่าน้อยกว่าร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีสารปนเปื้อนมากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ และไคโตซานมีคุณสมบัติในการดูดซับสารที่เป็นประจุลบและโลหะหนักได้ดี อาจทำให้สิ่งเจือปนอื่น ๆ เกิดการเกาะติดที่ผิวของไคโตซานได้ ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อมผ่าน้อยลง

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุ้งๆ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	42.54	39.52
2% Yellow LS-4G	44.77	43.14
2% Orange LS-BR	27.80	25.70
2% Red LS-B	51.46	51.15
2% Blue LS-3R	59.95	57.40
6% Super Black G	53.88	54.68
4% Navy LS-G	63.49	63.10
2% Turquoise H-GN	66.33	65.01
2% Br.Blue LS-G	71.57	68.08
เฉลี่ย	53.53	51.98

8. ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุ้งๆ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ ในระดับ pilot scale

จากการทดลองในข้อ 9 ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุ้งๆ ปริมาตร 10 ลิตร ใส่ในถังทดลอง ปรับพีเอชน้ำเสียเป็น 7 แล้วใส่ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง ครั้งแรก 100 กรัม ครั้งต่อไปเพิ่มครั้งละ 50 กรัม จนครบ 400 กรัม ความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบ ต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 60 นาที และระยะเวลากำจัด 60 นาที ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุ้งๆ โดยใช้ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ปริมาณ 400 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงสุดที่ ร้อยละการกำจัด 73.93 และ 68.69 ตามลำดับ ดังภาพที่ 33 และตารางผนวกที่ 11 โดยไคโตซานจากเปลือกกุ้งสามารถกำจัดสีย้อมผ้าได้ดีกว่าไคโตซานเชิงพาณิชย์ แต่ค่าที่ได้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีข้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานข้อมผ้า โครงการพัฒนาคลองฯ ด้วยโคโคซานจากเปลือกกึ่งและโคโคซานเชิงพาณิชย์โดยการประยุกต์ใช้งานจริงกับปริมาณโคโคซาน

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานข้อมผ้า โครงการพัฒนาคลองฯ ภายหลังการประยุกต์ใช้งานจริงด้วยโคโคซานจากเปลือกกึ่งและโคโคซานเชิงพาณิชย์พบว่า โคโคซานทั้งสองชนิดสามารถบำบัดมลสารอื่น ๆ ได้คือ ค่าการนำไฟฟ้า ความขุ่น ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ น้ำมันและไขมัน ดีโอ บีโอดี และซีโอดี รวมทั้งลดค่าพีเอช ในน้ำเสียอีกด้วย ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดูฯ ภายหลังการกำจัดสีย้อมผ้า โดยใช้โคลิโดซานจากเปลือกกุ้งและโคลิโดซานเชิงพาณิชย์เป็นตัวดูดซับ

พารามิเตอร์	โคลิโดซานจากเปลือกกุ้ง			โคลิโดซานเชิงพาณิชย์		
	ก่อนกำจัด	หลังกำจัด	ร้อยละการกำจัด	ก่อนกำจัด	หลังกำจัด	ร้อยละการกำจัด
พีเอช	9.3	8.5	ลดลงจาก 9.3 เป็น 8.5	9.3	8.5	ลดลงจาก 9.3 เป็น 8.5
การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	108,000	3,910	96.38	108,000	3,940	96.35
ความขุ่น (NTU)	46.3	14.33	69.05	46.3	20.5	55.72
ความเค็ม	1.9	1.9	-	1.9	1.9	-
ของแข็งทั้งหมด (mg/L)	166,000	3,215	98.06	166,000	3,471	97.91
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)	520	172	66.92	520	185	64.42
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (mg/L)	165,480	3,043	98.16	165,480	3,286	98.01
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	0.022	0.019	13.64	0.022	0.020	9.09
ดีไอ (mg/L)	0.9	6.6	86.36	0.9	4.3	79.07
บีไอดี (mg/L)	40.43	11.14	72.45	40.43	11.48	71.61
ซีไอดี (mg/L)	809.6	560	30.83	809.6	720	11.07

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ได้แก่ 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดุษฎี ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง และไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบดซ์ และในระดับ pilot scale เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง และไคโตซานเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบดซ์คือ ปริมาณไคโตซาน 2.0 กรัม พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ 7 ความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 60 นาที ระยะเวลากำจัด 60 นาที และความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร โดยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดคิดเป็นร้อยละการกำจัดเฉลี่ย 99.22 และ 96.48 ตามลำดับ เมื่อทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดุษฎี พบว่า ไคโตซานทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดคิดเป็นร้อยละ 53.53 และ 51.98 ตามลำดับ ซึ่งไคโตซานจากเปลือกกุ้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้ามากกว่าไคโตซานเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียดมากกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า จึงดูดซับได้มากกว่าไคโตซานเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้กลไกการดูดซับของไคโตซานทั้งสองชนิดสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช และจากการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานซ้ำในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์พบว่า ไคโตซานทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ลดน้อยลงตามจำนวนครั้งของการใช้งานซ้ำ เมื่อเทียบกับการใช้งานครั้งแรก และก่อนข้างครั้งที่ 30 ที่ร้อยละการกำจัด 45.06 และ 32.45 ตามลำดับ

เมื่อทดลองประยุกต์ใช้งานจริงกับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดุษฎี พบว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ปริมาณ 400 กรัม สามารถกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียปริมาตร 10 ลิตร ได้ร้อยละ 73.93 และ 68.69 ตามลำดับ

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ สามารถกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถประยุกต์ใช้กับน้ำเสียประเภทอื่นได้ รวมทั้งยังสามารถบำบัดมลสารอื่น ๆ ได้ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า ความขุ่นของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ น้ำมันและไขมัน ดีโอ บีโอดี และซีโอดี อีกทั้งยังลดค่าฟิออซินในน้ำเสียด้วย

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในครั้งนี้ ทำให้ทราบข้อมูลบางอย่างเพื่อนำไปปรับปรุงงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ ดังนี้

1. ควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับชีวภาพชนิดอื่นมาทำการทดลองเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าที่ดีที่สุด เช่น แก่นหมึก กระจูดหมึก กระจูดปูล เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์ ทั้งก่อนและหลังการใช้งาน
3. ควรศึกษาการนำไคโตซานที่ผ่านการดูดซับแล้วไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น นำไปทำปุ๋ยเรซิน เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

กาวิ ศรีกุลกิจ. 2545ก. สีย้อม. วารสารคัลเลอร์เวย์ 7 (34): 14-16.

_____. 2545ข. สีย้อม. วารสารคัลเลอร์เวย์ 7 (35): 16-19.

ขวัญฤทัย ลือสุวรรณทัต. 2545. การพัฒนาผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิวที่มีส่วนผสมของเกลือโคโต
แซน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จันทรา นรินพรัตน์. 2547. การใช้โคโตซานร่วมกับตะกอนเร่งในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.

โชติรส เอี่ยมสะอาด. 2545. การกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ด้วยการดูดซับโดยใช้โคโตซาน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นันทยา ขานูเมศ. 2537. ความเป็นพิษและมลพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม
สิ่งทอ. วารสารคัลเลอร์เวย์ 1 (6): 27-41.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทาง
เคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2536. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วารสาร TTIS Textile Digest 8:
20-21.

พัฒน์นันท วงศ์วิวัฒน์. 2545. การสกัดโคติน-โคโตซานจากเปลือกหอย. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รัตนารุจิรวนิช. 2543. การดูดซับสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตแซน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริณา ชลสรานนท์. 2544. การสกัดไคโตซานจากเปลือกกุ้ง. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

2552. ไคตินและไคโตซาน. แหล่งที่มา: <http://chitosan.igetweb.com/>, 8 สิงหาคม 2554.

สกล ศิริรัตน์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิกจากสารละลาย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สิงห์น้อย บุญรักษ์. 2540. Eco-Textile. วารสารคัลเลอร์เวย์ 2 (13): 15.

สุภาวดี น้อยน้ำใส, ศศิธร พุทวงษ์ และ สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์. 2550. การปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับของกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเพื่อดูดซับสีธรรมชาติในน้ำ, ใน เอกสารประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

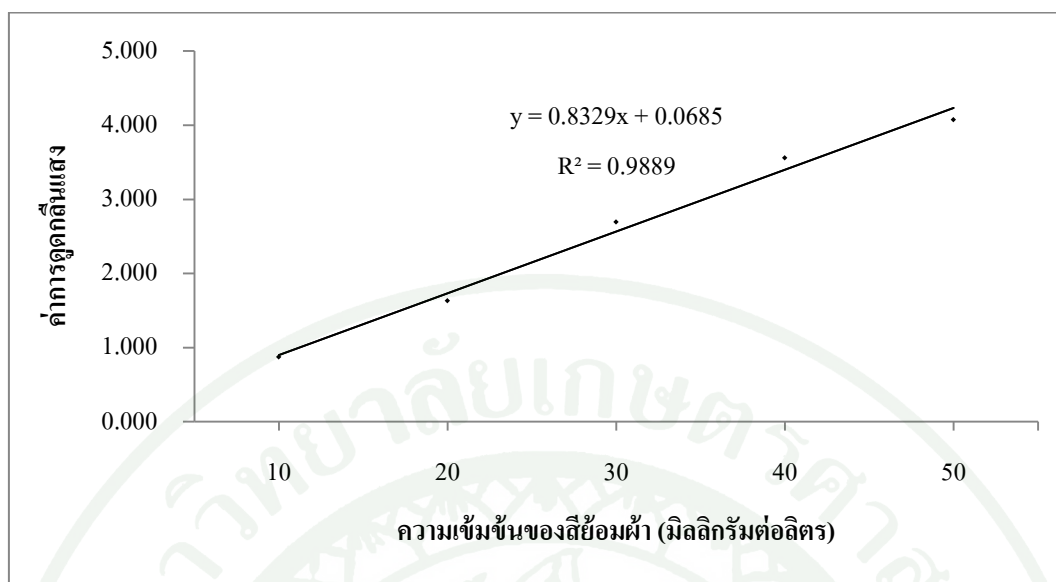
อศปภา สุขอัสจะสกุล. 2555. การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย ศูนย์ใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาและกกกลม. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Amornsri, A. 2003. Colour Chemistry. **Textile Technology**. 7: 23.

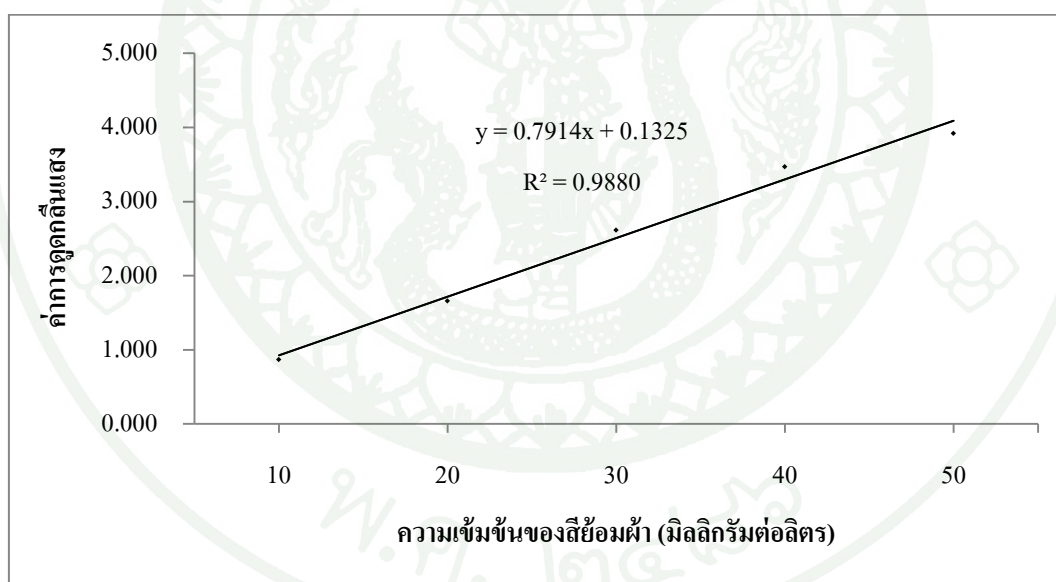
Austin, P.R., C.J. Brine, J.E. Castle and J.P. Zikakis. 1981. Chitin: New Facets of Research. **Science** 12: 749-753.

- Chiou, M.S. and H.Y. Li. 2002. Equilibrium and Kinetic Modeling of Adsorption of Reactive Dye on Cross-Linked Chitosan Beads. **Hazardous Materials** 93 (2): 233-248.
- Feng, C.W., L.T. Ru and S.J. Ruey. 2000. Comparative Adsorption of Metal and Dye on Flake and Bead Types of Chitosan Prepared from Fishery Wastes. **Hazardous Materials** 73: 63-75.
- Maron, S.H. and C.F. Prutton. 1961. **Principle of Physical Chemical**. 3rd ed. Macmillan Co, New York.
- Muzzarelli, R.A.A. 1976. **Chitin**. Pergamon Press Ltd., New York.
- Noll, K.E., V. Gounaris and W.S. Hou. 1992. **Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control**. Lewis Publishers, Florida.
- Winterown, J.G. and P.A. Sandford. 1995. Chitin and Chitosan, pp. 441-462. In A.M. Stephen, ed. **Food Polysaccharide and Their Application**. Marcel Dekker, New York.

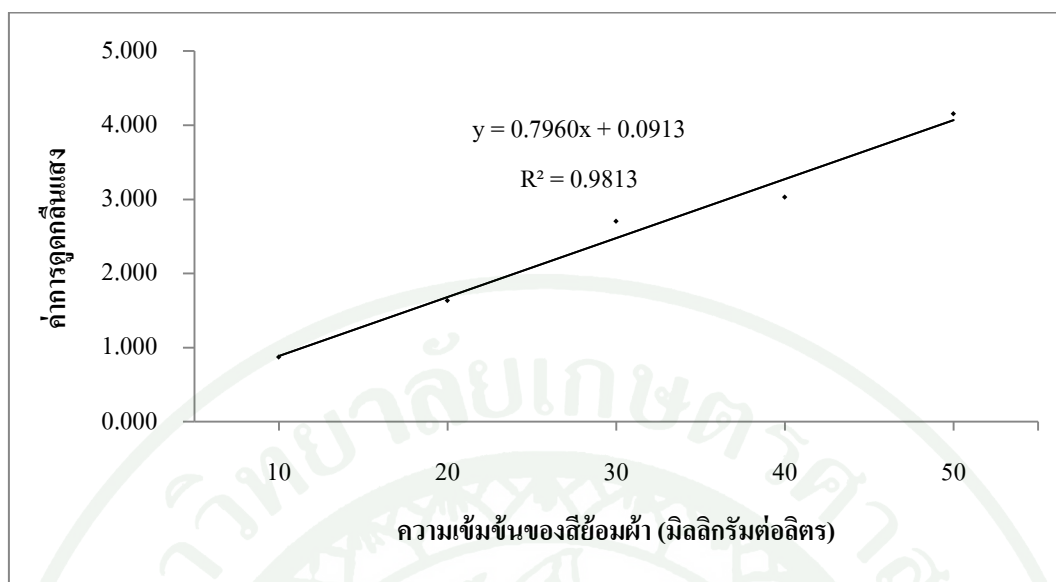




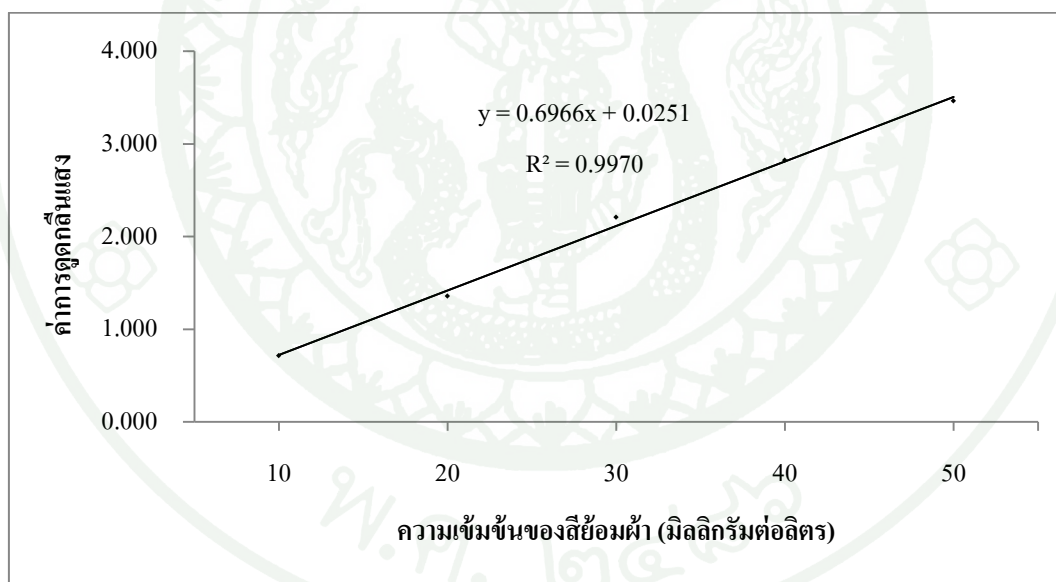
ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานสี 2% Yellow LS-R-01



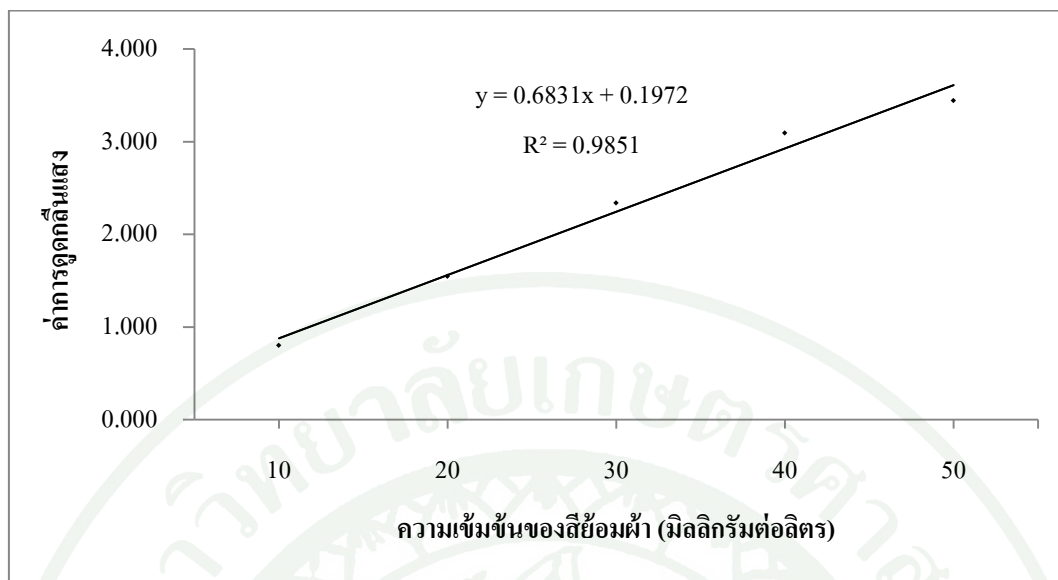
ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานสี 2% Yellow LS-4G



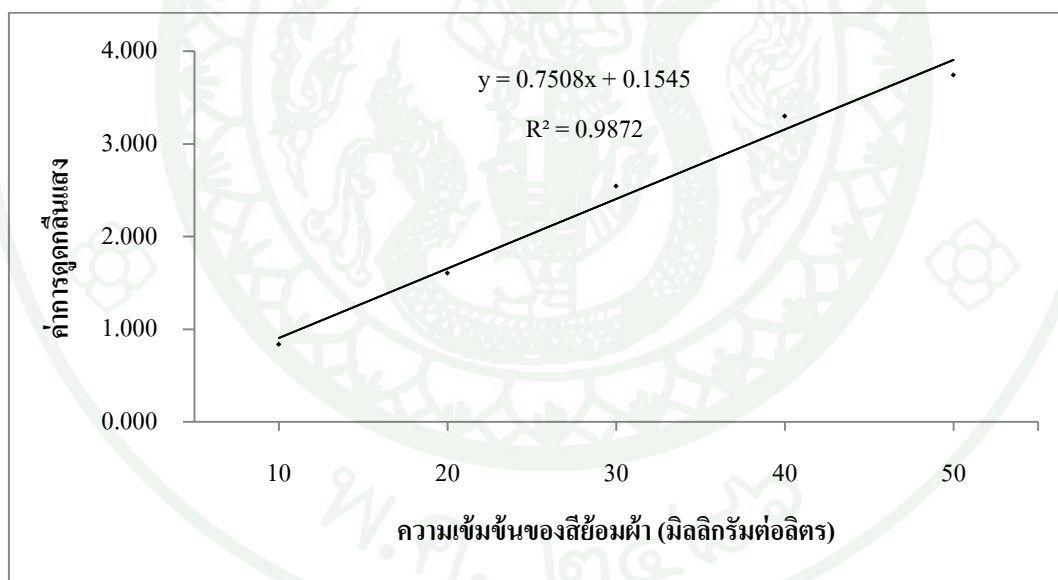
ภาพผนวกที่ 3 กราฟมาตรฐานสี 2% Orange LS-BR



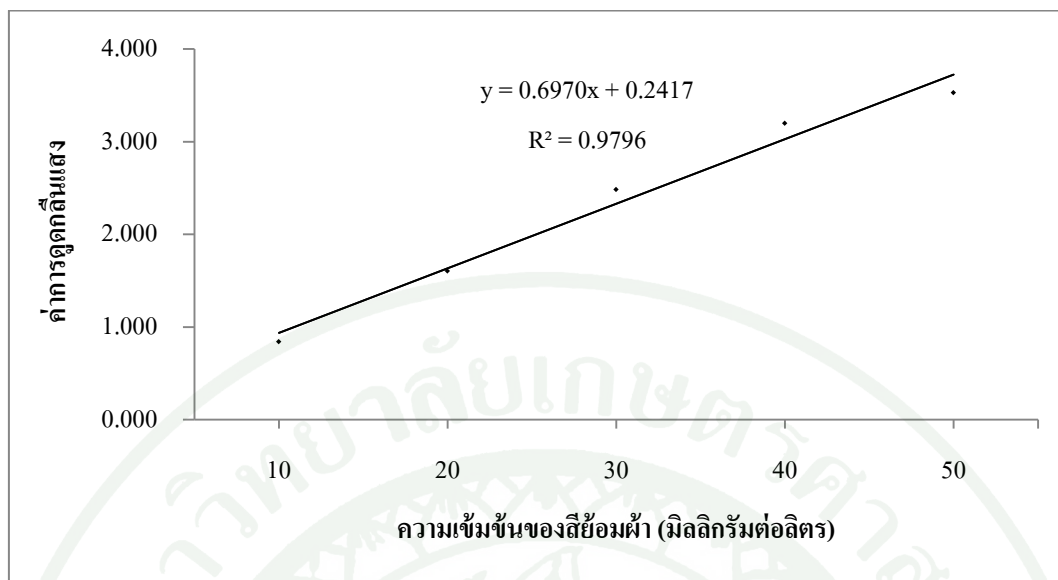
ภาพผนวกที่ 4 กราฟมาตรฐานสี 2% Red LS-B



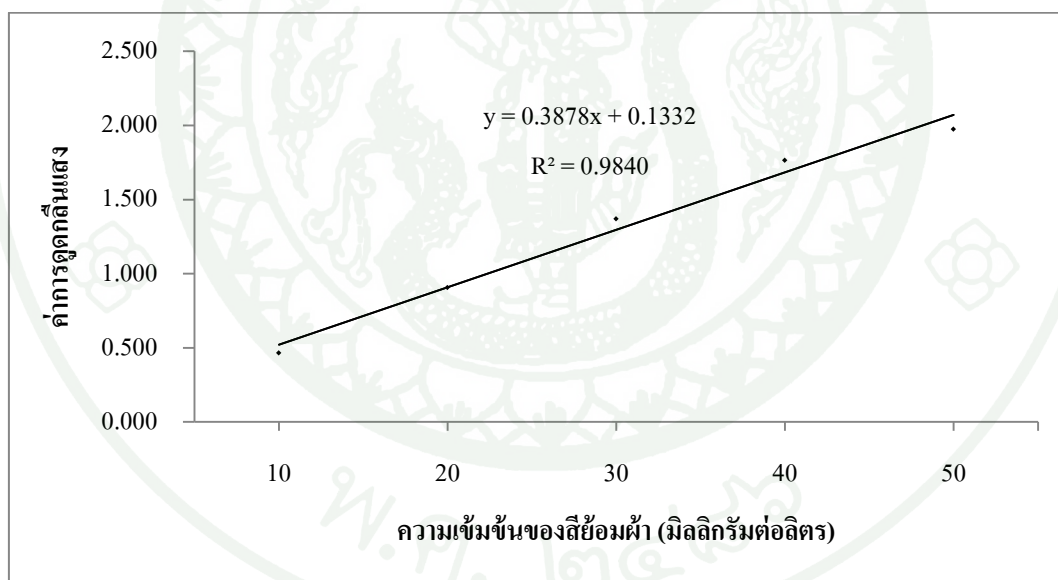
ภาพผนวกที่ 5 กราฟมาตรฐานสี 2% Blue LS-3R



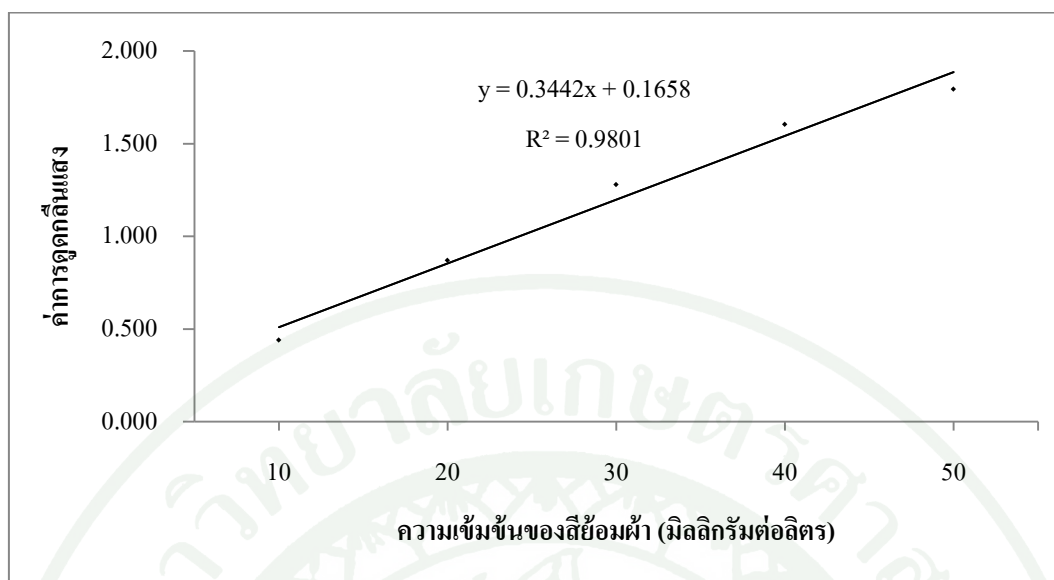
ภาพผนวกที่ 6 กราฟมาตรฐานสี 6% Super Black G



ภาพผนวกที่ 7 กราฟมาตรฐานสี 4% Navy LS-G



ภาพผนวกที่ 8 กราฟมาตรฐานสี 2% Turquoise H-GN



ภาพผนวกที่ 9 กราฟมาตรฐานสี 2% Br.Blue LS-G

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซานเริ่มต้น 2.0 กรัม

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	93.27	79.23
2% Yellow LS-4G	93.64	78.80
2% Orange LS-BR	93.75	79.09
2% Red LS-B	93.05	90.34
2% Blue LS-3R	93.13	86.55
6% Super Black G	90.76	86.15
4% Navy LS-G	91.82	83.18
2% Turquoise H-GN	90.92	81.08
2% Br.Blue LS-G	90.79	79.96
เฉลี่ย	92.35	82.71

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 7

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	93.27	79.23
2% Yellow LS-4G	93.64	78.80
2% Orange LS-BR	93.75	79.09
2% Red LS-B	93.05	90.34
2% Blue LS-3R	93.13	86.55
6% Super Black G	90.76	86.15
4% Navy LS-G	91.82	83.18
2% Turquoise H-GN	90.92	81.08
2% Br.Blue LS-G	90.79	79.96
เฉลี่ย	92.35	82.71

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	98.31	83.14
2% Yellow LS-4G	98.60	82.09
2% Orange LS-BR	98.63	82.91
2% Red LS-B	98.60	92.62
2% Blue LS-3R	98.25	89.80
6% Super Black G	98.63	90.82
4% Navy LS-G	98.38	88.40
2% Turquoise H-GN	97.59	86.48
2% Br.Blue LS-G	97.66	86.51
เฉลี่ย	98.30	86.97

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาแช่ 60 นาที

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	98.35	87.94
2% Yellow LS-4G	98.76	87.34
2% Orange LS-BR	98.71	88.49
2% Red LS-B	98.63	96.18
2% Blue LS-3R	98.45	94.53
6% Super Black G	98.76	95.65
4% Navy LS-G	98.01	94.34
2% Turquoise H-GN	98.38	93.21
2% Br.Blue LS-G	97.87	92.97
เฉลี่ย	98.44	92.30

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับระยะเวลากำจัด 60 นาที

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	98.83	88.49
2% Yellow LS-4G	98.43	88.20
2% Orange LS-BR	99.16	89.39
2% Red LS-B	98.75	95.01
2% Blue LS-3R	98.26	94.98
6% Super Black G	98.33	95.44
4% Navy LS-G	98.83	94.83
2% Turquoise H-GN	98.66	94.02
2% Br.Blue LS-G	98.14	93.65
เฉลี่ย	98.60	92.67

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	98.97	93.59
2% Yellow LS-4G	98.85	92.69
2% Orange LS-BR	99.08	93.93
2% Red LS-B	99.23	98.04
2% Blue LS-3R	99.44	97.20
6% Super Black G	99.28	97.97
4% Navy LS-G	99.53	97.09
2% Turquoise H-GN	99.46	96.67
2% Br.Blue LS-G	99.09	96.83
เฉลี่ย	99.22	96.00

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด ของไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับปริมาณไคโตซานที่เหมาะสม 2.0 กรัม

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	98.97	93.31
2% Yellow LS-4G	98.85	93.89
2% Orange LS-BR	99.08	93.62
2% Red LS-B	99.23	97.49
2% Blue LS-3R	99.44	97.90
6% Super Black G	99.28	97.77
4% Navy LS-G	99.53	97.88
2% Turquoise H-GN	99.46	98.60
2% Br.Blue LS-G	99.09	97.85
เฉลี่ย	99.22	96.48

ตารางผนวกที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับของไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

ปริมาณ ไคโตซาน (กรัม)	C_0	C	V (L)	q	1/q	1/C	log q	log C
2.0	10	-0.181	0.05	0.255	3.929	-5.524	-0.594	0.000
2.0	20	-0.163	0.05	0.504	1.984	-6.138	-0.298	0.000
2.0	30	-0.090	0.05	0.752	1.329	-11.121	-0.124	0.000
2.0	40	0.110	0.05	0.997	1.003	9.111	-0.001	-0.960
2.0	50	0.419	0.05	1.240	0.807	2.397	0.093	-0.378

ตารางผนวกที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับของไคโตซานเชิงพาณิชย์

ปริมาณ ไคโตซาน (กรัม)	C_0	C	V (L)	q	1/q	1/C	log q	log C
2.0	10	-0.143	0.05	0.254	3.944	-7.015	-0.596	0.000
2.0	20	-0.046	0.05	0.501	1.995	-21.978	-0.300	0.000
2.0	30	0.217	0.05	0.745	1.343	4.617	-0.128	-0.663
2.0	40	0.628	0.05	0.984	1.016	1.593	-0.007	-0.202
2.0	50	1.078	0.05	1.223	0.818	0.937	0.087	0.033

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์กับการใช้งานซ้ำ

การใช้งานซ้ำ (ครั้ง)	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
1	98.47	94.21
2	98.10	93.69
3	97.48	95.48
4	95.01	94.42
5	88.08	90.52
6	86.27	88.41
7	78.56	82.37
8	76.56	78.65
9	75.33	75.52
10	71.12	68.81
11	66.34	61.80
12	57.56	52.33
13	62.24	56.65
14	58.36	47.74
15	59.60	49.55
16	57.58	49.52

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

การใช้งานซ้ำ (ครั้ง)	ร้อยละการกำจัด	
	โคโตะซานจากเปลือกกุ้ง	โคโตะซานเชิงพาณิชย์
17	60.31	47.91
18	53.67	41.77
19	53.96	44.48
20	49.04	35.50
21	52.49	40.95
22	46.16	32.36
23	52.12	37.38
24	49.33	32.31
25	40.82	27.33
26	49.97	39.99
27	39.51	26.16
28	46.96	31.70
29	38.60	24.55
30	45.06	32.45

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า
โครงการพัฒนาคอตตงฯ ด้วยไคโตซานจากเปลือกกุ้งและไคโตซานเชิงพาณิชย์
กับปริมาณไคโตซาน 400 กรัม โดยการประยุกต์ใช้งานจริง

สี	ร้อยละการกำจัด	
	ไคโตซานจากเปลือกกุ้ง	ไคโตซานเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	55.99	45.93
2% Yellow LS-4G	56.56	55.77
2% Orange LS-BR	57.81	54.08
2% Red LS-B	74.32	72.86
2% Blue LS-3R	83.13	78.88
6% Super Black G	79.41	75.40
4% Navy LS-G	84.92	68.78
2% Turquoise H-GN	86.01	83.38
2% Br.Blue LS-G	87.17	83.09
เฉลี่ย	73.93	68.69

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวจุฑารัตน์ ควรรดิ
เกิดวันที่ 12 ตุลาคม 2529
สถานที่เกิด โรงพยาบาลสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์
ประวัติการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ตำแหน่งปัจจุบัน -
สถานที่ทำงานปัจจุบัน -
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -
ทุนการศึกษาที่ได้รับ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ