



วิทยานิพนธ์

การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกที่จากน้ำทิ้ง
โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

PREPARATION OF WATER HYACINTH ADSORBENT FOR
REMOVAL OF DIRECT DYES FROM TEXTILE WASTEWATER

นางสาวจินตนา จุลอุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. ๒๕๕๐



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรทจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

Preparation of Water Hyacinth Adsorbent for Removal of Direct Dyes from
Textile Wastewater

นามผู้วิจัย นางสาวจินตนา จุลอุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วิทยา ปิ่นสุวรรณ, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์พิลาณี ไวณอมสัจย์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 5 เดือน มิ.ย. พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกซ์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

Preparation of Water Hyacinth Adsorbent for Removal of Direct Dyes from
Textile Wastewater

โดย

นางสาวจินตนา จุลอุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิต)

พ.ศ. 2550

จินตนา จุลอุล 2550: การเตรียมตัวดูคชับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกท์จากน้ำทิ้ง
โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม ภาควิชาการที่ปรึกษา:
รองศาสตราจารย์พนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D. 99 หน้า

การศึกษานี้เกี่ยวกับการเตรียมตัวดูคชับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกท์จากน้ำทิ้ง
โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีเพื่อปรับสภาพตัวดูคชับ
ซึ่งตัวดูคชับที่ได้มีลักษณะเป็นผงและถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ความเข้มข้น 15% 20% 25% และตัวดูคชับที่ไม่ปรับสภาพ ทำการศึกษากว้างที่เหมาะสม
ของค่า พีเอช ปริมาณตัวดูคชับ เวลาการปั่นกววน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นสีย้อมไคเรกท์
โดยทำการทดลองแบบเบดซ์ พบว่าประสิทธิภาพตัวดูคชับเป็นไปตามกลไกสมการ
การดูดซับของฟรอนลิชและแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงตัวดูคชับจากผักตบชวาสามารถ
กำจัดสีย้อมไคเรกท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จินตนา จุลอุล
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

22 / พ.ค. / 50

Jintana Junlaoun 2007: Preparation of Water Hyacinth Adsorbent for Removal of Direct Dyes from Textile Wastewater. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Assistant Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 99 pages.

A novel adsorbent was developed from Water Hyacinth for removal of direct dyes from textile wastewater. The adsorbent in the form of fine powder was prepared by using physical and chemical pretreatments with 15%, 20%, 25% w/v and non – pretreated sodium hydroxide solution. The effect of pH, sorbent dosage, shaking time, contact time and dye concentration were studied in batch experiments. The efficiency of the adsorbent was tested by fitting the adsorption data according to Freudlich and Langmuir Isotherms, which showed the Water Hyacinth powder as promising adsorbent for direct dyes in aqueous solution.

Jintana Junlaoun

Student's signature

Nipon Tungkananuruk

Thesis Advisor's signature

22 / May / 2007

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ ประธาน
กรรมการที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ปั่นสุวรรณ กรรมการสาขาวิชาเอก ดร.พิลาณี
ไวณนอมสัตย์ กรรมการสาขาวิชารอง ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนความเอาใจใส่ในการ
ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท ไทย โทเรติกซ์ไทล์ มิลล์ จำกัด (มหาชน) โดยสนับสนุน
สีย้อมไดเรกต์ และน้ำทิ้งจากโรงงาน ในการทำการวิจัยและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ
หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์และการจัดการของเสีย สถาบันคีนันคว้า พัฒนาผลิตภัณฑ์ทาง
การเกษตร อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวก
ในการใช้อุปกรณ์และเก็บข้อมูล ขอขอบคุณ คุณภทรมน โสกันธิกา เจ้าหน้าที่
ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นางสาวอรพิน โทนเคี้ยว และ
เพื่อนพี่น้องวิทยาลัยสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่คณาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมศาสตร์แห่ง
ความรู้ต่างๆ รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่ช่วยสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ
ลุล่วง

จินตนา จุลอุล

เมษายน 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	49
อุปกรณ์และสารเคมี	49
วิธีการ	51
ผลการวิจัยและวิจารณ์	59
สรุป	81
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	90

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณการใช้น้ำและลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมแต่ละประเภท	9
2	คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยฝักตบขาว	15
3	องค์ประกอบของฝักตบขาวแห้ง	16
4	ความสามารถในการลดมลสารของฝักตบขาว	18
5	แสดงค่า pH และประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด	66
6	ปริมาณตัวดูดซับแต่ละชนิดที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีสูงสุด	69
7	เวลาในการปั่นกวน์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสี	71
8	เวลาในการสัมผัสที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสี	74
9	สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการกำจัดสีไคเรกท์	74
10	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนลิช และแลงเมียร์ ในการดูดซับสีน้ำเงิน	77
11	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนลิช และแลงเมียร์ ในการดูดซับสีแดง	78
12	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนลิช และแลงเมียร์ ในการดูดซับสีเหลือง	78
13	สรุปการใช้ตัวดูดซับในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงาน	79
14	ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยตัวดูดซับจากฝักตบขาว	80

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม	3
2	โครงสร้างผนังเซลล์พืชในชั้นที่มีเซลล์โลส	19
3	สูตรโครงสร้างเซลล์โลส	20
4	ตัวอย่างโครงสร้างสี่ไครเกท (Direct 51)	27
5	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	32
6	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	36
7	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	39
8	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	41
9	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	42
10	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	42
11	กราฟแสดงความชันระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$	43
12	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ ที่ไม่ผ่านการดูดซับ	60
13	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ ที่ผ่านการดูดซับ	60
14	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 15% ที่ไม่ผ่านการดูดซับ	61
15	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 15% ที่ผ่านการดูดซับ	61
16	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 20% ที่ไม่ผ่านการดูดซับ	62
17	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 20% ที่ผ่านการดูดซับ	62
18	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 25% ที่ไม่ผ่านการดูดซับ	63
19	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 25% ที่ผ่านการดูดซับ	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยตัวดูดซับจาก ผักตบชวาที่ค่า pH ต่างกัน	64
21	ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยตัวดูดซับจาก ผักตบชวาที่ค่า pH ต่างกัน	65
22	ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยตัวดูดซับจาก ผักตบชวาที่ค่า pH ต่างกัน	65
23	ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยปริมาณตัวดูดซับต่างกัน	67
24	ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยปริมาณตัวดูดซับต่างกัน	67
25	ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยปริมาณตัวดูดซับต่างกัน	67
26	ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยเวลาในการปั่นกวน์ต่างกัน	69
27	ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยเวลาในการปั่นกวน์ต่างกัน	70
28	ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยเวลาในการปั่นกวน์ต่างกัน	70
29	ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยเวลาในการสัมผัสต่างกัน	72
30	ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยเวลาในการสัมผัสต่างกัน	72
31	ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยเวลาในการสัมผัสต่างกัน	73
32	ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยความเข้มข้นของสีต่างกัน	76
33	ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยความเข้มข้นของสีต่างกัน	76
34	ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยความเข้มข้นของสีต่างกัน	76
ภาคผนวกที่		
1	การวิเคราะห์ Freundlich Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก ผักตบชวาในการดูดซับสีน้ำเงิน	91
2	การวิเคราะห์ Langmuir Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก ผักตบชวาในการดูดซับสีน้ำเงิน	92
3	การวิเคราะห์ Freundlich Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก ผักตบชวาในการดูดซับสีแดง	93

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาคผนวกที่	หน้า
4 การวิเคราะห์ Langmuir Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก ผักตบชวาในการดูดซับสีแดง	94
5 การวิเคราะห์ Freundlich Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก ผักตบชวาในการดูดซับสีเหลือง	95
6 การวิเคราะห์ Langmuir Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก ผักตบชวาในการดูดซับสีเหลือง	96
7 กราฟวิเคราะห์ความยาวคลื่นสูงสุดของสีไคเรกท์โทนสีน้ำเงินโดยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	97
8 กราฟวิเคราะห์ความยาวคลื่นสูงสุดของสีไคเรกท์โทนสีแดงโดยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	98
9 กราฟวิเคราะห์ความยาวคลื่นสูงสุดของสีไคเรกท์โทนสีเหลืองโดยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	99

การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมใดเรกท์จากน้ำทิ้ง โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

Preparation of Water Hyacinth Adsorbent for Removal of Direct Dyes from Textile Wastewater

คำนำ

น้ำทิ้งจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดมลภาวะทางน้ำ โดยเฉพาะโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ก่อให้เกิดน้ำทิ้งปริมาณมากและบำบัดได้ยาก เนื่องจากเป็นน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของสีสูง รวมทั้งมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เจือปนอยู่ในปริมาณมาก หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยไม่มีการบำบัดความเข้มข้นของสีก่อน จะมีผลต่อการผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่ได้ผิวน้ำ ซึ่งจะขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นการทำลายทัศนียภาพ ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย

โดยทั่วไปการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอนิยมใช้ระบบบำบัดทางชีววิทยาหรือระบบเติมสารเคมี ซึ่งสามารถบำบัดตะกอนแขวนลอยและบีโอดีได้ในระดับดี แต่ในส่วนของสีและสารอื่นๆ ที่ไม่สามารถบำบัดได้ก็ยังคงอยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว

การจัดโดยวิธีการดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ และเนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่มีการขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็วในประเทศเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน โดยพบว่าการแพร่กระจายตามแหล่งน้ำต่างๆ ทั่วประเทศ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามากมายในด้านการกำจัดจึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติของผักตบชวาเพื่อนำไปแปรรูปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของผักตบชวาเป็นเซลลูโลส รวมทั้งมีโครงสร้างเป็นโพรงและสามารถดูดซับน้ำได้ จึงเกิดสมมติฐานว่าผักตบชวาจะสามารถดูดซับสีน้ำทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยการนำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีโดยใช้กรดกับด่าง

เพื่อให้ได้ผกตบชวที่มีคุณสมบัติต่างกัน นำไปทดสอบกับน้ำสีสังเคราะห์จากสีไคเรทเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม แล้วนำไปกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

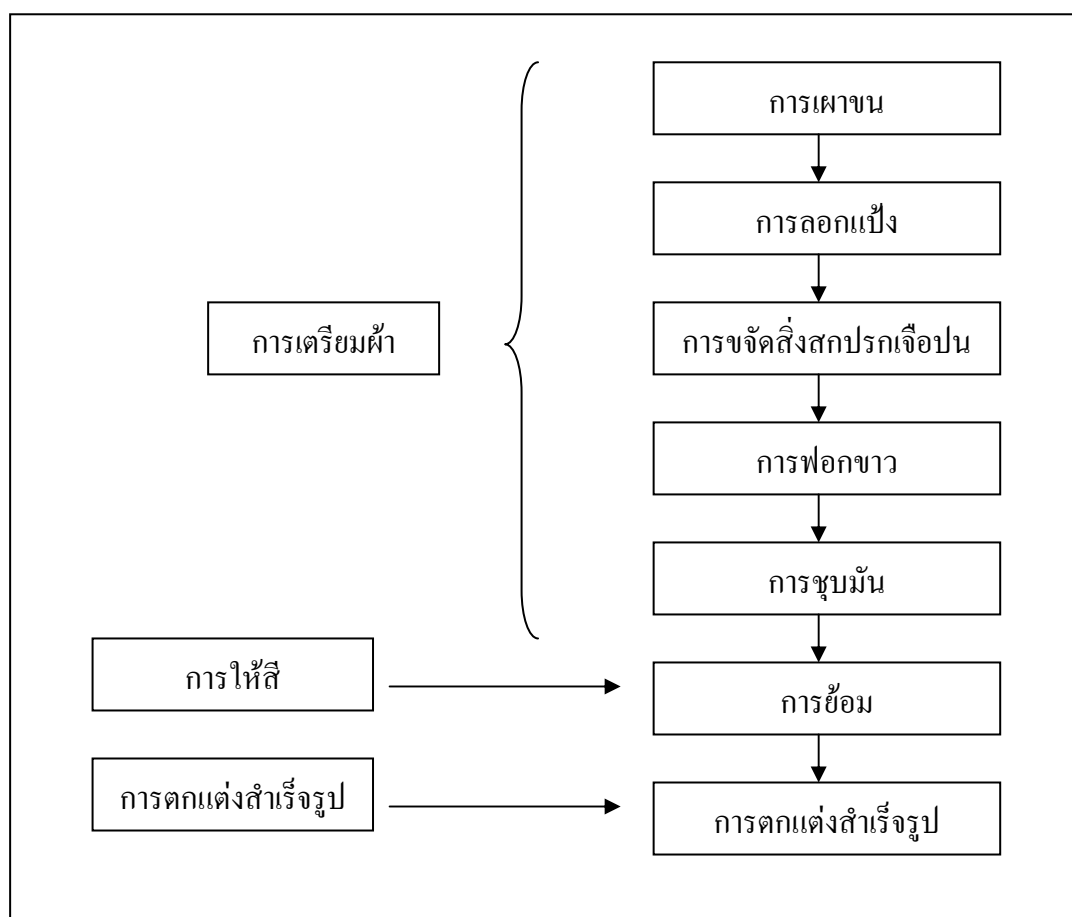
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาลักษณะและสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับจากผกตบชวในการกำจัดสีย้อมไคเรท
2. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดจากผกตบชว ในการกำจัดสีย้อมไคเรท
3. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับแต่ละชนิดจากผกตบชว ในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

การตรวจเอกสาร

กระบวนการฟอกย้อม

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



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)

1. การฟอกย้อมสิ่งทอ

กระบวนการในการฟอกย้อมสิ่งทอมีหลายขั้นตอน ประกอบด้วย

1.1 การเผาขน

เส้นด้ายที่ปั่นจากใยสั้นที่เรียกว่าเส้นใยสปันนั้น มักมีปลายเส้นใยโผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก และเมื่อเส้นด้ายถูกนำไปทอเป็นผืนผ้า ปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมา มีผลทำให้ผิวผ้าดูไม่เรียบ เป็นการทำลายความเงามันของผ้า จึงได้มีการคิดวิธีการกำจัดปลายเส้นใย ด้วยการใช้ความร้อนทำลาย โดยวิธีการเผาโดยใช้เปลวก๊าซเป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากได้ผลดีกว่าวิธีอื่นๆ

1.2 การลอกแป้ง

การลงแป้งเป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นในการทอผ้า เนื่องจากในการทอต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายขึ้น เพื่อให้การทอดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อนำผ้าที่ทอเสร็จแล้วไปทำการฟอกย้อม แป้งที่เคลือบบนเส้นด้ายจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการกำจัดออกไป

1.3 การขจัดสิ่งสกปรก

การขจัดสิ่งสกปรก คือการกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารประกอบพวกเกลืออินทรีย์และอนินทรีย์ ขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งเจือปนติดมาด้วยเสมอ ไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ติดมาตามธรรมชาติ หรือสิ่งที่ติดมาในขั้นตอนการทอ สิ่งเจือปนเหล่านี้จำเป็นต้องกำจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดีและสามารถดูดติดสีและสารเคมีได้สม่ำเสมอ กรรมวิธีการกำจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดมีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรกในเส้นใยแต่ละชนิด

1.4 การชุบมัน

เป็นกระบวนการนำผ้าที่ถูกจึงให้ดึงผ่านลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผ้าที่ได้ นอกจากจะสามารถดูดซับน้ำและสีย้อมได้ดีขึ้น ยังมีความเงามันและความแข็งแรงมากขึ้นด้วย การชุบมันผ่านย้อมกระทำกับผ้าฝ้ายและผ้าเส้นใยผสม เช่น เส้นใยฝ้ายผสมกับเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1.5 การย้อมสี

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

1.6 การตกแต่งสำเร็จ

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายจากการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ สามารถจำแนกประเภทการตกแต่งสำเร็จเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) การตกแต่งด้วยวิธีทางเชิงกล (mechanic finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอโดยใช้เครื่องจักรในการผลิตทำให้สิ่งทอมีคุณภาพตามต้องการ

2) การตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี (chemical finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอด้วยสารเคมี เพื่อให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามต้องการ สารเคมีที่ใช้มีทั้งที่เป็นธรรมชาติและสารสังเคราะห์

2. น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

2.1 แหล่งที่มาของน้ำทิ้ง

สภาพการเกิดและการระบายน้ำทิ้งเริ่มจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ระบายน้ำทิ้งลงในรางระบายน้ำภายในโรงงาน ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกันคือ

- 1) ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำทิ้งภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง และน้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำทิ้งในประเภทแรก
- 2) น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม มักอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ และเป็นตัวให้ความร้อนในคู่อไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลง และกลั่นตัวในท่อไอน้ำ ก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนกับสารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเพิ่มปริมาณของสารละลายสีย้อมและจะรวมเป็นน้ำทิ้งที่สกปรกที่สุด
- 3) น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นในกระบวนการฟอกย้อม บางขั้นตอนทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นน้ำสะอาดและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่
- 4) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน น้ำในส่วนนี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ และในบางกรณีเป็นน้ำทิ้งที่มีความสกปรกสูงมาก เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น
- 5) น้ำจากแหล่งอื่นๆ นอกจากน้ำทิ้งจากแหล่งต่างๆ ข้างต้น โรงงานฟอกย้อมสิ่งทออาจมีน้ำทิ้งจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

2.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำ

1) สีย้อม การย้อมเส้นใยมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2) สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ สารเคมีที่มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

(1) สารช่วยย้อม ได้แก่ สารช่วยจัดสิ่งสกปรก สารช่วยเปียก และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีสม่ำเสมอ

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

(3) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา ซึ่งสารเคมีต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำทิ้ง

3) สิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้ง วัสดุสิ่งทอที่ถูกลำเลียงผ่านกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่มีสสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากนักน้อย โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยสัตว์มีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารสีผง ไขมัน โปรตีน โลหะหนักต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตก็ยังมีการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พาวดอร์หล่อลื่น และแป้ง เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อม และจะหลุดออกมาในน้ำทิ้งจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

4) เศษเส้นใย น้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (oligomers) ที่หลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำทิ้งด้วย (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

5) โลหะหนัก เนื่องจากสารโลหะหนักมีคุณสมบัติในการให้ความสดีกับสีของสิ่งทอ ดังนั้นจึงมีการเติมสารโลหะหนัก เช่น โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี พรอท โคบอลท์ ลงไปในสีย้อม และใช้เป็นเป็นสารออกซิไดซ์อีกด้วย ซึ่งปริมาณและชนิดของโลหะหนักที่พบนั้นขึ้นอยู่กับเคมีภัณฑ์ของในแต่ละบริษัทที่จะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน (เจ็มซัย และคณะ, 2541)

6) สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้าซึ่งเป็นสารประเภทคลอรีเนตเบนซีน (chlorinated benzene) สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่อง เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งในภายหลัง

2.3 ลักษณะและปริมาณน้ำทิ้ง

ลักษณะน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป

1) ปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิดิก เส้นใยและเส้นด้าย ที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝาคูลุมฝิวน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำทิ้งนี้มักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าซีโอดี ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัม/ลิตร

2) ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัม/ลิตร สารที่ทำให้ น้ำทิ้งฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (scouring)

3) อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอน ที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

4) ปริมาณของแข็ง (total solids) สูง ส่วนใหญ่เป็นสารละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

5) ความเข้มข้นสูง เนื่องจากการข้อมสีของเส้นใย เส้นใยมีการดูดซึมสีข้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีข้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีข้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งในที่สุด ปริมาณของสีข้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีข้อมที่ใช้

6) โลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีข้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solids) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำทิ้งในเครื่องข้อมได้

8) การปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่เหลืออยู่ในสารละลายสีข้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำทิ้ง

อุตสาหกรรมฟอกข้อมและตกแต่งนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมอื่นๆ พบว่า เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยน้ำทิ้งเหล่านี้มีสีเปลี่ยนไปตลอดเวลาขึ้นอยู่กับสีข้อมที่ใช้ในขณะนั้น ซึ่งสามารถสรุปปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตตลอดจนลักษณะน้ำทิ้งที่เกิดจากกิจกรรมฟอกข้อม ได้ดังตารางที่ 1 ตัวเลขเหล่านี้เป็นการสำรวจในสหรัฐ ซึ่งอาจนำมาใช้ประโยชน์เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้น้ำและลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกข้อมแต่ละประเภท

ประเภทโรงงาน	พารามิเตอร์								
	การใช้	BOD	COD	TSS	O&G	Pheno	Cr	Sulfide	Color
	น้ำ (l/kg)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	I(μl)	(μl)	(μl)	APHA Unit
1. Wool scouring	11.7	2300	7000	3300	600	+	120	500	2200
2. Wool finishing	284	170	600	60	+	120	500	3500	1500
3. Low water use	9.2	290	690	180	80	+	4	+	10

ตารางที่ 1 (ต่อ) ปริมาณการใช้น้ำและลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมแต่ละประเภท

ประเภทโรงงาน	พารามิเตอร์								
	การใช้น้ำ (l/kg)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	TSS (mg/l)	O&G (mg/l)	Pheno I(μl)	Cr (μl)	Sulfide (μl)	Color APHA Unit
5. Knit fabric finishing									
a. Simple processing	78.4	270	900	60	70	50	40	70	800
b. Complex processing	86.7	350	110	110	50	50	110	100	1400
c. Hosiery products	113	420	1240	150	70	150	100	1700	1900
6. Carpet finishing									
7. Stock and yarn finishing	136	210	870	50	80	110	80	55	400
8. Nonwoven manufacturing	83.4	270	790	60	50	100	80	150	750
9. Felted fabric processing	69.2	320	1370	80	100	60	80	560	450
	46.7	440	1190	70	20	130	30	175	490
	100	180	680	40	20	170	100	200	570
	40	180	2360	80	60	40	10	+	90
	213	200	550	120	30	580	+	1200	200

หมายเหตุ: + ไม่มีข้อมูล

ที่มา: สมาคมอุตสาหกรรมฟอกย้อมและตกแต่งสิ่งทอไทย (1998)

2.4 การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากการย้อม

น้ำทิ้งจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะมีสีย้อมและสารเคมี ซึ่งเป็นส่วนที่เหลืตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเจือปน และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้งซึ่งก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนซึ่งวิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้

1) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดที่ใช้น้อยอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดที่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง

เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสี ย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสียอด สีย้อมฟลูออเรสเซนต์ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งจะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2) กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมี การดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถกำจัดสีได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

(1) ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กิน ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง ให้มีค่าความสกปรกตกลง

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

(3) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) การดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้ pH ของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นต้องมีการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับ pH ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

(4) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (ozone treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นาน ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนชัน (ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

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

(5.1) ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อต้มหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภท สีดิสเพิร์สที่สีย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมฟอยล์ สีแวต และสีย้อมโซอิก ที่สีย้อมเส้นใยฝ้ายและวิสคอส (viscose) สีย้อมดิสเพิร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

(5.2) ออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) เหมาะสำหรับใช้กำจัดไอออน สีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเมมเบรน 2 ขั้นตอน คือ เมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (brackish water) และเมมเบรนออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (sea water) ซึ่งเมมเบรนแรกจะสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเมมเบรนที่สอง และสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่สีย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

(5.3) ไดนามิกเมมเบรน (dynamic membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก สแตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิกซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคริลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

(6) นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่สีย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโตรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโตรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

(7) เทคโนโลยีใหม่ๆ (new technology) เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกัน คือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุดตัวอย่าง เช่น

(7.1) ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้ในโรงงาน ประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่

ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นที่สูง หรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกัน ดังนั้นเทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

(7.2) ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีนและไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือเซลลูโลสซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันน้ำตาลแตกเปลี่ยนไอออน หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

วิธีการบำบัดสีในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมอาจใช้วิธีหนึ่งใดดังกล่าว หรืออาจใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสม จำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

3. ผักตบชวา

3.1 ลักษณะทั่วไป

ผักตบชวา (Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Soloms) เป็นพืชน้ำ ซึ่งจัดเป็นพืชประเภทใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ พบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2367 โดย Karl Von Matius และมีการขยายพันธุ์ไปประเทศในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน โดยมีการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในปี พ.ศ. 2444 เป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป ก่อให้เกิดปัญหามากมายในด้านการกำจัดรวมถึงประเทศไทยด้วย

3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุก ประกอบด้วยลำต้นที่มีหัวราก (rhizomatous system) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 เซนติเมตร และยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ลำต้นมีสีม่วงแดง มีขนาดแตกต่างกัน ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (rosettes) ก้านใบมีลักษณะกลมพองออก ภายในมีเนื้อพองคล้ายฟองน้ำเป็นเครื่องพยุงให้ต้นลอยน้ำได้ ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอย โดยแตกออกจากข้อบนลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10-90 เซนติเมตรมีไหลซึ่งเกิดตามซอกใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล ถ้าน้ำตื้นก็จะหยั่งรากลงดิน และมีประสิทธิภาพสูง

ในการดูดซึมธาตุอาหารต่างๆ ที่ปะปนในน้ำ ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้าลักษณะเป็นช่อดอกมีประมาณ 6-12 ดอก

ผักตบชวาจัดเป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่ใช้เพศ (vegetative propagation) และแบบใช้เพศ (sexual reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อ โดยสามารถเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ได้เป็น 2 เท่า ทุกระยะเวลา 62 วัน หรือเพิ่มจำนวนจาก 10 ต้น เป็น 6 แสนต้น ภายในเวลา 8 เดือน สำหรับการขยายพันธุ์โดยใช้เพศจะผสมเกสรภายในตัวเอง (self pollination) แต่บางครั้งสามารถผสมข้ามต้นได้ โดยจะเกิดเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น

3.3 แหล่งที่พบ

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 C° และในต้นพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ประกอบด้วยในใบร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96 (เปล่งศักดิ์ และภูจักร, 2546) ซึ่งในปัจจุบันพบว่ามีการแพร่กระจายของผักตบชวาอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่างๆ ในหลายจังหวัดทั่วประเทศ

3.4 คุณสมบัติของเส้นใยผักตบชวา

โครงสร้างลำต้นผักตบชวาส่วนใหญ่มีความพรุนคล้ายฟองน้ำ ดังนั้นผักตบชวาจึงมีความสามารถในการดูดความชื้นในอากาศได้ดีและดูดซึมน้ำได้สูง (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยผักตบชวา

ลักษณะ	ค่าเฉลี่ย
เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	0.80-1.20
ความถ่วงจำเพาะ	0.428
ปริมาณความชื้น (%)	8.44
การดูดซึมน้ำ (%)	38.8

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2000)

3.5 องค์ประกอบของผักตบชวา

ต้นผักตบชวา 100 กิโลกรัม หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กิโลกรัม คิดเป็นกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่าผักตบชวา ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และแร่ธาตุต่างๆ (แสดงดังตาราง 3)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง

องค์ประกอบ	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์
ลิกนิน	12-13
เซลลูโลส	43-44
เพนโตแซน	14-15
ไนโตรเจน	2.8-3.5
โซเดียม	1.5-2.5
โปแตสเซียม	2.0-3.5
แคลเซียม	0.6-1.3

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2000)

3.6 การกำจัดผักตบชวา

เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่โตเร็วจึงก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ต่อแหล่งน้ำ ปัจจุบันจึงมีการดำเนินการควบคุมได้ 3 วิธีการหลักคือ

1) การใช้สารเคมี สารเคมีที่ใช้มีหลายชนิด เช่น dalapon diquat และ paraquat เป็นต้น เป็นวิธีที่ให้ผลรวดเร็วแต่ก่อให้เกิดปัญหาทางมลภาวะ โดยสารเคมีสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำตลอดจนการนำน้ำไปใช้ด้านอื่นๆ

2) การใช้วิธีกล โดยการใช้แรงงานคน หรือเครื่องจักรกล วิธีนี้มีปัญหาคือสิ้นเปลืองแรงงานและเสียเวลามาก เหมาะสำหรับการใช้ในพื้นที่แคบๆ เท่านั้น

3) การใช้วิธีชีวภาพ โดยการใช้แบคทีเรีย รา ไวรัส และแมลงเป็นต้น แม้ผลกระทบ ต่อสภาพแวดล้อมน้อย แต่ยังไม่ประสบผลสำเร็จถึงขั้นนำมาใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งยังต้องคำนึงถึง ปัญหาด้านค่าใช้จ่ายด้วย

3.7 การบำบัดน้ำทิ้งด้วยผักตบชวา

การบำบัดน้ำทิ้งด้วยผักตบชวาเป็นวิธีที่อาศัยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) ทำหน้าที่กรอง

ผักตบชวาที่ขึ้นหนาแน่นเปรียบได้กับการบรรจุวัสดุพรุนในกรวยกรองน้ำที่ไหลผ่าน ผักตบชวาอย่างช้าๆ ทำให้ของแข็งแขวนลอยต่างๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้น และระบบรากผักตบชวา ที่มีจำนวนมากจะช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด

2) ดูดซับสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

สารอาหารที่พืชต้องการ ได้แก่ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ผักตบชวามีความต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเช่นเดียวกัน และการกินอาหารของผักตบชวาจะใช้รากดูดสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำลำเลียงไปยังใบ เพื่อการสังเคราะห์แสง ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจัดเป็นมลสารที่ต้องกำจัดให้หมดไป การดูดกินอาหารในน้ำของผักตบชวาจึงเป็นการลดมลพิษดังกล่าวให้น้อยลง

อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำทิ้งส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน (organic-N) แอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4\text{-N}$) และไนเตรดไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) ซึ่งผักตบชวาสามารถดูดสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้สูงกว่าไนโตรเจนรูปอื่นคือประมาณร้อยละ 95 ในขณะที่มัลสารไนเตรดไนโตรเจน และแอมโมเนียมไนโตรเจนจะลดลงประมาณร้อยละ 80 และ 77 ตามลำดับ แต่การใช้ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงจะส่งผลให้ผักตบชวาเจริญเร็วขึ้นและปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำมากขึ้น จึงควรมีการดูแลระบบเก็บต้นที่เจริญเต็มทีขึ้นจากน้ำอย่างสม่ำเสมอ ไม่เช่นนั้นเมื่อผักตบชวาคายจะเน่าอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำเสียมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอีก (จักริน และธรรมบุญ, 2543)

3) การลดมลสารอื่น

นอกจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้วผักตบชวาสามารถลดมลสารอื่นๆ ได้ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสามารถในการลดมลสารของผักตบชวา

มลสาร	ปริมาณการลดมลสาร (กรัม/ตารางเมตร/วัน)
คาร์บอน	28.0
โพแทสเซียม	2.0
แคลเซียม	1.0
แมกนีเซียม	0.2
โซเดียม	2.0

4) ลดมลสารโดยจุลินทรีย์ที่ผักตบชวา

แบคทีเรียที่เกาะอยู่ที่รากของผักตบชวาชชนิดหนึ่งคือ *Azospirillum* spp. จัดเป็นแบคทีเรียแกรมลบชนิดต้องการออกซิเจน และมีคุณสมบัติพิเศษสามารถตรึงไนโตรเจน คุณสมบัติดังกล่าวมีส่วนในการลดมลสารไนโตรเจนได้ดียิ่งขึ้น

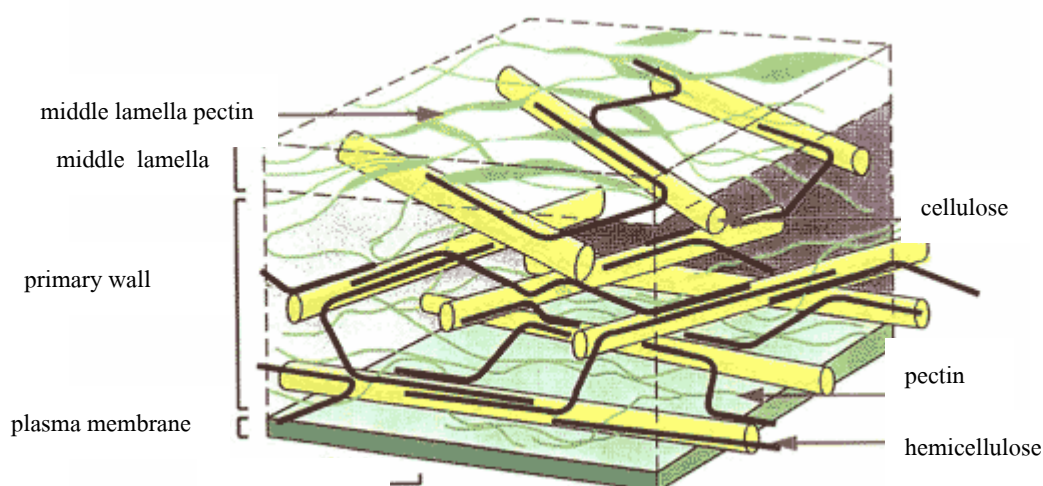
5) การดูดโลหะหนัก

มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของผักตบชวาในการดึงโลหะหนักจากน้ำทิ้ง ปรากฏว่า ผักตบชวาสามารถกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้ เช่น แคลเซียม ตะกั่ว นิกเกิล เงิน โคบอลต์ สตรอนเตียม และฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังดูดสารพิษ เช่น ยาฆ่าแมลงได้อีกด้วย (จักริน และธรรมบุญ, 2543)

4. เซลลูโลส

4.1 แหล่งที่มา

เซลลูโลสเป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซนแกม แทนนิน ไขมัน สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น โดยอยู่บนผนังเซลล์พืชทุกชนิด เช่น ฝ้าย พืชน้ำ เรยอน รวมไปถึงพืชชั้นต่ำ เช่น เฟิร์น สาหร่าย และรา ที่ผนังเซลล์ชั้นที่สองมีเซลลูโลส (ดังภาพที่ 2) อยู่สูง และปริมาณเซลลูโลสจะลดลงเรื่อยๆ จนมีน้อยที่สุดในชั้น Middle lamella ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเซลลูโลสจะมีมากที่ผิวด้านนอกของพืช



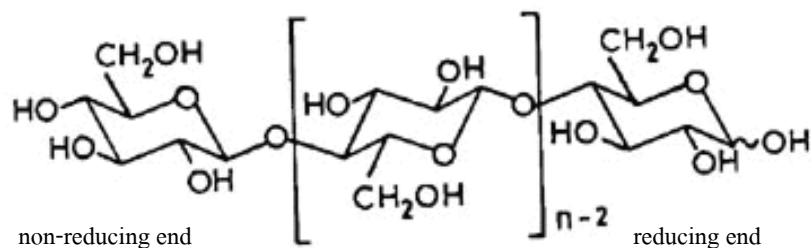
ภาพที่ 2 โครงสร้างผนังเซลล์พืชในชั้นที่มีเซลลูโลส

ที่มา: International Pectin Producer's Association. (2001)

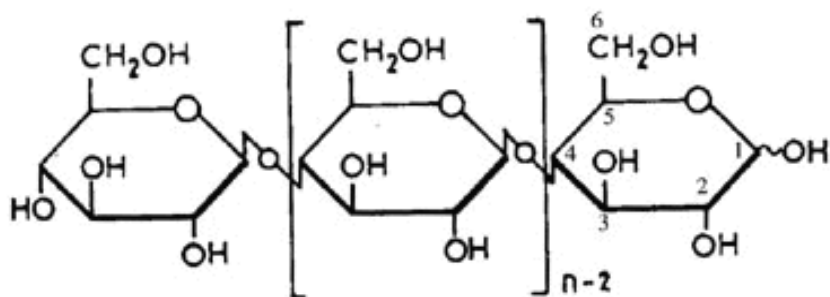
4.2 โครงสร้างของเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่ไม่มียก้านสาขา ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำๆ กันของ β -D-anhydroglucopyranose สูตรอย่างง่ายของเซลลูโลสคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n เป็นจำนวนหน่วยของกลูโคสโมโนเมอร์ในสายโซ่โพลีเมอร์ ซึ่งปกติ n มีค่าตั้งแต่ 30-300 หน่วย กลูโคสทำให้เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุล ตั้งแต่ 50,000-500,000 โดยมีพันธะที่เชื่อมต่อกันแต่ละ

หน่วยคือ β -1,4-glycoside linkage ระหว่าง C_1 และ C_4 ต่อกันเป็นสายตรงโครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส



sometimes shown as



Cellulose

ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างเซลลูโลส

ที่มา: International Pectin Producer's Association. (2001)

4.3 สมบัติทางเคมีของเซลลูโลส

เมื่อเซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิดจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดังนี้

1) ปฏิกิริยาที่ทำให้เซลลูโลสพองตัวและกระจายตัวโดยไม่ทำให้เซลลูโลสยาวขึ้นหรือเปลี่ยนโครงสร้างของเซลลูโลสในเส้นใย

2) ปฏิกิริยาที่ทำให้ความยาวของสายโซ่เซลลูโลสเปลี่ยนเพราะเสื่อมสภาพ

3) ปฏิกิริยาที่ทำให้หมู่ไฮดรอกซี (-OH) เปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ได้ง่ายทำให้เกิดอนุพันธ์ของเซลลูโลสต่างๆ

ปฏิกิริยาทั้งสามชนิดนี้มักจะเกิดร่วมกันเสมอ นอกจากนี้สมบัติทั่วไปของเซลลูโลสคือทนต่อด่างแต่ไม่ทนต่อกรดเข้มข้น เฝ้าไหม้ในอากาศโดยไม่มีกลิ่นเหม็น และเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลสามหมู่ในแต่ละหน่วยย่อย ทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไฮโดรเจนไอออนได้ดี

4.4 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

1) การละลาย เซลลูโลสไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 60-65% โดยน้ำหนัก กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 83% โดยน้ำหนัก โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็ว ในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เซลลูโลสบวมตัวในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) บางครั้งทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

2) ความหนืด ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับ หรือการคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมัน จนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

3) ความหนาแน่น เซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยว จะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน ค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มาหรืออาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

4) จุดหลอมเหลวเท่ากับ 260-270 องศาเซลเซียส (สลายตัว)

5. สีย้อม

คำนิยามศัพท์

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

สีโดยตรง (direct dyes) หมายถึง สีย้อมซึ่งเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อนุโมเลกุลสีที่มีประจุลบ สามารถจับติดเส้นใยจำพวกเซลลูโลสได้โดยตรง ตามปกติใช้ย้อมในน้ำย้อมที่มีเกลือเป็น อิเล็กโทรไลต์ (มอก., 2530)

5.1 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไชลิน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ

สีย้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมามากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสถานะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น

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

การเกิดสีของสีย้อม สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่าโครโมฟอร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือกลุ่มไนโตรโซ (nitroso group) กลุ่มไนโตร (nitro group) กลุ่มเอโซ (azo group) กลุ่มเอธิลีน (ethylene group) กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group) กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group) กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur group) กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีบางไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้ตามนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป (ธงชัย, 2527)

5.2 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีมากมายหลายชนิด ตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อม สีย้อมอาจจำแนกได้หลายประเภท ตามลักษณะทางกายภาพ โดยแบ่งออกเป็นสารสีละลายน้ำได้และสารสีไม่ละลายน้ำ หรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมีซึ่งวิธีนี้ยุ่งยากด้วยอาศัยความรู้ทางเคมี และสูตรโครงสร้างของสีด้วย วิธีจำแนกสีย้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่ายได้แก่ การจำแนกสีย้อมตามการใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภท คือ

1) สีดีสเพิร์ส (disperse dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียด ละลายอยู่ในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจาย (dispersing agent) ที่เหมาะสมจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นช่วย นอกจากสารพา (carrier) บางชนิดที่ช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้

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

2) สีเอซิด (azid dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง จะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และโพลีเอสเตอร์ ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน

3) สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

นิยมใช้ย้อมเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับอีกครั้งหนึ่งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยานี้เรียกว่าคัปลิง (coupling)

4) สีย้อมเบสิก (basic dyes)

ใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด โดยย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ (chromophore) ให้แคทอออนทำให้เรียกสีนี้ว่า สีแคทอออน ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

5) สีย้อมไคเรกต์ (direct dyes)

บางครั้งเรียกว่าสีย้อมฝ้าย เนื่องจากเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรก ที่สามารถย้อมติดฝ้ายได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันจะใช้เกลือเข้าช่วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ (กาวิ, 2545)

สีย้อมนี้ให้คุณสมบัติในการย้อมคงทน ตลอดจนราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่คงทนดีโครงสร้างของสีจะซับซ้อนมากขึ้น ราคาต้นทุนการผลิตและราคาจำหน่ายย้อมสูงขึ้นด้วย

6) สีย้อมเมอร์แดนท์ (merdant dyes)

สีย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีย้อมเอลิตที่สามารถก่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ และจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำได้ดีกว่าไม่ย้อมทับ

7) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

สีย้อมผ้าฝ้ายโดยเฉพาะ ราคาค่อนข้างถูกแต่สีย้อมไม่สดใส ตามปกติแล้วตัวสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้ละลายน้ำได้ สีย้อมชนิดนี้ได้ชื่อว่าสีย้อมซัลเฟอร์เพราะสารที่นำมารีดิวซ์เป็นสารละลายของโซเดียมซัลไฟด์ และโครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ ประกอบด้วยกลุ่มธาตุซัลเฟอร์ (sulfonic group) เมื่อสีย้อมละลายในน้ำแล้ว จะแทรกซึมตัวเข้าไปในเส้นใย และสามารถทำให้ยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวร โดยการออกซิไดส์ตัวสีย้อมกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีทำปฏิกิริยากับอากาศ

8) สีย้อมแวต (vat dyes)

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

9) สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dyes)

สีย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายน้ำได้คุณสมบัติเป็นแอนไอออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกัน

ด้วยพันธะโคเวเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สมบัติการละลายและคุณสมบัติเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าอยู่ในเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาสีจะติดกับเส้นใย

10) สีย้อมโลหะ (metallic dyes)

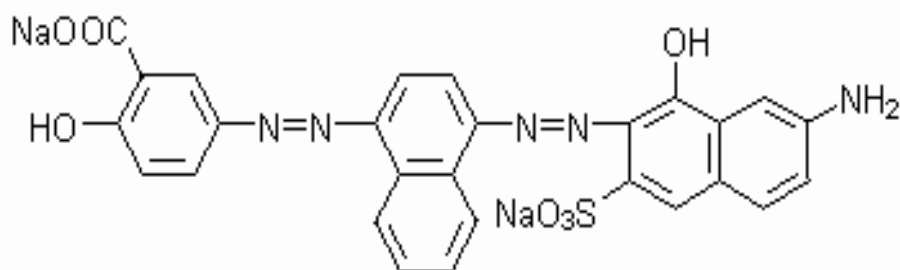
สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำหลายชนิดใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส และให้สีต่างๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ยึดจับตัวในเส้นใย

11) สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

นิยมใช้พิมพ์มากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสารสีที่สามารถทำให้ละลายน้ำได้ รูปแบบการย้อมดำเนินคล้ายกับสีแวต ก็ต้องทำให้ตัวสีย้อนกลับคืนสู่สภาพเดิมไม่ละลายน้ำด้วยการออกซิไดซ์กลับคืน (วิไลพร, 2536)

5.3 สีย้อมไคเรกท์

สีย้อมฝ้ายที่นิยมใช้กันมากคือ สีแวต สีรีแอคทีฟ และสีไคเรกท์ สำหรับสีแวตนั้น มีความทนทานต่อการซักดีเยี่ยม นิยมใช้เฉพาะในกรณีที่ต้องการคุณภาพในด้านความคงทนค่อนข้างสูงเป็นพิเศษ เพราะเป็นสีย้อมที่มีราคาแพง มีกรรมวิธีการย้อมที่ค่อนข้างยุ่งยาก และต้องใช้ความระมัดระวังมากกว่าสีรีแอคทีฟ และสีไคเรกท์ ส่วนสีรีแอคทีฟและสีไคเรกท์นั้น หากเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียกันจะพบว่าในด้านคุณภาพ สีรีแอคทีฟดีกว่าสีไคเรกท์มากแต่ถ้าพิจารณาในด้านของราคา กรรมวิธีการย้อม พลังงานและปริมาณเกลือที่ใช้แล้ว สีไคเรกท์จะดีกว่า และในขณะนี้สีไคเรกท์ได้มีการพัฒนาขึ้นมา มีความทนทานต่อแสงแดดมากกว่าสีรีแอคทีฟ บางชนิดก็ทนต่อความร้อนสูงสามารถย้อมที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดได้ และปัจจุบันสามารถแก้ปัญหาในเรื่องของความทนทานต่อการซักตัวของสีไคเรกท์ได้แล้วด้วยวิธีการย้อมทับ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างโครงสร้างสีไคเรกต์ (Direct 51)

ที่มา: G. Buschle-Diller (1999)

5.4 ประเภทของสีไคเรกต์

ประเภทของสีไคเรกต์สามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือการแบ่งตามกรรมวิธีย้อม และแบ่งตามคุณสมบัติในการย้อม

1) สีไคเรกต์แบ่งตามกรรมวิธีย้อม แบ่งเป็น 4 กลุ่ม

(1) สีที่ย้อมโดยวิธี exhaustion เป็นสีที่ย้อมโดยใช้เครื่องย้อมสีเพียงเครื่องเดียว หรือชิ้นเดียว โดยการต้ม-แช่ หรือทำให้สีดูดซึมเข้าไปในวัสดุสิ่งทอจนเสร็จสิ้นการย้อม โดยสมบูรณ์ ในครั้งเดียว ซึ่งรวมถึงการซักล้างทำความสะอาดวัสดุสิ่งทอที่ย้อมโดยเครื่องย้อมชิ้นเดียวกันนี้ การย้อมแบบนี้ไม่เหมาะกับการย้อมสีวัสดุสิ่งทอที่มีปริมาณมาก เพราะเป็นการยากที่จะทำให้คุณภาพสม่ำเสมอ

(2) สีที่ย้อมโดยวิธี pad-steam เป็นสีที่ใช้วิธีย้อมแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องจักรหลายประกอบกันจึงจะดำเนินการย้อมได้สมบูรณ์ เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการย้อม มีเครื่องจุ่มอัดน้ำสี เครื่องอบไอน้ำ เครื่องซักล้าง และเครื่องอบแห้งเหมาะที่จะย้อมผ้าสีอ่อนสดใสในปริมาณมาก เพราะมีช่วงเวลาที่อบไอน้ำเพียง 1-2 นาที ซึ่งการอบไอน้ำนี้จะเป็นการผนึกสีไปด้วย ถ้าเป็นการย้อมสีเข้มช่วงเวลานั้นๆ เพียง 1-2 นาที ไม่เพียงพอที่จะผนึกสีให้มีความทนทานได้

(3) สีที่ย้อมโดยวิธี pad-jig เป็นสีที่ใช้วิธีย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องจักรตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไปมาประกอบกัน จึงจะดำเนินการย้อมในขั้นตอนต่างๆ ได้สำเร็จสมบูรณ์

โดยรูปแบบการย้อมจะเป็นลักษณะเปิดหน้ากว้าง ขั้นตอนแรกใช้เครื่องจุ่มอัดน้ำสีโดยให้ผ้าผ่านลง ชุบน้ำสีในอ่างแล้วส่งผ่านลูกกลิ้งยาง เพื่อบีบน้ำสีส่วนเกินออกไปจากนั้นจึงม้วนผ้าเข้าแกนม้วน แล้วนำไปทำการผืนสีโดยใช้เครื่องจิกเกอร์และทำความสะอาด โดยใช้เครื่องจิกเกอร์ต่อไปได้เลย

(4) สีที่ย้อมโดยวิธี pad-roll เป็นสีที่ใช้วิธีย้อมที่มีลักษณะการย้อมเช่นเดียวกับ วิธีย้อมแบบ pad-jig โดยขั้นตอนแรกของการย้อมจะใช้เครื่องจุ่มอัดน้ำสี เมื่อผ้าผ่านน้ำสีและ ลูกกลิ้งแล้วจะถูกส่งเข้าสู่อบด้วยระบบไอน้ำหรือรังสีอินฟราเรดก่อนที่จะม้วนผ้าเข้าแกน และนำเข้า เครื่องอบไอน้ำขนาดใหญ่เพื่อผืนสีอุณหภูมิของไอน้ำประมาณ 105 องศาเซลเซียส โดยให้ แกนม้วนผ้าหมุนไปช้าๆ ซึ่งจะใช้เวลาในการผืนสีประมาณ 2-4 ชั่วโมงขึ้นอยู่กับชนิดของสี เสร็จแล้วจึงนำไปทำความสะอาด

2) สีไลเรกต์แบ่งตามคุณสมบัติในการย้อม แบ่งเป็น 3 กลุ่ม

(1) Class A เป็นกลุ่มสีที่มีความสม่ำเสมอในการย้อมดี หรือมีคุณสมบัติในการ เคลื่อนตัวสูง ช่วงตอนต้นของการย้อมอาจเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้นได้ แต่เมื่อย้อมครบตาม กำหนดเวลา สีจะสม่ำเสมอ

(2) Class B เป็นกลุ่มสีที่มีคุณสมบัติในการย้อมไม่ค่อยสม่ำเสมอ หรือมีคุณสมบัติ ในการเคลื่อนตัวไม่ดี แต่สามารถทำให้การย้อมสม่ำเสมอได้โดยใช้เกลือควบคุม คือ ในระหว่างที่ ทำการย้อม ควรย้อมให้สีติดดีเสียก่อนที่อุณหภูมิสูง แล้วจึงเติมเกลือลงไป ถ้าเกิดความไม่สม่ำเสมอ ในช่วงแรกแล้วยากต่อการที่จะแก้ไขให้สีย้อมสม่ำเสมอได้

(3) Class C เป็นกลุ่มสีที่มีคุณสมบัติในการย้อมไม่สม่ำเสมอ หรือมีคุณสมบัติ ในการเคลื่อนตัวไม่ดี สีกลุ่มนี้จะมีปฏิกิริยาไวต่อเกลือมาก เพราะฉะนั้นก่อนเติมเกลือจึงควรย้อม ให้สีติดเสียก่อนที่อุณหภูมิสูง ถ้าใช้เกลือเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะควบคุมการย้อมได้ จะต้อง ควบคุมอุณหภูมิด้วย

5.5 ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ โดยไม่พบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือทางจมูกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหารโดยปนเข้าไปกับอาหารการกิน แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าสารวัตถุเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อม มีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายตัวเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น 2-naphthylamine และ benzidine

ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม หรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อมนั้น พบว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้งเนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

ปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
- 2) สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
- 3) ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช
- 4) การผลิตออกซิเจนลดลง เนื่องจากผลกระทบจากข้อ 3) ซึ่งส่งผลต่อสัตว์น้ำ
- 5) ความเป็นพิษของตัวสีย้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง
- 6) ทั้งหมดข้างต้นส่งผลให้สถานะของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

6. กระบวนการดูดซับ

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

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ (โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับหรือระหว่างหน้า (interface) กัน) เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากอากาศ และน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

6.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

1) กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

(1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

(2) การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

(3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2) อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

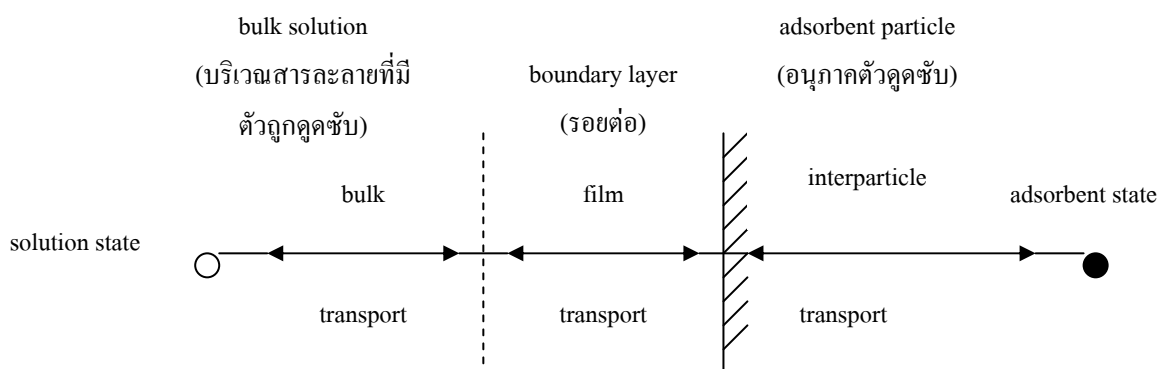
(1) การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

(2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่

ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับในตัวดูดซับ

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

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

6.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบ

1) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับการดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกันโดยโมเลกุล (โคเวเลนต์)

ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภท ดังนี้

(1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (london force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่งกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วอย่างชั่วคราว (induced dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

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

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

(3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน (dipole-dipole attraction)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะมีสภาพมีขั้วสูงโดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

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

2) แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

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

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

6.3 รูปแบบของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้นอาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

2) การดูดซับทางเคมี

เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมี ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (reversible) เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้น จากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

(1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวตเตดซิลิกา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

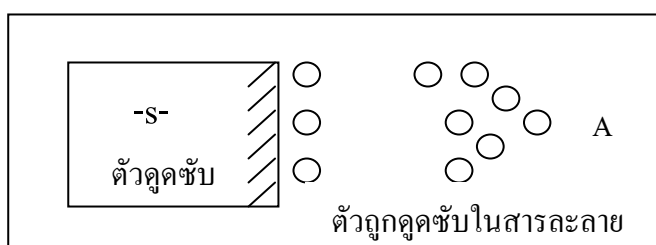
(2) ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

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

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

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

6.4 สมดุลการดูดซับ



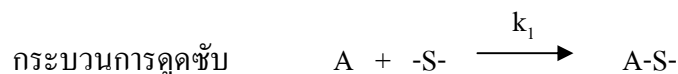
ภาพที่ 6 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในการละลายที่มีโมเลกุลตัวดูดซับเข้มข้น C_0 ก่อนเริ่มต้น โมเลกุลตัวดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับเมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 mol/l ในสารละลาย $-S-$ เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

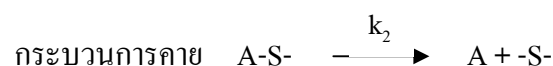
$(1-q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวดูดซับในการละลาย หรือความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

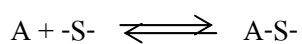
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

q = เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อ
มวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol/kg mol/g mg/kg

W = เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg

V = เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็น
 cm^3 หรือ l

C = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ละลายอยู่ในสารละลาย หน่วยเป็น
ความเข้มข้น เช่น mol/l

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

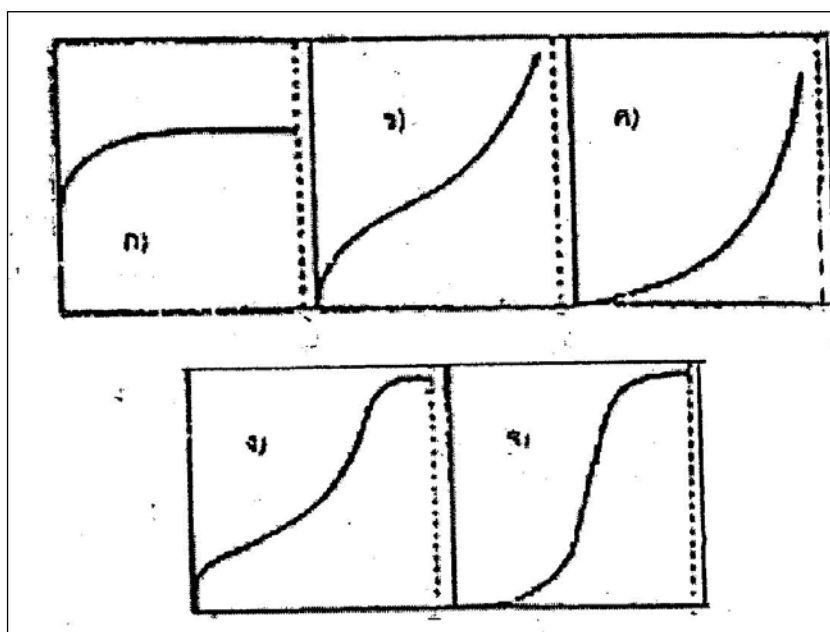
$$\frac{\text{(ปริมาณตัวถูกดูดซับ)}}{\text{บนพื้นผิวของตัวดูดซับ}} = \frac{\text{(ปริมาณตัวถูกดูดซับที่)}}{\text{หลุดออกมาจากตัวดูดซับ}}$$

$$q_W = V(C_o - C) \text{ ----- (3)}$$

6.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

รูปกราฟที่พล็อตระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

จากภาพที่ 7 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

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

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

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใช้ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

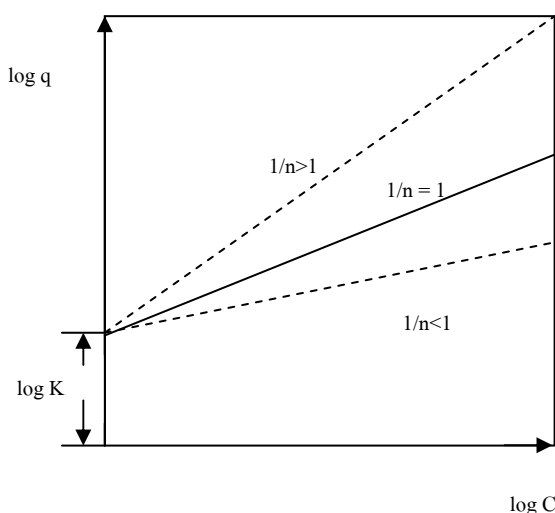
q = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ = ความชันของกราฟ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

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



ภาพที่ 8 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

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

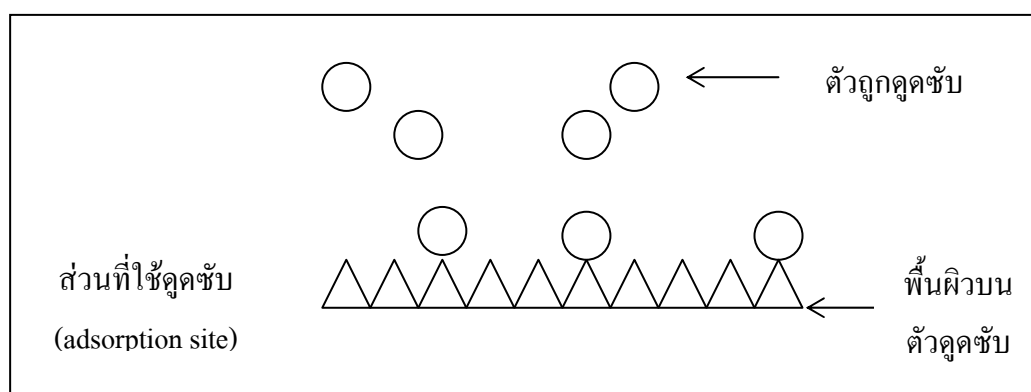
ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกลักษณะความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

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

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

2) สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) ได้มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ (ดังภาพที่ 8) โดยที่

โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด)

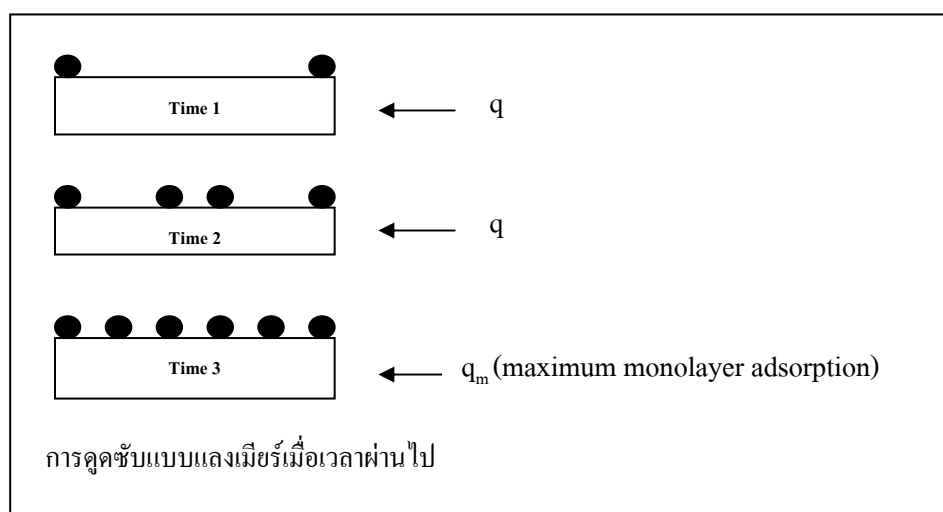


ภาพที่ 9 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ (6.4) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์

รูปแบบสมการของแลงเมียร์จะใช้

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



ภาพที่ 10 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

q = ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)

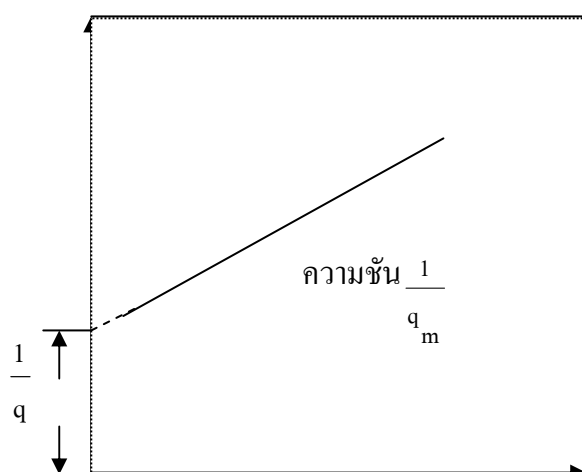
q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

K = ค่าคงที่การดูดซับ

C = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

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

เท่ากับ $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 11 กราฟแสดงความชันระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$

6.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรูพรุน เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนมีขนาดใหญ่ แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็กก็ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่ม

2) ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ พบว่า แนวนอนของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มจะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

3) อัตราเร่งการปั่นกววน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบขั้นตอนนี้ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าการปั่นกววนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าการปั่นกววนสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว

4) อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของ

ตัวดูดซับลดลง

5) ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

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

7. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ghash *et al.* (1978) ได้ทำการศึกษา การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานทอผ้าเกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์และสี โดยทั่วๆ ไปวิธีการกำจัดสีและสารอินทรีย์จะสามารถทำได้โดยใช้ระบบทางชีววิทยาควบคู่กับระบบฟิสิกส์ - เคมี แม้ว่าระบบบำบัดทางชีววิทยาจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้เป็นที่น่าพอใจ กระบวนการการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (carbon adsorption) จะตามด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (chemical coagulation) สามารถกำจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าได้

Chang (1988) ได้ทำการศึกษาการใช้สารส้มในการลดสีและมลสารอื่นๆ พบว่า ถ้าใช้สารส้มเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ pH 5.5 สามารถลดสีได้ 92% ลดซีโอดีได้ 72% ลดแคดเมียมได้ 80% และลดโครเมียมได้ 87%

Metcalf *et al.* (1991) ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรมแห่งมหาวิทยาลัยควีนที่ไอร์แลนด์เหนือ กล่าวถึงวิธีการกำจัดสีของน้ำเสียไว้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการใดที่ประหยัดและดีที่สุดในการกำจัดสีของน้ำเสีย น้ำเสียแต่ละชนิดจะมีปัญหาเฉพาะแห่ง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการพิจารณาถึงคุณสมบัติของน้ำเสียนั้นควบคู่ไปด้วย เช่น สภาพท้องถิ่น สีขุ่น และสารเคมีที่ใช้ ปริมาณและส่วนประกอบ น้ำเสีย เป็นต้น ในอดีตวิธีการบำบัดทางชีววิทยาได้ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับโรงงานทอผ้า แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่มีขีดจำกัดพอสำหรับกำจัดสีขุ่น วิธีการในการกำจัดสีขุ่นจะกระทำได้โดยวิธีทางฟิสิกส์และเคมีช่วย วิธีการกำจัดสีมีหลายวิธี ได้แก่ adsorption, ion-exchange, chemical

oxidant เช่น foam fractionation, dynamic membrane hyperfiltration, gamma radiation, induced oxidation, electrolytic treatment เป็นต้น

Chcesavathi (1992) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสี ซีโอดี และแมงกานีสในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกยีนส์โดยใช้โอลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับโพลีเมอร์ช่วยในการตกตะกอน ผลการศึกษาพบว่าการใช้โอลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับโซเดียมอลูมินेट จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่น ซีโอดี และแมงกานีสเพิ่มขึ้น

วิวรรณ (2539) ได้ทำการศึกษาการใช้ถังดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย โดยศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากการใช้ถังกรองซึ่งมีแอคติเวตเตดคาร์บอน และขี้เถ้าเป็นสารดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี ผลการทดลองกับสารละลายสีสังเคราะห์ 4 ประเภท ได้แก่ สีเอสดี สีเบสิก สีรีแอคทีฟ และสีไคเรกท์ พบว่า สีที่ถูกดูดซับด้วยแอคติเวตเตดคาร์บอนดีที่สุดคือ สีเบสิก รองลงมาคือ สีเอสดี สีไคเรกท์ และสีรีแอคทีฟ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีประเภทรีแอคทีฟและไคเรกท์ ระหว่างแอคติเวตเตดคาร์บอนและขี้เถ้าที่มีความสูงเท่ากันพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีของแอคติเวตเตดคาร์บอนจะดีกว่า ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับสีประเภทเบสิกระหว่างแอคติเวตเตดคาร์บอนและขี้เถ้าที่มีความสูงเท่ากัน มีค่าใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพในการดูดซับสีเอสดีดีกว่าแอคติเวตเตดคาร์บอน ผลการศึกษากับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมพบว่า แอคติเวตเตดคาร์บอนให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีและซีโอดีใกล้เคียงกับขี้เถ้า แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับสีและซีโอดีต่อน้ำหนักแล้วพบว่าขี้เถ้าให้ค่าสูงกว่าแอคติเวตเตดคาร์บอนประมาณ 1.55-2.89 เท่า และ 1.39-2.44 เท่า ตามลำดับ

วูธนันท์ (2544) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาความเป็นไปได้และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าชนิดสีรีแอคทีฟ จำนวน 2 สี คือสีรีแอคทีฟเยลโล 17 และสีรีแอคทีฟบลู 19 โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยา ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ค่า pH ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้น ความเข้มข้นสีย้อมผ้าเริ่มต้น และความเข้มแสงยูวี ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลา 120 นาที โดยแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน โดยผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอนแรกจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนที่สอง ขั้นตอนที่สาม และขั้นตอนที่สี่ต่อเนื่องกันไป ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ pH 10 ไทเทเนียมไดออกไซด์

5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นสีย้อม 20 มิลลิกรัม/ลิตร โดยผลการทดลองทั้ง 2 สี เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่สีย้อมผ้าที่มีโครงสร้างแบบโมโนเอโซจะสามารถบำบัดได้ดีกว่าสีย้อมที่มีโครงสร้างแบบแอนทราควิโนน

อดิศักดิ์ (2546) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายแบบกรองช้าร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านแกลบดำ พบว่าระบบบำบัดให้ประสิทธิภาพสูง โดยสามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ดีที่สุดที่อัตราน้ำล้นผิว 0.1 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. คือสามารถบำบัดความขุ่นของแข็งแขวนลอย สี ซีไอดี และลดค่าพีเอชได้เฉลี่ยในช่วง 70.51-74.41%, 61.42-65.92%, 5.21-8.36%, 30.62-34.20% และ 3.26-6.02% ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและของแข็งแขวนลอยเบื้องต้นได้สูง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของระบบบำบัด เนื่องจากชั้นถ่านแกลบดำเกิดการอุดตันช้าลง

กาญจนา (2547) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมกลุ่มเอโซ โดยจุลินทรีย์แบบเมดที่ไม่ใช้อากาศ ในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมไหม โดยทำการศึกษาในกลุ่มสีย้อมประเภทเอโซ 3 สี คือสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าในกระบวนการ biological azo dye reduction ที่มีความเข้มข้นของปริมาณจุลินทรีย์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสีแดงจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 87.4% และในสีเหลืองจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 72.4% และในสีน้ำเงินจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 85.0% ที่ความเข้มข้นของปริมาณจุลินทรีย์ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสีแดงจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 92.5% ในสีเหลืองจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 83.8% และในสีน้ำเงินจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 78.6% ที่ความเข้มข้นของปริมาณจุลินทรีย์ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสีแดงจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 91.5% ในสีเหลืองจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 83.2% และในสีน้ำเงินจุลินทรีย์สามารถกำจัดสีได้ถึง 74.7%

เพชรพร และนวลจิรา (2547) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีไดเรกต์โทนสีแดงชนิดโพลิเอโซด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาทวนเร็ว ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ pH ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าซีไอดี และทำการวิเคราะห์ผลผลิตที่เกิดจากการรีดิวซ์ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรเมตรี ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีใช้ระยะเวลาทวนเร็วที่ 10 นาที ความเข้มข้น

ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH ที่เหมาะสมคือ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย โดยไม่ปรับค่าด้วยสารเคมี ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสมมีปริมาณเป็น 10 เท่าของค่าสโตยชิโอเมตริก และปริมาณโซเดียมเมตะไบซัลไฟด์ที่เหมาะสมมีค่าเป็น 2 เท่าของปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้สูงถึง 94 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสีคงเหลือต่ำกว่า 600 เอดีเอ็มไอ แต่การกำจัดสีด้วยเทคนิคนี้ไม่สามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ และผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรเมทรีแสดงให้เห็นว่าการที่สีลดลงเนื่องจากเกิดการรีดิวซ์ที่พันธะเอสของสีย้อม

อารยา และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยเปลือกหอยเชอรี่และเปลือกหอยแครง ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ชนิด คือ สีเอซิด สีไครเรท และสีรีแอคทีฟ จากนั้นเลือกผงเปลือกหอยที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดและระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไปใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียย้อมผ้า โดยผลการศึกษาพบว่า ผงเปลือกหอยแครงขนาดละเอียดมีประสิทธิภาพการดูดซับสีสูงที่สุด ระยะเวลาที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดคือ 180 นาที คิดเป็นร้อยละ 79.58 57.10 และ 13.14 ตามลำดับ รูปแบบการดูดซับสีในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสามชนิด ศึกษาโดยใช้สมการไอโซเทอร์มแบบฟรุนลิช พบว่า ค่าคงที่ของสมการการดูดซับสำหรับสีเอซิด และสีไครเรทสูงกว่าสีรีแอคทีฟ โดยผลการทดลองที่สอดคล้องกับสมการนี้คือ ผงเปลือกหอยแครงขนาดละเอียดสามารถกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สีเอซิด และสีไครเรทได้ดีกว่าสีรีแอคทีฟ สำหรับคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยผงเปลือกหอยแครงขนาดละเอียดมีค่าสารแขวนลอย และปริมาตรละลายน้ำทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่ค่าซีโอดีมีค่าไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การบำบัดน้ำเสียด้วยผงเปลือกหอยสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดอื่นๆ ต่อไปได้

วีระพงศ์ (2548) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานสุราโดยกระบวนการโอโซนชั้น เพื่อหาสภาวะในการบำบัดที่เหมาะสม จากการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ ค่า pH เท่ากับ 7.0 กำลังการผลิตโอโซนเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดสี ซีโอดี และของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 69.91% 19.28% 35.57% ตามลำดับ แต่พบว่าในสภาวะที่เหมาะสม กระบวนการโอโซนชั้นจะทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น 26.24% เมื่อทำการทดลองกระบวนการโอโซนชั้นด้วยสภาวะที่เหมาะสมแบบต่อเนื่องพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสี ซีโอดี ของแข็งทั้งหมด มีค่าอยู่ระหว่าง 69.20%-74.02% 23.98%-27.63% และ 19.13%-24.68% ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และสารเคมี

1. อุปกรณ์

- 1.1 ตู้อบ รุ่น OF-11E ยี่ห้อ JEIO TECH
- 1.2 เคสซิเคเตอร์
- 1.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 1.4 เครื่องกวนสารละลาย และแท่งแม่เหล็ก
- 1.5 เครื่องปั่นละเอียด
- 1.6 เครื่องแก้ว
- 1.7 เครื่องปั่นเหวี่ยง รุ่น LMC-3000 ยี่ห้อ BIOSAN
- 1.8 เครื่องเขย่า รุ่น VRN-480
- 1.9 เครื่องวัด pH รุ่น 4/0 ยี่ห้อ THERMO ORI
- 1.10 เครื่องยวี่-วิสปีลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น V350
- 1.11 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ LEO

2. การเตรียมสารเคมี

2.1 สารละลายสต็อกมาตรฐานสีย้อมไคเรกท์ ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งผงสีย้อมไคเรกท์ 1 กรัม ละลายน้ำแล้วปรับปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

2.2 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์

นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 209.03 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.3 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์

นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 8.36 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 15%

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 150 กรัม ใส่บีกเกอร์ 1,000 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยกลั่น

2.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20%

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 200 กรัม ใส่บีกเกอร์ 1,000 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยกลั่น

2.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 25%

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 250 กรัม ใส่ปิកเกอร์ 1,000 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยกลั่น

2.7 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์มา 4 กรัม ใส่ปิกเกอร์ 100 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยกลั่น

วิธีการ

1. วิธีการเตรียมตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวา

1.1 การเตรียมตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาโดยกระบวนการทางกายภาพ (ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ)

นำผักตบชวาส่วนลำต้นมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วนำมาปอกเปลือกออก หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตามขวางให้มีความหนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร นำไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 1-2 วัน อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียด

1.2 การเตรียมตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาโดยกระบวนการทางกายภาพและเคมี (ตัวดูดซับปรับสภาพ)

1) นำผักตบชวาที่ได้จากข้อ 1.1 ต้มกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:4 โดยน้ำหนัก ให้มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำผักตบชวาไปล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน

2) นำผักตบชวาจากข้อ 1) ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15 % เป็นเวลา 2 วัน ล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน

3) นำผักตบชวาจากข้อ 2) ไปแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15 % เป็นเวลา 1 วัน ล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียด

4) ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองข้อ 1.2 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 20 และ 25%

2. การทดสอบหาสถานะที่เหมาะสม

2.1 ศึกษาผลของค่า pH ที่มีต่อการดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ที่มีต่อสารละลายสีข้อมไคเรกท์

1) ปิเปตสารละลายสต็อกมาตรฐานสีข้อมไคเรกท์ 1.25 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับ pH ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้ปริมาณที่น้อยที่สุดให้ค่า pH เป็น 3 5 7 9 และ 11 ตามลำดับ

2) นำสารละลายที่ปรับ pH แล้วจากข้อ 1) เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้ความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมเป็น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

3) นำสารละลายข้อมที่เตรียมจากข้อ 2) ทำการสแกนค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี- วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

4) นำกราฟที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด

2.2 ศึกษาผลของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายสีข้อมด้วยตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวา

1) ปิเปตสารละลายสต็อกมาตรฐานสีข้อมไคเรกท์ 25 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรใกล้เคียง 250 มิลลิลิตร ปรับ pH ด้วยสารละลาย

กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ โดยใช้ปริมาณที่น้อยที่สุดให้ได้ค่า pH เป็น 3 5 7 9 และ 11 ตามลำดับ

2) นำสารละลายสีย้อมไคเรกซ์ที่ปรับค่า pH แล้วจากข้อ 1) เทใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3) ชั่งตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาแบบไม่ปรับสภาพหนัก 4 กรัม ใส่ในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายสีย้อมไคเรกซ์ที่เตรียมได้จากข้อ 2) ลงไป 150 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4) นำสารละลายสีย้อมจากข้อ 3) มาเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยใช้ความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ของสารละลายสีย้อมไคเรกซ์

5) ทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%) โดยใช้สูตร

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

Co = ความเข้มข้นก่อนการบำบัด

C = ความเข้มข้นหลังการบำบัด

6) นำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพการดูดซับกับค่า pH

7) ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนตัวดูดซับชนิดปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% 20% และ 25% ตามลำดับ

3. ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

3.1 ปีเปตสารละลายสต็อกมาตรฐานสีย้อม 200 มิลลิลิตร ปรับให้มีสภาวะ pH ที่เหมาะสม ตามผลการทดลองที่ได้ ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 ชั่งตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาแบบไม่ปรับสภาพหนัก 2 3 4 5 และ 6 กรัม ตามลำดับ ใส่ในแต่ละขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 ลงไป 150 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 ต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.3 นำสารละลายสีย้อมที่ได้มาเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.4 ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

3.5 นำผลการทดลองที่ได้เขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับปริมาณตัวดูดซับ

3.6 ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนตัวดูดซับชนิดปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% 20% และ 25% ตามลำดับ

3. ศึกษาผลของเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

3.1 ปีเปตสารละลายสต็อกมาตรฐานสีย้อม 200 มิลลิลิตร ปรับให้มีสภาวะ pH ที่เหมาะสม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 ชั่งตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาแบบไม่ปรับสภาพตามปริมาณที่เหมาะสมจากผลการทดลอง เติมสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 ลงไป 150 มิลลิลิตร จากนั้น

ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 180 240 300 และ 360 นาที ตามลำดับ

3.3 นำสารละลายสีข้อมที่เตรียมได้เข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.4 ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

3.5 นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับเวลาในการปั่นกวน

3.6 ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเป็นใช้ตัวดูดซับชนิดปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% 20% และ 25% ตามลำดับ

4. ศึกษาผลของเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

4.1 ปิเปตสารละลายส้อมมาตรฐานสีข้อม 200 มิลลิลิตร ปรับให้มีสภาวะ pH ที่เหมาะสม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้ความเข้มข้นสารละลายสีข้อมเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 ชั่งตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาแบบไม่ปรับสภาพตามปริมาณที่เหมาะสม จากผลการทดลอง เติมสารละลายสีข้อมที่เตรียมได้จากข้อ 4.1 ลงไป 150 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวน ด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง จากนั้น ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 60 90 120 และ 150 นาที ตามลำดับ

4.3 นำสารละลายสีข้อมที่เตรียมได้เข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสง

4.4 ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีข้อมที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

4.5 นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับเวลาในการปั่นกว

4.6 ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนตัวดูดซับชนิดปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% 20% และ 25% ตามลำดับ

5. ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

5.1 ปิเปตสารละลายสีย้อมมาตรฐานสีช้อมมา 12.5 25 32.5 50 62.5 และ 75 มิลลิลิตร ตามลำดับ ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้ความเข้มข้นของสารละลายสีช้อมเป็น 50 100 150 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH ที่ให้การดูดซับสูงสุด

5.2 ชั่งตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักคตขวาแบบไม่ปรับสภาพตามปริมาณที่เหมาะสมจากผลการทดลอง เติมสารละลายสีช้อมที่เตรียมได้จากข้อ 5.1 ลงไป 150 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีตามระยะเวลาที่เหมาะสม และ เวลาในการสัมผัสที่ให้การดูดซับสูงสุด

5.3 นำสารละลายสีช้อมที่เตรียมได้เข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที แล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสง

5.4 ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีช้อมที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

5.5 นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับกับความเข้มข้น

5.6 ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเป็นใช้ตัวดูดซับชนิดปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% 20% และ 25% ตามลำดับ

5.7 นำผลการทดลองที่ได้มาศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการ Freundlich Isotherm และ Langmuir Isotherm

6. ศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

6.1 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

6.2 ทำการทดลองบำบัดน้ำทิ้ง โดยให้มีสภาวะที่ให้การดูดซับสูงสุดได้แก่ ค่า pH ปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการปั่นกววน และ เวลาในการสัมผัส

6.3 นำน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที แล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสง

6.4 ทำการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ผ่านการบำบัดแล้ว และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ (%)

6.5 ทำการวิเคราะห์ค่า BOD ก่อนและหลังการบำบัด

7. การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมแต่ละขั้นตอนทำการทดลอง 3 ครั้ง

8. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวา

ตัวดูดซับเซลลูโลสจากผักตบชวาทั้ง 4 ชนิดได้แก่ ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 15% ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 20% และตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 25% ทั้งที่ไม่ผ่านการดูดซับและดูดซับสารละลายสีย้อมไครเรทที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเข้าเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ

สถานที่ทำการทดลอง

การวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการเคมี วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์และการจัดการของเสีย สถาบันค้นคว้าพัฒนาผลิตผลทางการเกษตร อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาในการทดลอง

มกราคม พ.ศ. 2548 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549

ผลการวิจัยและวิจารณ์

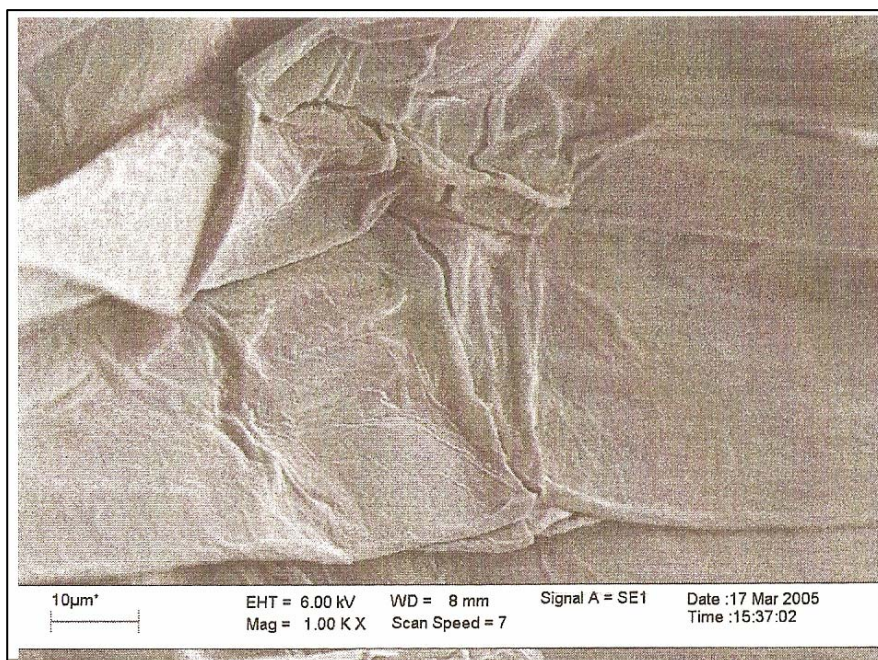
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกต์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยการทดลองสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่หนึ่งเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวา ขั้นตอนที่สองทดลองตัวดูดซับในการกำจัดน้ำสีสังเคราะห์จากสีย้อมไคเรกต์แบบเบตช์ (batch) ขั้นตอนที่สามนำตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพไปกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาได้แบ่งเป็น 4 ชนิด คือ ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 15% ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 20% และตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 25% เพื่อดูดซับสีย้อมไคเรกต์ 3 สี ได้แก่ สีนํ้าเงิน สีแดง และสีเหลือง โดยหาสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ค่า pH ปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการปั่นกววน (shaking time) และเวลาในการสัมผัส (contact time) ศึกษาความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์และนำไปหาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนลิช และแลงเมียร์ เพื่อหาประสิทธิภาพตัวดูดซับที่ดีที่สุด โดยน้ำทิ้งที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นน้ำทิ้งจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

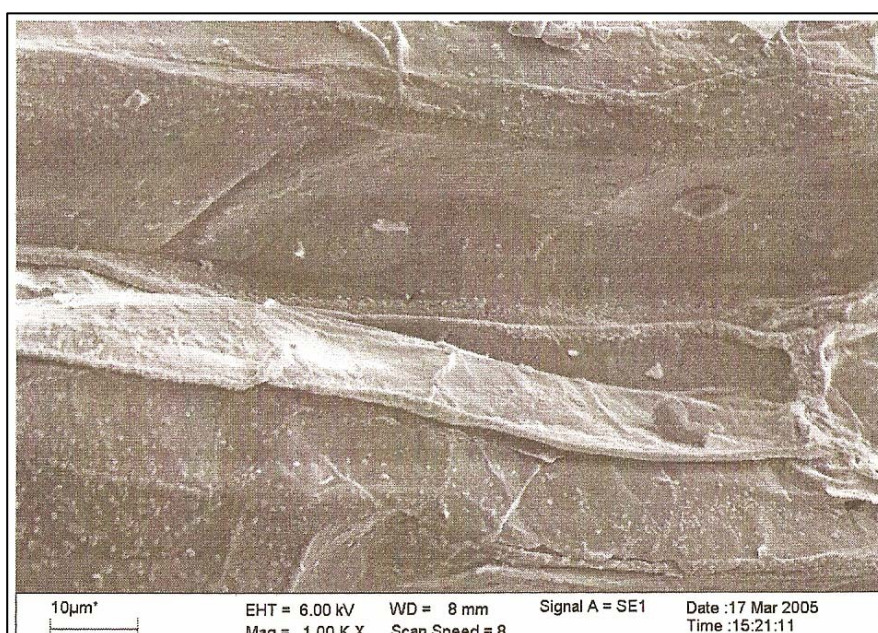
1. การวิเคราะห์ลักษณะกายภาพตัวดูดซับ

ตัวดูดซับจากผักตบชวาเมื่อทำการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะทำให้เฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ มีลักษณะคล้ายเซลลูโลสละลายน้ำออกมา และเมื่อนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีผลทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสละลายออกมาในปริมาณที่ต่างกัน รวมทั้งทำให้เกิดการพองตัว (swelling) ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ จากการศึกษาเมื่อนำไปปรับสภาพด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีแล้ว จะได้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นผงขนาด 500 ไมครอน หรือขนาด 35 mesh ทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสี โดยผักตบชวาสด 1 กิโลกรัมได้ผงผักตบชวา 10 กรัม

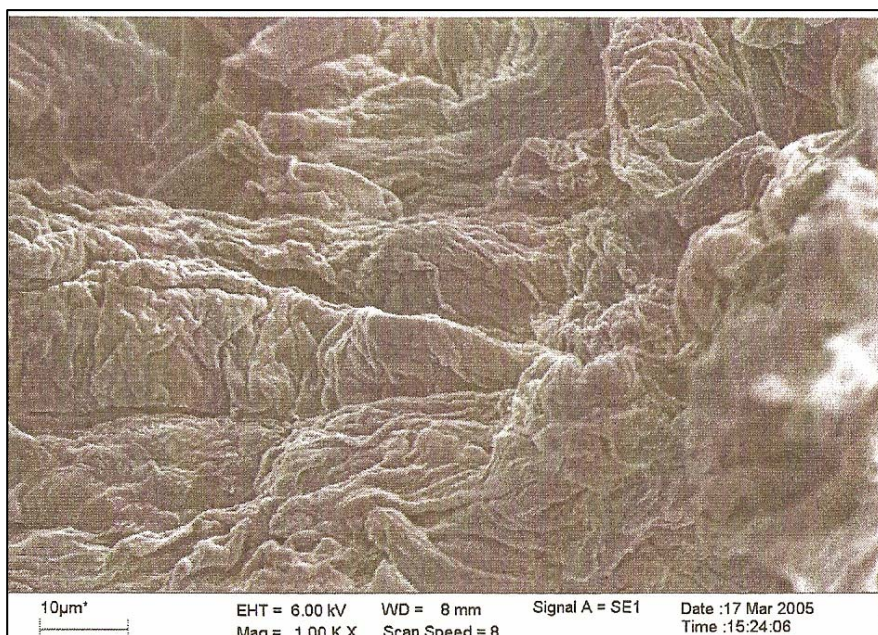
จากการทดลองเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวา โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน ทำให้เซลลูโลสในผักตบชวามีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันออกไป ซึ่งจากการใช้เครื่อง scanning electron microscope (SEM) ถ่ายภาพพื้นผิวตัวดูดซับแต่ละชนิดเมื่อมีการปรับสภาพและหลังจากที่ทำการดูดซับแล้วนำมาเปรียบเทียบ แสดงดังภาพที่ 12 - 19



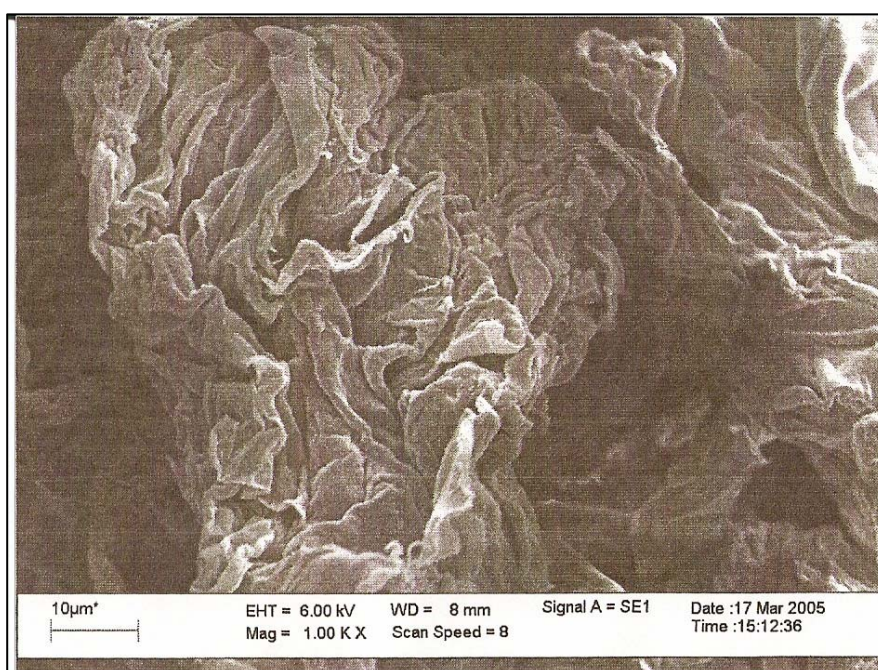
ภาพที่ 12 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ ที่ไม่ผ่านการดูดซับ



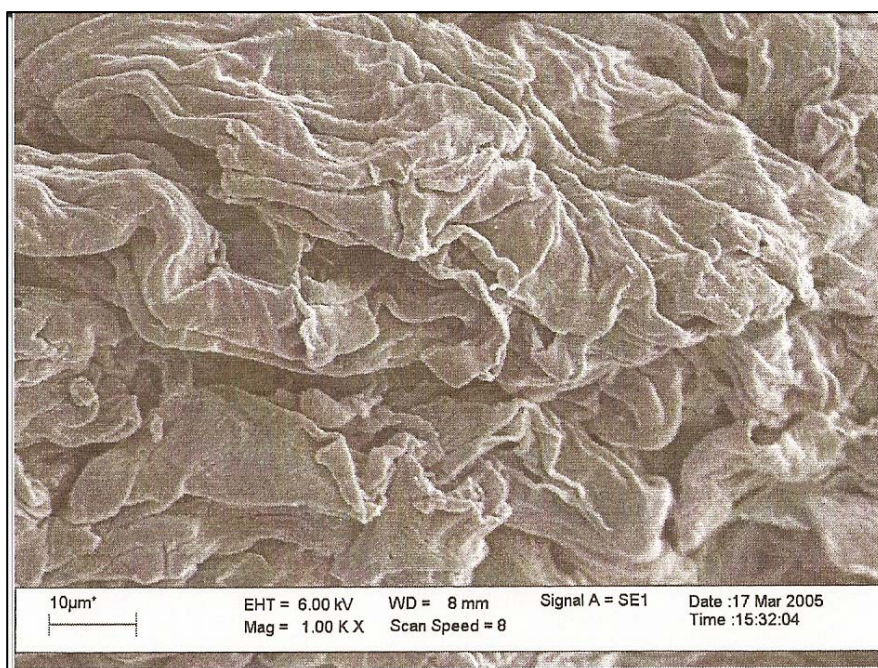
ภาพที่ 13 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ ที่ผ่านการดูดซับ



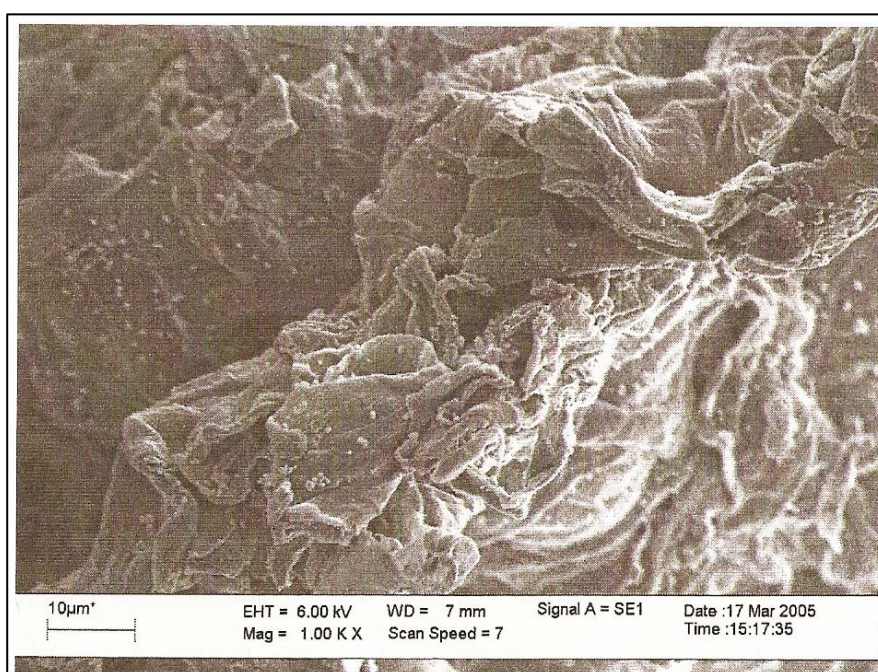
ภาพที่ 14 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 15% ที่ไม่ผ่านการดูดซับ



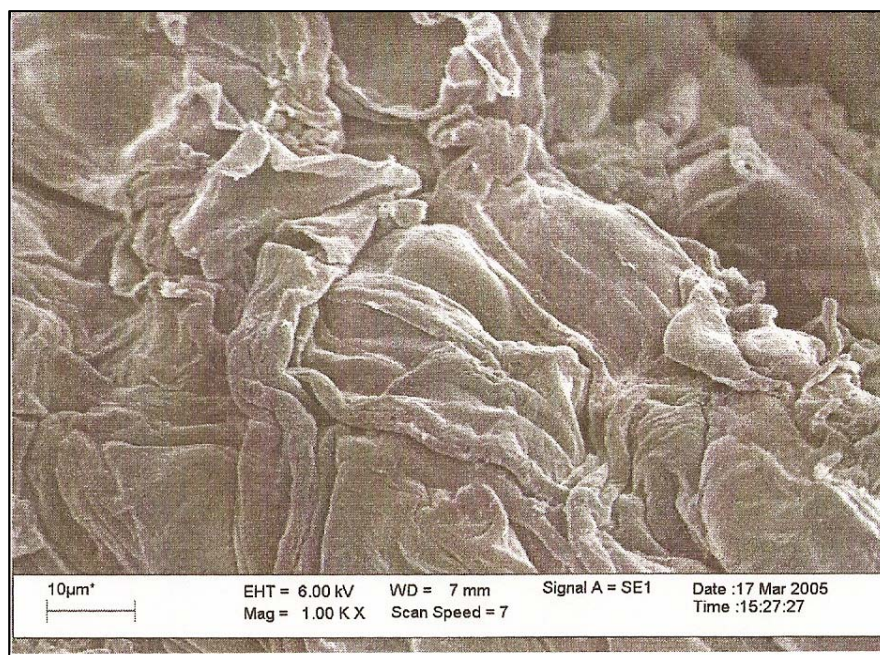
ภาพที่ 15 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 15% ที่ผ่านการดูดซับ



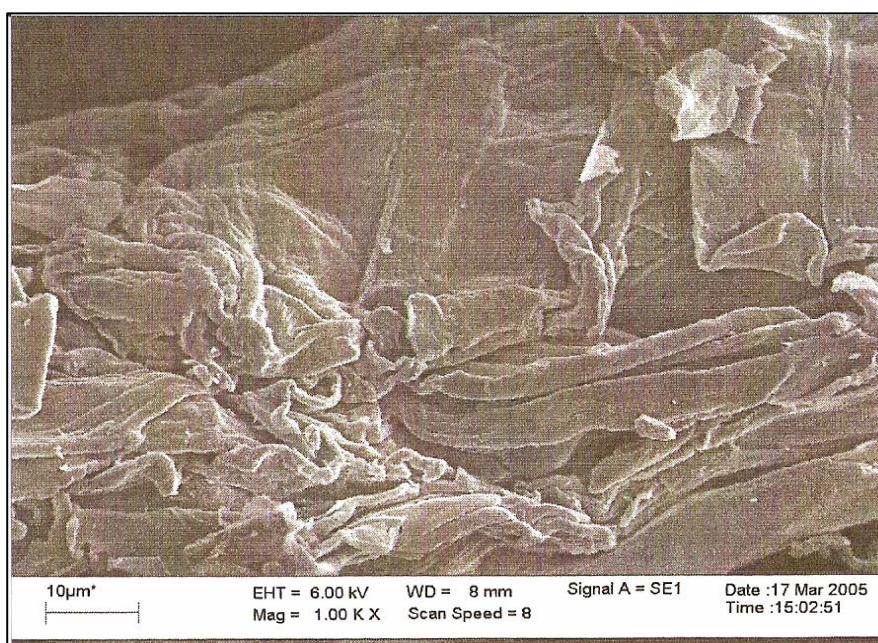
ภาพที่ 16 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 20% ที่ไม่ผ่านการดูดซับ



ภาพที่ 17 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 20% ที่ผ่านการดูดซับ



ภาพที่ 18 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 25% ที่ไม่ผ่านการดูดซับ



ภาพที่ 19 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 25% ที่ผ่านการดูดซับ

จากผลการทดลอง เปรียบเทียบภาพถ่าย SEM พบว่า ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% มีการพองตัวมากที่สุด (ภาพที่ 16-17) ทำให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ตัวถูกดูดซับก็สามารถเกาะได้มากขึ้น ในขณะที่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% (ภาพที่ 14-15) และตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% (ภาพที่ 18-19) มีการพองตัวที่ใกล้เคียงกัน และตัวดูดซับที่ไม่ถูกปรับสภาพ (ภาพที่ 12-13) ไม่มีการพองตัว จึงทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถเกาะได้น้อยลง

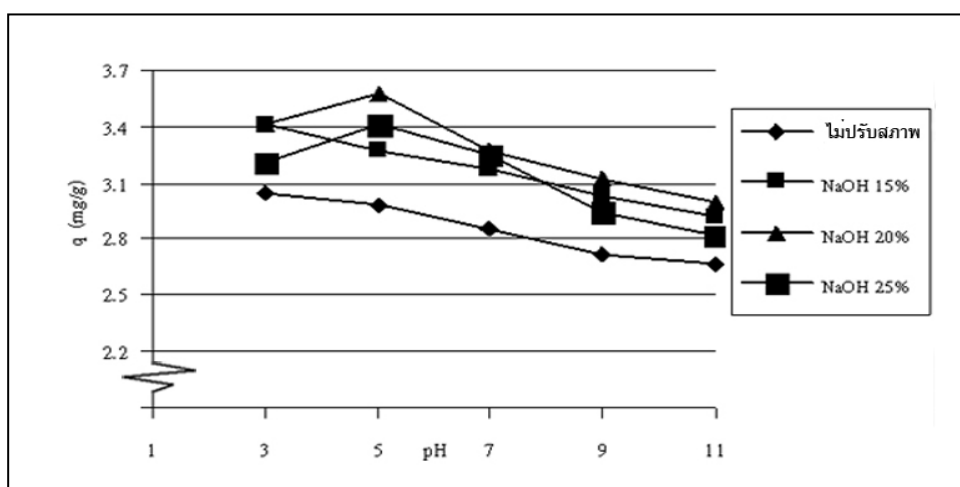
2. การวิเคราะห์สี

สีไคเรทที่นำมาศึกษามี 3 โทนสี ได้แก่ สีนํ้าเงิน สีแดง และสีเหลือง เมื่อนำไปวัดค่าความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ได้ผลดังนี้คือ สีนํ้าเงินความยาวคลื่นสูงสุดที่ 584 นาโนเมตร สีแดงที่ 520 นาโนเมตร และสีเหลืองที่ 372 นาโนเมตร

3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับ

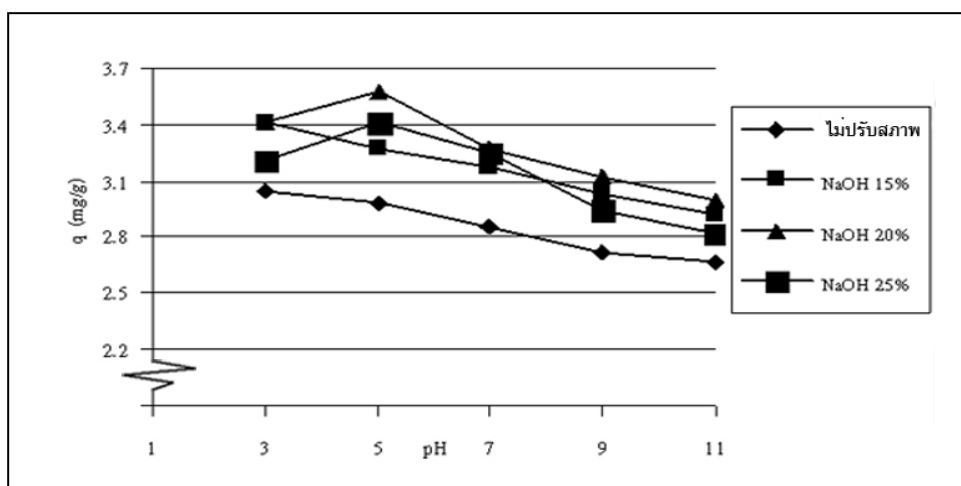
3.1 ผลของ pH ต่อความสามารถดูดซับสีไคเรทโดยตัวดูดซับจากผักตบชวา

การศึกษาค่า pH เพื่อหาสภาวะที่มีการดูดซับสูงสุด โดยเปรียบเทียบค่า pH ที่ 3 5 7 9 และ 11 กับปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับจะเพิ่มสูงในช่วง pH 3-5 และเริ่มลดลงเรื่อยๆ เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งแต่ละสีจะมีการดูดซับได้ดีในค่า pH ที่ใกล้เคียงกัน



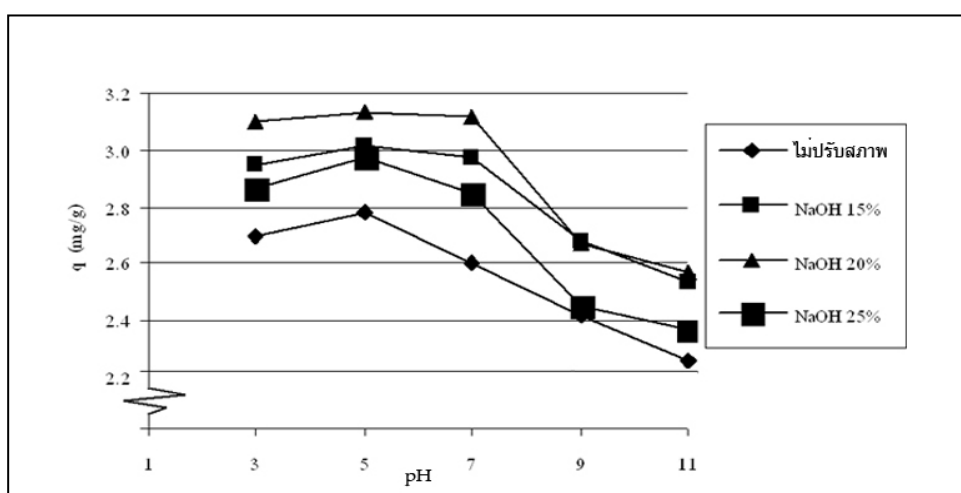
ภาพที่ 20 ความสามารถในการดูดซับสีนํ้าเงินโดยตัวดูดซับจากผักตบชวาที่ค่า pH ต่างกัน

จากภาพที่ 20 พบว่า การดูดซับสีน้ำเงินโดยตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ และตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% มีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุดที่ค่า pH 3 และเมื่อค่า pH สูงขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะต่ำลง ส่วนตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% และ NaOH 25% มีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุดที่ค่า pH 5 และเมื่อค่า pH สูงขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำลงเช่นกัน



ภาพที่ 21 ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยตัวดูดซับจากผักตบชวาที่ค่า pH ต่างกัน

จากภาพที่ 21 พบว่า การดูดซับสีแดงโดยตัวดูดซับจากผักตบชวาทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุดที่ค่า pH 5 และเมื่อค่า pH สูงขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะต่ำลง โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% ส่วนตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพและตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 22 ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยตัวดูดซับจากผักตบชวาที่ค่า pH ต่างกัน

จากภาพที่ 22 พบว่า การดูดซับสีเหลืองโดยตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุดที่ค่า pH 5 และเมื่อค่า pH สูงขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะต่ำลง โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ

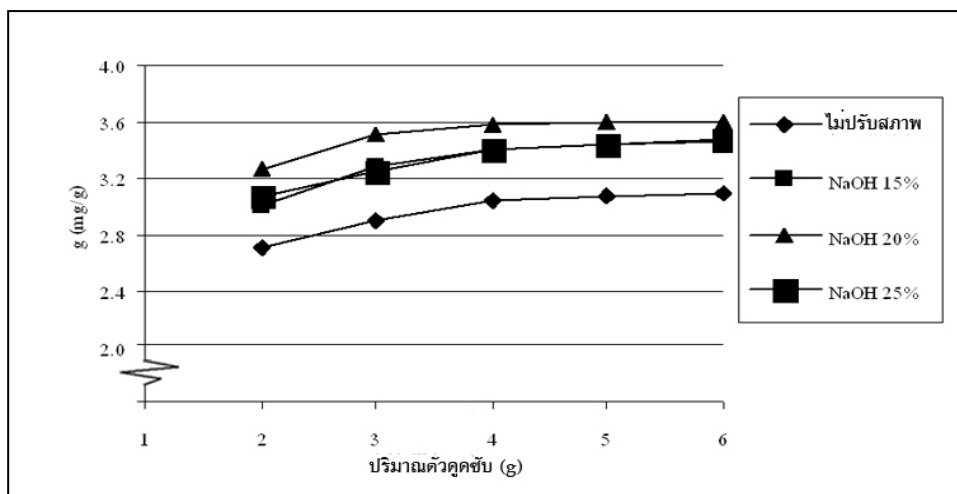
ในการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับแต่ละสีจะมีประสิทธิภาพที่ต่างกัน โดยทุกสีเมื่อใช้ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% ที่ค่า pH 5 สามารถดูดซับสีทั้ง 3 สีได้ดีที่สุด โดยสีน้ำเงินมีประสิทธิภาพสูงสุด 95.32% สีแดง 87.44% และสีเหลือง 83.49% (แสดงดังตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 แสดงค่า pH และประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด

ชนิดของ ตัวดูดซับ	สีน้ำเงิน		สีแดง		สีเหลือง	
	pH	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	pH	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	pH	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)
ไม่ปรับสภาพ	3	81.05	5	80.20	5	74.09
NaOH 15%	3	90.91	5	83.31	5	80.35
NaOH 20%	5	95.32	5	87.44	5	83.49
NaOH 25%	5	90.89	5	80.73	5	79.22

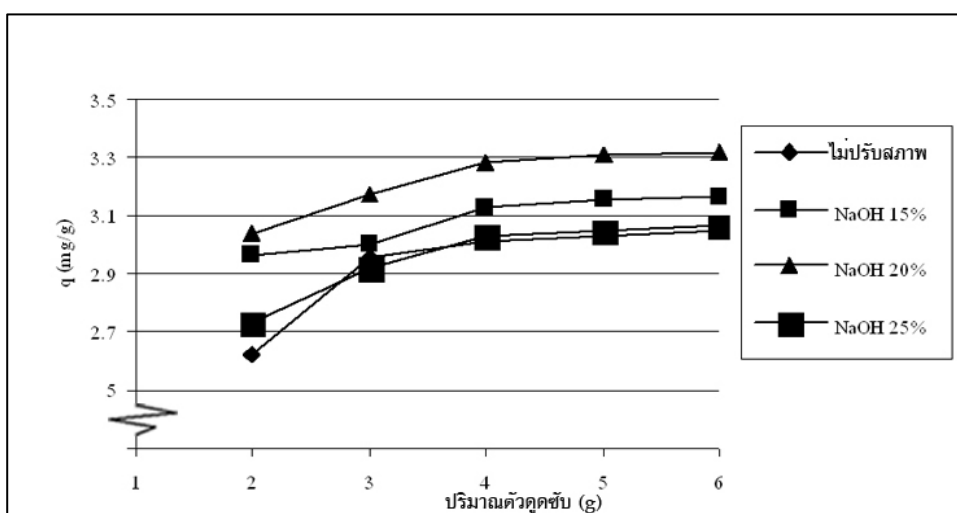
3.2 ปริมาณตัวดูดซับจากผักตบชวาที่เหมาะสมในการดูดซับสีไคเรกท์

การทดลองการดูดซับสีไคเรกท์จากน้ำสีสังเคราะห์ โดยเตรียมให้มีค่า pH ที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดตามตารางที่ 5 ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษา คือ 2 3 4 5 และ 6 กรัม ต่อปริมาณน้ำเสีย 150 มิลลิลิตร



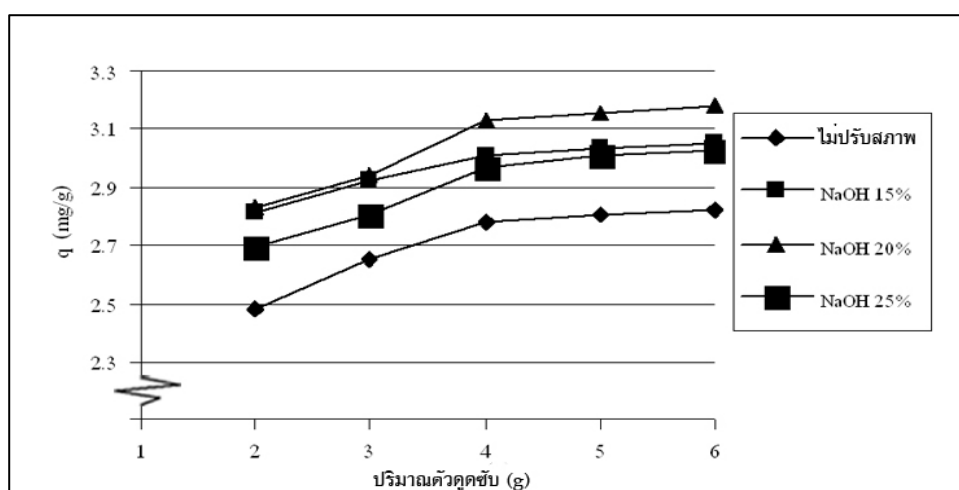
ภาพที่ 23 ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยปริมาณตัวดูดซับต่างกัน

จากภาพที่ 23 พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในทุกตัวดูดซับจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัมให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด หลังจากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% และ NaOH 25% ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพการดูดซับต่ำที่สุดคือ ตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ



ภาพที่ 24 ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยปริมาณตัวดูดซับต่างกัน

จากภาพที่ 24 พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีแดงคล้ายกับการดูดซับสีน้ำเงิน คือ ในทุกตัวดูดซับประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัมให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด หลังจากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตามลำดับ



ภาพที่ 25 ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยปริมาณตัวดูดซับต่างกัน

จากภาพที่ 25 พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองคล้ายกับการดูดซับสีน้ำเงินและสีแดง คือ ในทุกตัวดูดซับประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัมให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด หลังจากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 20% จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือ ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 15% ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH 25% และตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ ตามลำดับ

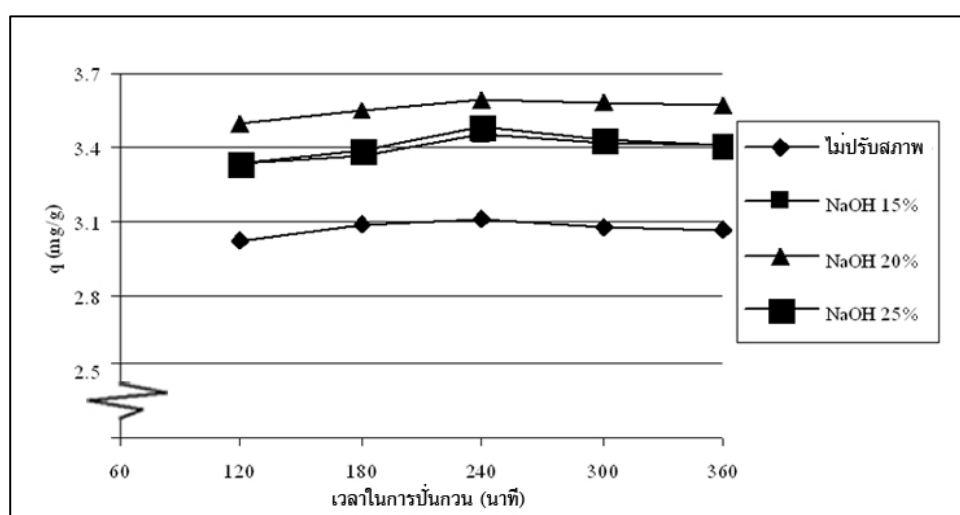
ในการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของแต่ละสีจะแตกต่างกัน โดยตัวดูดซับที่ดีที่สุดคือ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีน้ำเงิน 95.32% สีแดง 87.45% และสีเหลือง 83.49% (แสดงดังตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 ปริมาณตัวดูดซับแต่ละชนิดที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีสูงสุด

ชนิดของ ตัวดูดซับ	สีน้ำเงิน		สีแดง		สีเหลือง	
	ปริมาณ	ประสิทธิภาพ	ปริมาณ	ประสิทธิภาพ	ปริมาณ	ประสิทธิภาพ
	ตัวดูดซับ	การดูดซับ (%)	ตัวดูดซับ	การดูดซับ (%)	ตัวดูดซับ	การดูดซับ (%)
ไม่ปรับสภาพ	4	81.06	4	80.20	4	74.09
NaOH 15%	4	90.90	4	83.32	4	80.34
NaOH 20%	4	95.32	4	87.45	4	83.49
NaOH 25%	4	90.89	4	80.74	4	79.22

3.3 เวลาในการปั่นกวที่เหมาะสมของตัวดูดซับจากผักตบชวาในการดูดซับสีไคเรกท์

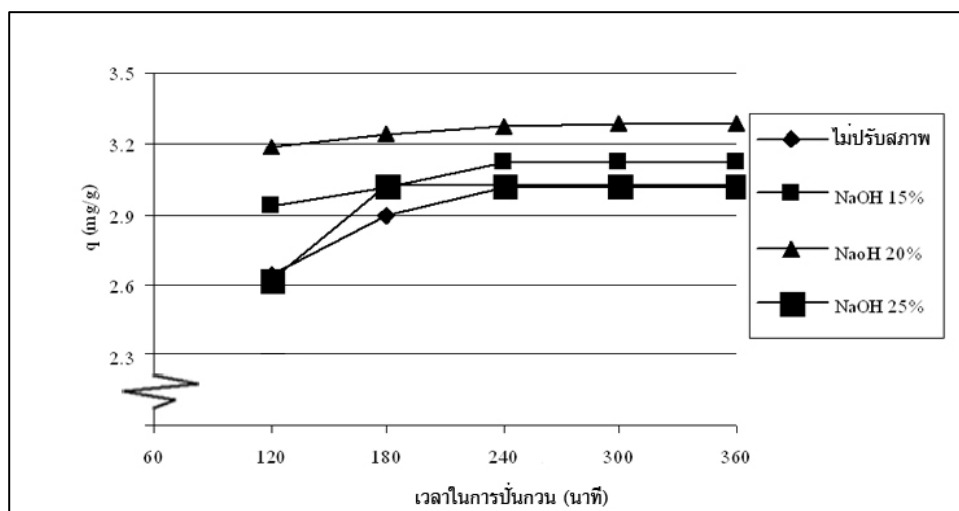
การทดลองการดูดซับสีไคเรกท์จากน้ำสีสังเคราะห์ โดยเตรียมให้มีค่า pH ที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดตามตารางที่ 5 และใช้ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมตามตารางที่ 6 โดยเวลาในการปั่นกวที่ใช้ในการศึกษาคือ 120 180 240 300 และ 360 นาที



ภาพที่ 26 ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยเวลาในการปั่นกวต่างกัน

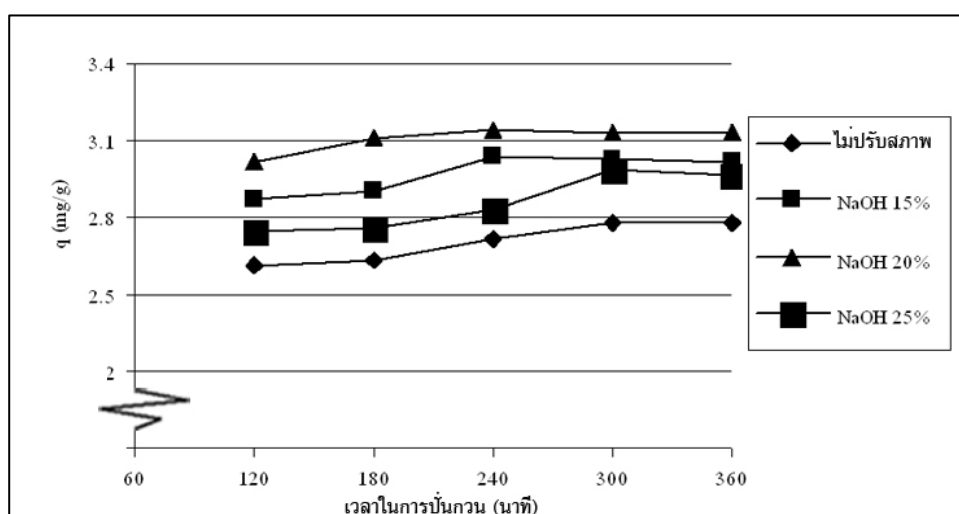
จากภาพที่ 26 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีน้ำเงินจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาในการปั่นกวนนานขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงที่ ทุกตัวดูดซับให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเมื่อเวลาในการปั่นกวน 240 นาที หลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจะคงที่ โดยตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพ

การดูดซับดีที่สุดคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% รองลงมาคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตามลำดับ



ภาพที่ 27 ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยเวลาในการปั่นกว่นต่างกัน

จากภาพที่ 27 พบว่า การดูดซับสีแดงโดยตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% และ NaOH 25% ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่เวลาในการปั่นกว่น 240 นาที ในขณะที่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่เวลาในการปั่นกว่น 300 นาที



ภาพที่ 28 ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยเวลาในการปั่นกว่นต่างกัน

จากภาพที่ 28 พบว่า การดูดซับสีเหลืองโดยตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ และตัวดูดซับที่ปรับด้วย NaOH 25% ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่เวลาในการปั่นกววน 300 นาที ในขณะที่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% และ NaOH 20% ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่เวลาในการปั่นกววน 240 นาที หลังจากนั้นการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะคงที่

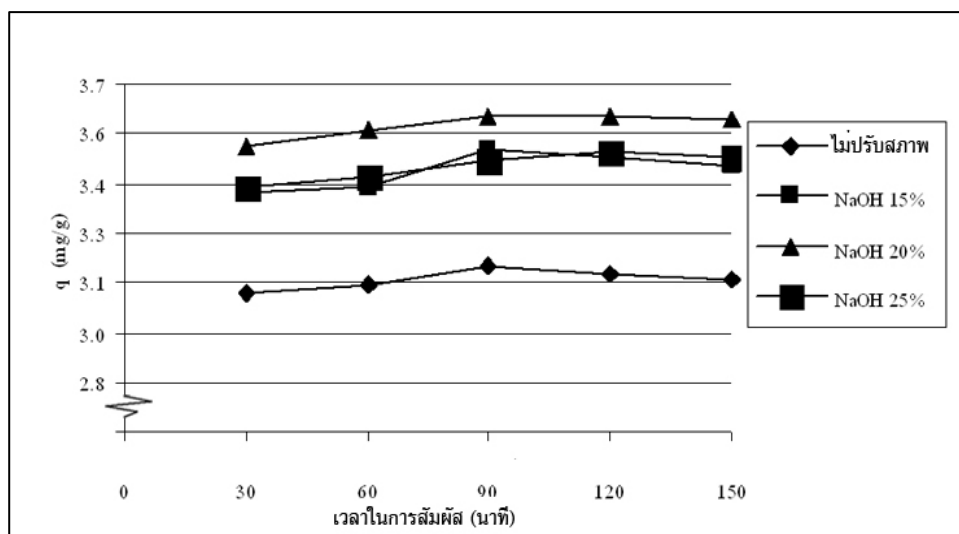
ในการทดลองพบว่าระยะเวลาในการปั่นกววนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดของแต่ละสีมีค่าต่างกัน ทุกสีเมื่อใช้ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด โดยระยะเวลาในการปั่นกววนที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีน้ำเงินสูงสุด 95.90% คือ 240 นาที ในขณะที่ระยะเวลาในการปั่นกววน 300 นาทีให้ประสิทธิภาพการดูดซับ 95.90% สีแดงเวลาในการปั่นกววน 300 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับ 87.46 % และสีเหลืองที่ 240 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับ 83.78%

ตารางที่ 7 เวลาในการปั่นกววนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสี

ชนิดของ ตัวดูดซับ	สีน้ำเงิน		สีแดง		สีเหลือง	
	เวลาในการ ปั่นกววน	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	เวลาในการ ปั่นกววน	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	เวลาในการ ปั่นกววน	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)
ไม่ปรับสภาพ	240	83.00	240	80.30	300	74.22
NaOH 15%	240	92.07	240	83.34	240	81.15
NaOH 20%	240	95.90	300	87.46	240	83.78
NaOH 25%	240	92.84	240	80.79	300	79.61

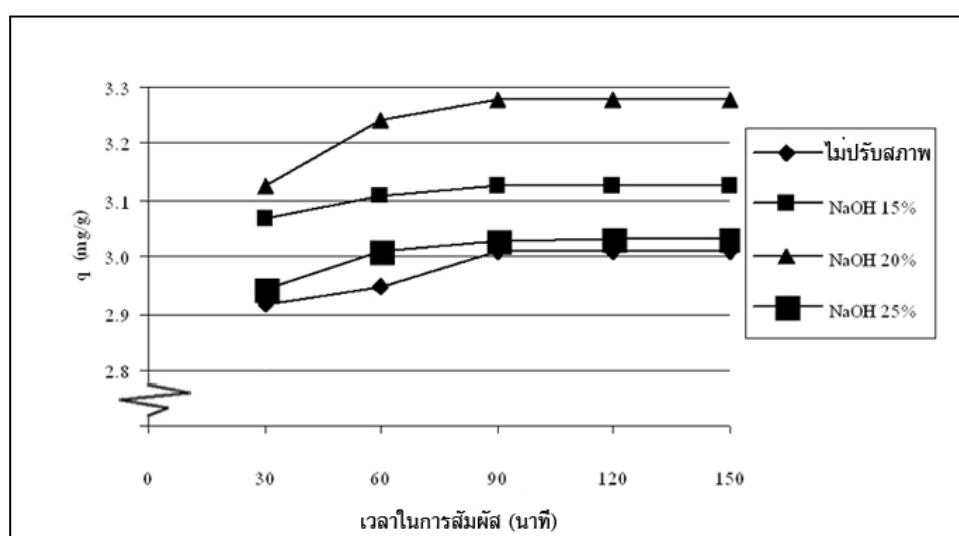
3.4 เวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมของตัวดูดซับจากผักตบชวาในการดูดซับสีไคเรกท์

การทดลองการดูดซับสีไคเรกท์จากน้ำสีสังเคราะห์โดยตัวดูดซับจากผักตบชวา เพื่อหาเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม ทำการทดลองโดยปรับให้มีค่า pH ปริมาณตัวดูดซับ และเวลาในการปั่นกววนที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของแต่ละตัวดูดซับ และใช้เวลาในการสัมผัสต่างกันคือ 30 60 90 120 และ 150 นาที



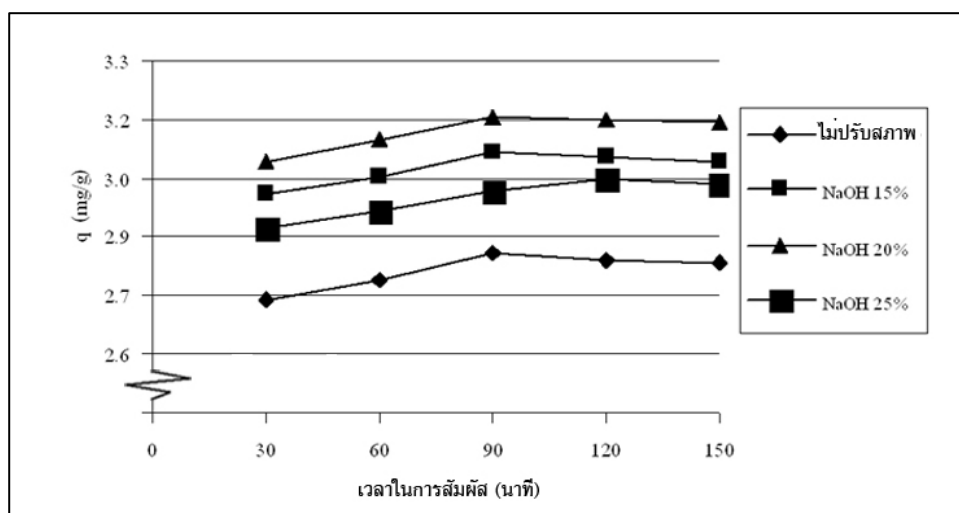
ภาพที่ 29 ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยเวลาในการสัมผัสต่างกัน

จากภาพที่ 29 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีน้ำเงินจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% และ NaOH 20% ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเมื่อเวลาในการสัมผัส 90 นาที ในขณะที่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเมื่อเวลาในการสัมผัส 120 นาที และตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุดคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% รองลงมาคือตัวดูดซับที่ปรับด้วย NaOH 25% NaOH 15% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ



ภาพที่ 30 ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยเวลาในการสัมผัสต่างกัน

จากภาพที่ 30 ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีแดงของทุกตัวเกิดขึ้นเมื่อเวลาในการสัมผัสเป็น 90 นาที หลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจะคงที่ โดยตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด คือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% รองลงมาคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% NaOH 15% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ



ภาพที่ 31 ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยเวลาในการสัมผัสต่างกัน

จากภาพที่ 31 พบว่าการดูดซับสีเหลืองให้ผลการทดลองคล้ายสีน้ำเงิน โดยตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% และ NaOH 20% มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเมื่อเวลาในการสัมผัส 90 นาที ในขณะที่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเมื่อเวลาในการสัมผัส 120 นาที ตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด คือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% รองลงมาคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตามลำดับ

ในการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีในเวลาในการสัมผัสต่างกัน โดยทุกสีเมื่อใช้ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด โดยสีน้ำเงินใช้เวลาในการสัมผัส 90 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด 96.02% สีแดงใช้เวลาในการสัมผัส 90 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด 87.53 % และสีเหลืองใช้เวลาในการสัมผัส 90 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด 84.21 %

ตารางที่ 8 เวลาในการสัมผัสที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสี

ชนิดของ ตัวดูดซับ	สีน้ำเงิน		สีแดง		สีเหลือง	
	เวลาใน	ประสิทธิภาพ	เวลาใน	ประสิทธิภาพ	เวลาใน	ประสิทธิภาพ
	การสัมผัส	การดูดซับ (%)	การสัมผัส	การดูดซับ (%)	การสัมผัส	การดูดซับ (%)
ไม่ปรับสภาพ	90	84.02	90	80.59	90	74.91
NaOH 15%	90	93.39	90	83.50	90	81.86
NaOH 20%	90	96.02	90	87.53	90	84.21
NaOH 25%	120	93.22	90	80.86	120	79.95

จากผลการทดลองทำให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมของตัวดูดซับจากผักตบชวาแต่ละชนิด รวมถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีไคเรกทีในน้ำสีสังเคราะห์ โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% ในทุกโทนสีให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด รองลงมาคือตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 สถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการกำจัดสีไคเรกที

สถานะที่ใช้ทดลอง	pH	ปริมาณ ตัวดูดซับ(กรัม)	เวลาในการ ปั่นกววน (นาที)	เวลาในการ สัมผัส (นาที)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
สีน้ำเงิน					
ไม่ปรับสภาพ	3	4	240	90	84.02
NaOH 15%	3	4	240	90	93.39
NaOH 20%	5	4	240	90	96.02
NaOH 25 %	5	4	240	120	93.22
สีแดง					
ไม่ปรับสภาพ	5	4	240	90	80.59
NaOH 15%	5	4	240	90	83.50
NaOH 20%	5	4	300	90	87.53
NaOH 25 %	5	4	240	90	80.86

ตารางที่ 9 (ต่อ) สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการกำจัดสีไคเรกท์

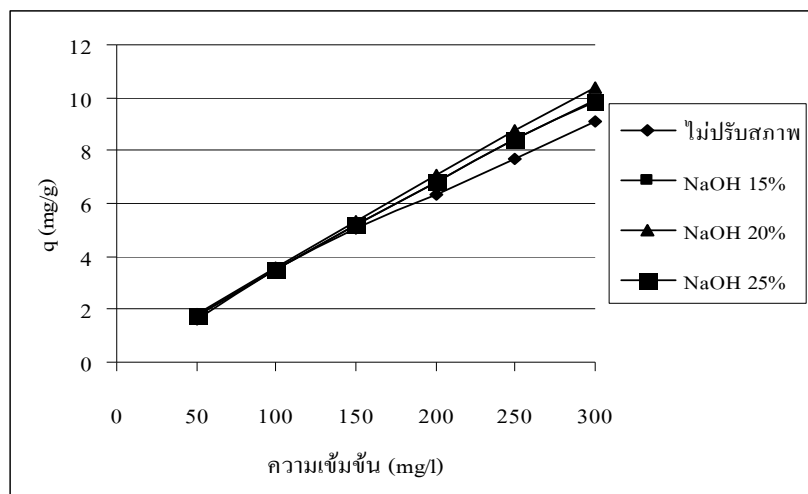
สภาวะที่ใช้ทดลอง	pH	ปริมาณ ตัวดูดซับ(กรัม)	เวลาในการ ปั่นกววน (นาท)	เวลาในการ สัมผัส (นาท)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
สีเหลือง					
ไม่ปรับสภาพ	5	4	300	90	74.91
NaOH 15%	5	4	240	90	81.86
NaOH 20%	5	4	240	90	84.21
NaOH 25 %	5	4	300	120	79.95

จากตารางที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับที่ปรับสภาพทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 20% และ NaOH 25% โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% ให้ประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีที่สุด ในขณะที่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% ให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำ อันเนื่องมาจากปริมาณ NaOH ที่เหลือติดค้างบนตัวดูดซับมีปริมาณมากเกินไป ทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือไปปกคลุมพื้นที่ผิวของเซลลูโลสบางส่วนทำให้การดูดซับลดลง

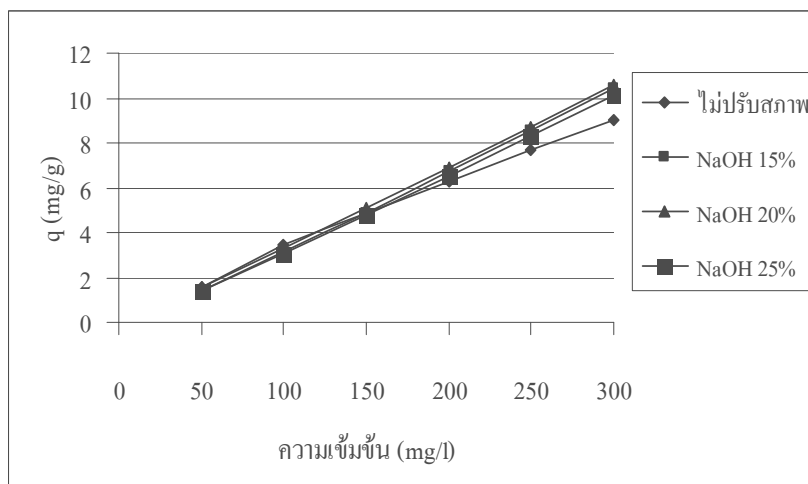
4. ความเข้มข้นของสีย้อมไคเรกท์และการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับ

4.1 ทดสอบความเข้มข้นของสีกับปริมาณการดูดซับ

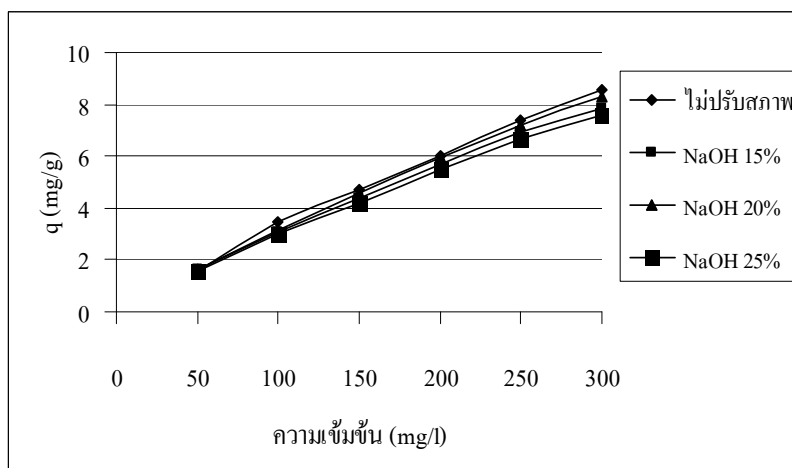
เตรียมสีย้อมไคเรกท์สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลืองให้มีสภาวะที่เหมาะสมตามตารางที่ 8 โดยใช้ความเข้มข้นของสีที่ 50 100 150 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของทุกโทนสีเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 32 ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินโดยความเข้มข้นของสีต่างกัน



ภาพที่ 33 ความสามารถในการดูดซับสีแดงโดยความเข้มข้นของสีต่างกัน



ภาพที่ 34 ความสามารถในการดูดซับสีเหลืองโดยความเข้มข้นของสีต่างกัน

ภาพที่ 32-34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q กับความเข้มข้นของสี ซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีมากขึ้น ค่า q ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นความเข้มข้นของสีจึงแปรผันโดยตรงกับประสิทธิภาพการดูดซับ

4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การดูดซับสีของตัวดูดซับจากผักตบชวาสามารถแสดงในรูปไอโซเทอร์มการดูดซับ ซึ่งจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนลิชและแลงเมียร์ พบว่าการดูดซับสีโดยตัวดูดซับจากผักตบชวาเป็นไปตามกลไกทั้งแบบฟรุนลิชและแลงเมียร์ แสดงดังตารางที่ 10 - 12

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนลิช และแลงเมียร์ในการดูดซับสีน้ำเงิน

ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm			Langmuir Isotherm		
	K	n	R ²	K	q _m	R ²
ไม่ปรับ	0.48	1.50	0.9956	3.25	10.75	0.9909
NaOH 15%	1.00	1.54	0.9960	10.32	12.64	0.9949
NaOH 20%	1.41	1.55	0.9979	17.28	12.89	0.9957
NaOH 25%	1.00	1.54	0.9959	10.14	12.56	0.9938

ตารางที่ 10 แสดงให้เห็นว่าในการดูดซับสีน้ำเงิน ทุกตัวดูดซับเป็นไปตามสมการของฟรุนลิชและสมการแลงเมียร์ โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% มีค่าคงที่ในการดูดซับมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับดังกล่าวมีความจุในการดูดซับมาก ซึ่งสอดคล้องกับ n ซึ่งมีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับมากที่สุด และสามารถดูดซับได้สูงสุด 12.89 mg/g ตัวดูดซับที่ให้ความสามารถในการดูดซับรองลงมาคือ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตามลำดับ โดยให้ผลการทดลองที่เหมือนกันทั้งสองสมการ

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนลิช และแลงเมียร์ในการดูดซับสีแดง

ตัวดูดซับ	freundlich isotherm			Langmuir Isotherm		
	K	n	R ²	K	q _m	R ²
ไม่ปรับ	0.35	1.37	0.9972	2.26	7.90	0.9932
NaOH 15%	0.41	1.38	0.9979	3.68	13.79	0.9961
NaOH 20%	0.53	1.41	0.9985	5.04	14.10	0.9981
NaOH 25%	0.36	1.38	0.9976	2.98	13.23	0.9957

ตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่าในการดูดซับสีแดง พบว่าผลการทดลองคล้ายกับการดูดซับสีน้ำเงินโดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% มีความจุและสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด โดยสามารถดูดซับได้สูงสุด 14.10 mg/g ตัวดูดซับที่ให้ความสามารถในการดูดซับรองลงมาคือ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ โดยผลการทดลองเหมือนกันทั้งสองสมการ

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มฟรุนลิช และแลงเมียร์ในการดูดซับสีเหลือง

ตัวดูดซับ	Freundlich Isotherm			Langmuir Isotherm		
	K	n	R ²	K	q _m	R ²
ไม่ปรับ	0.39	1.49	0.9940	2.39	10.47	0.9901
NaOH 15%	0.43	1.51	0.9957	2.77	11.10	0.9950
NaOH 20%	0.52	1.54	0.9962	3.40	11.22	0.9960
NaOH 25%	0.37	1.49	0.9956	2.27	10.87	0.9946

ตารางที่ 12 แสดงให้เห็นว่าในการดูดซับสีเหลือง พบว่าผลการทดลองคล้ายกับการดูดซับสีน้ำเงินและสีแดง โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% มีความจุและสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด โดยสามารถดูดซับได้สูงสุด 11.22 mg/g ตัวดูดซับที่ให้ความสามารถในการดูดซับรองลงมาคือ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ โดยผลการทดลองเหมือนกันทั้งสองสมการ

5. ประสิทธิภาพการบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยตัวดูดซับจากผักตบชวา

การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาทั้ง 4 ชนิด และการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับแต่ละชนิดในการบำบัดสีไคเรกท์ 3 โทนสี ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมดังตารางที่ 9 โดยในการบำบัดน้ำทิ้งจริงได้นำสภาวะดังกล่าวมาใช้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 สรุปการใช้ตัวดูดซับในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงาน

ตัวดูดซับที่	ชนิดตัวดูดซับ	pH	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	เวลาในการปั่นกววน (นาที)	เวลาในการสัมผัส (นาที)
1	ไม่ปรับสภาพ	3	4	240	90
2	ไม่ปรับสภาพ	5	4	240	90
3	ไม่ปรับสภาพ	5	4	300	90
4	NaOH 15%	3	4	240	90
5	NaOH 15%	5	4	240	90
6	NaOH 20%	5	4	240	90
7	NaOH 20%	5	4	300	90
8	NaOH 25 %	5	4	240	120
9	NaOH 25 %	5	4	240	90
10	NaOH 25 %	5	4	300	120

จากตารางที่ 13 สามารถสรุปได้ว่าตัวดูดซับทั้งหมด 10 ชนิด ที่นำไปกำจัดสีในน้ำทิ้งจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีได้ดีที่สุด โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงและค่า BOD ก่อนการบำบัดคือ 0.8649 และ 89 mg/l ตามลำดับ ผลการทดลองดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยตัวดูดซับจากผักตบชวา

ตัวดูดซับ ที่	ค่าการดูดกลืนแสง หลังบำบัด	ประสิทธิภาพ หลังบำบัด	ค่า BOD (mg/l) หลังการบำบัด	ประสิทธิภาพ การลดค่า BOD(%)
1	0.3153	63.54	55	38.20
2	0.3255	62.37	50	43.82
3	0.3105	64.10	52	41.57
4	0.3002	65.29	50	43.82
5	0.3016	65.13	53	40.45
6	0.2007	76.80	51	42.70
7	0.2021	76.63	50	43.82
8	0.3109	64.05	48	46.07
9	0.3012	65.18	50	43.82
10	0.3021	65.07	50	43.82

จากตารางที่ 14 พบว่าตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอดีที่สุดคือ ตัวดูดซับที่ 6 ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัมต่อปริมาณน้ำทิ้ง 150 มิลลิลิตร เวลาในการปั่นกววน 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพรองลงมาคือ ตัวดูดซับที่ 7 4 9 5 10 3 8 1 และ 2 ตามลำดับ และทุกตัวดูดซับสามารถบำบัด BOD ในน้ำทิ้งได้โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

สรุป

การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาโดยปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ในการกำจัดสีไคเรทก์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยเตรียมตัวดูดซับ 4 ชนิด คือตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% NaOH 20% และ NaOH 25% ตามลำดับ ผลการศึกษา ดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพ

ตัวดูดซับเมื่อถูกปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH จะเกิดการพองตัว และทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับมีมากขึ้น โดยตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% มีการพองตัวมากที่สุด ในขณะที่ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% มีการพองตัวใกล้เคียงกับตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพไม่มีการพองตัว

2. สภาพที่เหมาะสม

การศึกษาสภาพที่เหมาะสมของตัวดูดซับจากผักตบชวาชนิดต่างๆ ในการกำจัดสีไคเรทก์จากน้ำสีสังเคราะห์ ได้สภาวะและประสิทธิภาพการบำบัดดังต่อไปนี้

2.1 สีนํ้าเงิน

1) สภาพที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ คือ ค่า pH 3 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกววน 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 84.02 %

2) สภาพที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% คือ ค่า pH 3 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกววน 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 93.39 %

3) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 96.02 %

4) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 240 นาที และ เวลาในการสัมผัส 120 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 93.22 %

2.2 สีแดง

1) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ คือ ค่า pH 9 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 80.59 %

2) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 83.50 %

3) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 300 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 87.53 %

4) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 80.86 %

2.3 สีเหลือง

1) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ คือ ค่า pH 9 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 300 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 74.91 %

2) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 15% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 81.86 %

3) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 300 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 84.21 %

4) สภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 25% คือ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 300 นาที และเวลาในการสัมผัส 120 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด 79.95 %

3. ประสิทธิภาพการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

จากการศึกษาตัวดูดซับจากผักตบชวาในการบำบัดสีไคเรทจากน้ำสีสังเคราะห์ เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสม จึงนำไปใช้ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจริงจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ซึ่งตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ ตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วย NaOH 20% มีสภาวะดังนี้ ค่า pH 5 ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม เวลาในการปั่นกว 240 นาที และเวลาในการสัมผัส 90 นาที สามารถกำจัดสีได้ 76.80 % และลดค่า BOD ได้ 46.07%

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาประสิทธิภาพตัวดูดซับจากผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น รวมทั้งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิด
2. ควรศึกษาปริมาณเซลล์ulos ของตัวดูดซับแต่ละชนิดที่เหลือหลังการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี
3. ควรศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะ (surface area) ของตัวดูดซับด้วยวิธี BET

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2539. ประกาศ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (2539) เรื่อง มาตรฐาน ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือผู้ควบคุมและปฏิบัติงานระบบ บำบัดมลพิษโรงงาน. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ.
- กาญจนา ครองธรรมชาติ. 2547. การกำจัดสีข้อมกลมเอโซ โดยจุลินทรีย์แบบเมดที่ไม่ใช้อากาศ. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 20(2): 77-85.
- กาวี ศรีภูถกิจ. 2545. รายงานเรื่องหลักการข้อมสีสิ่งทอ. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิโรจน์. 2534. วิศวกรรมการจัดการน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- เข็มชัย เหมะจันทร์, ปราณี รัตนวลิตโรจน์ และรัตเกล้า ภูติวรรณ. 2541. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยเรื่อง การตรวจสอบทางสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมเคมีสิ่งทอ. 101 หน้า.
- จักริน ไหมศรี และธรรมบุญ เจริญสิทธิ์. 2543. การบำบัดตะกั่วไอออนจากน้ำทิ้งโรงงาน แบตเตอรี่โดยใช้ผงผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิระศักดิ์ แสงพุ่ม และคณะ. 2000. ผลของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวา สำหรับการดูดซับไอเบนซิน. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต 4(1): 48-54.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 186น.

นนทพงษ์ ภาณุคุณกิตติ. 2548. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานเยื่อและกระดาษโดยใช้กระบวนการโอโซนชั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประรัชกรณ์ สาริตคุณ. 2546. การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานสีเยื่อโดยใช้ไฮโดรไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปัญญา เศรษฐา. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยใช้แอคติเวตคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เปล่งศักดิ์ ภูจักร. 2546. การใช้เรซินผักตบชวาบำบัดสีจากน้ำเสียย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เพ็ญประภา สิบศิริ. 2539. การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยวิธีตกตะกอนทางเคมีด้วยเบนโทไนท์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหิดล.

เพชรพร เขาวกิจเจริญ และนวลจิรา วโรตตมะ. 2547. การกำจัดสีโครเมียมโทนาสีแดงชนิดโพลิอะโซด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย 20(2): 67-75

วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ. 2539. การใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.

วิไลวรรณ จันทรมณี. 2548. การบำบัดสีและโลหะหนักจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีระพงศ์ เลิศรัตนเทวี. 2548. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานสุราโดยกระบวนการโอโซนชั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีระศักดิ์ อุดมกิจฯ. 2546. อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วุทธินันท์ ศิริพงศ์. 2544. การบำบัดน้ำทิ้งจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศศิธร จินตนาสุนทรศิริ. 2549. การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยระบบโปรยกรองด้วยเห็ดนางรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริอุมา บำรุงวงษ์. 2541. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ด้วยวิธีการตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

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

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ.

สุจินต์ เอี่ยมปี, พ.อ. 2544. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อดิศักดิ์ อัญชลิตังกาศ. 2546. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายและการดูดซับด้วยขี้เถ้าแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อภิชาติ หิรัญจิตต์. 2538. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการร่วมของการดูดซับผิวและโคแอกกูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อารยา ประดับวงษ์ และคณะ. 2547 **ประสิทธิภาพการดูดซับสีจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยเปลือกหอยเชอรี่ และเปลือกหอยแครง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Aldin, A., E.R. Baumann and J.L. Cleeseby. 1979. The application of filtration theory to pilotplant design. **J.AWWA**. 71: 17-27.

Carmichael, J.B. and K.M. Strzepek. 1978. **Industrial Water Use and Treatment Practice**. n.p., New York.

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

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

G. Buschle-Diller,Au. 1999. **Preparatory Processes-Introducing a Close-Loop System**. Available Source: <http://www.eng.auburn>, March 25, 2006.

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

International Pectin Producer' s Association. 2001. **What is Pectin**. Available Source: <http://www.ippa.info>, March 25, 2006.

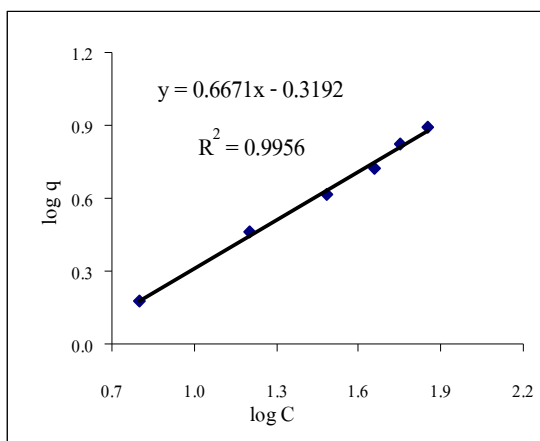
Imai, A.N. Iwami, Y. Inamori Matsushige and R. Sudo. 1993. Removal of refractory Organics and nitrogen from landfill leachate by microorganism-attach carbon Fluidized bed process. **Wat. Res.** 27(1): 143-145.

Jaksirinont and Nongnuch. 1972. **Development of series filtration water treatment Method for small communities of Asia.** Master 's degree thesis. Asian Intitute Technology.

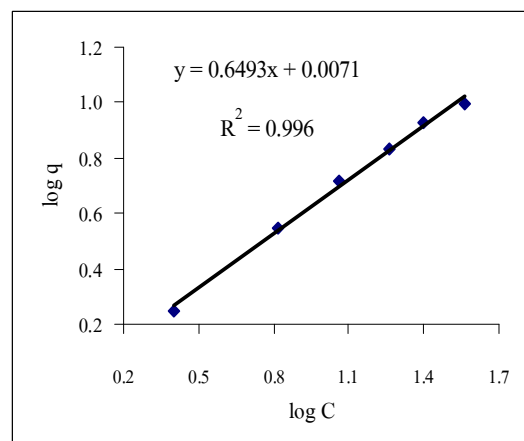
Lourenco, N.D., J.M. Novais. and H.M. Pinheiro 2000. Reactive textile dyes colour removal in a sequencing batch reactor. **Water Science and Technol.** 42(5-6): 321-328.

Metcalf and Eddy. 1991. **Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse.** 3rd ed., McGraw-Hill, Inc., Singapore.

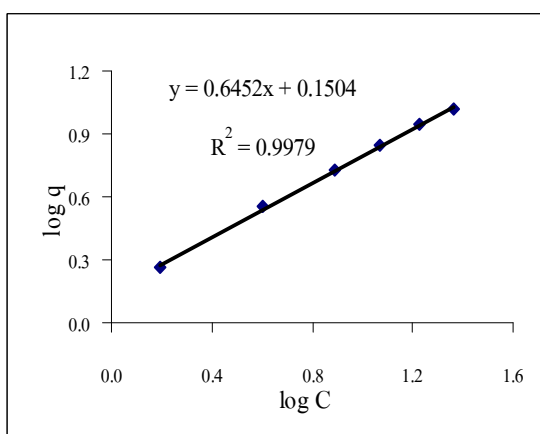
ภาคผนวก



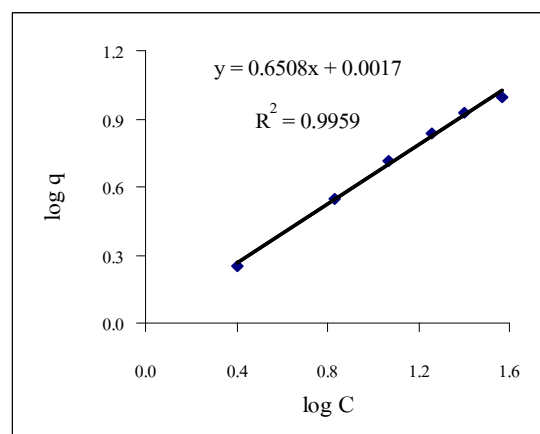
ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ



ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH15%



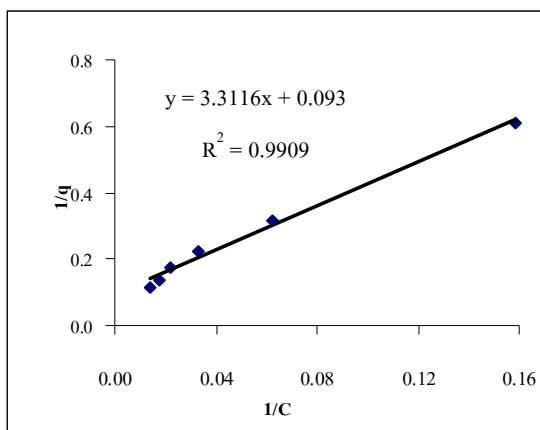
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH20%



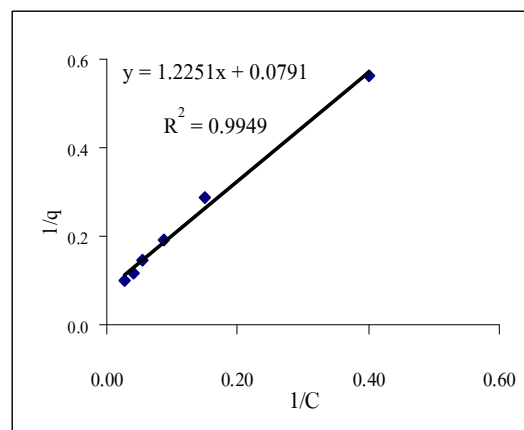
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH25%

ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	$\log q = \log K + 1/n \log C$	K	1/n
ไม่ปรับสภาพ	$y = 0.6671x - 0.3192$	0.9956	$\log q = -0.3192 + 0.6671 \log C$	0.4795	1.4990
NaOH 15%	$y = 0.6493x + 0.0017$	0.9960	$\log q = 0.0017 + 0.6493 \log C$	1.0039	1.5401
NaOH 20%	$y = 0.6452x + 0.1504$	0.9979	$\log q = 0.1504 + 0.6452 \log C$	1.4138	1.5499
NaOH 25%	$y = 0.6508x - 0.0017$	0.9959	$\log q = -0.0017 + 0.6508 \log C$	0.9961	1.5366

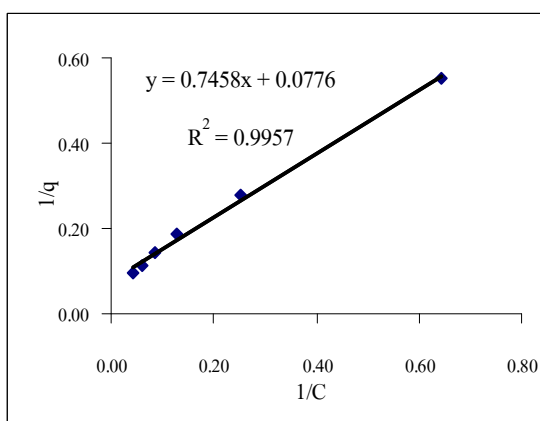
ภาพผนวกที่ 1 การวิเคราะห์ Freundlich Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาในการดูดซับสีน้ำเงิน



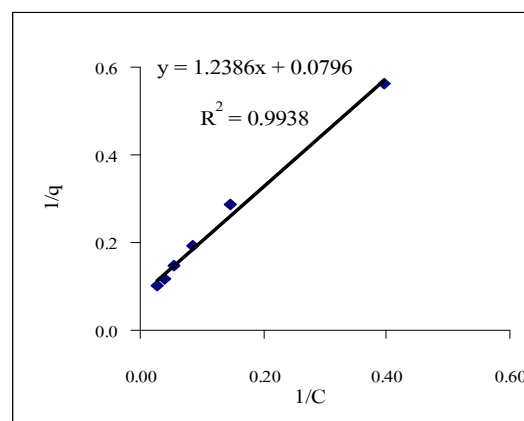
ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ



ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH15%



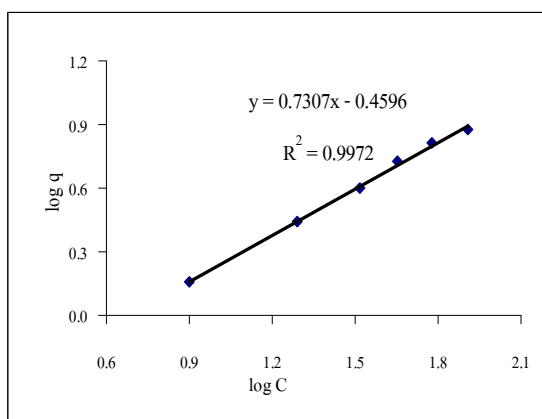
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH20%



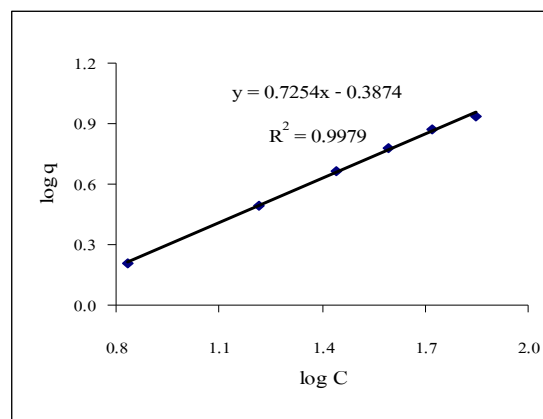
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH25%

ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	$\log q = \log K + 1/n \log C$	K	q_m
ไม่ปรับสภาพ	$y = 3.3116x + 0.093$	0.9909	$\log q = 0.093 + 3.3116 \log C$	3.2470	10.7527
NaOH 15%	$y = 1.2251x + 0.0791$	0.9949	$\log q = 0.0791 + 1.2251 \log C$	10.3193	12.6422
NaOH 20%	$y = 0.7458x + 0.0776$	0.9957	$\log q = 0.0776 + 0.7458 \log C$	17.2789	12.8866
NaOH 25%	$y = 1.2386x + 0.0796$	0.9938	$\log q = 0.0796 + 1.2386 \log C$	10.1428	12.5628

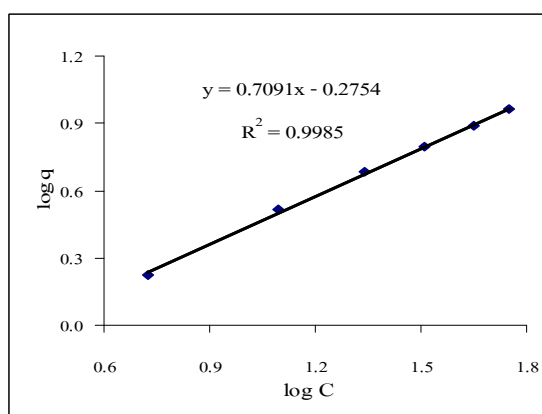
ภาคผนวกที่ 2 การวิเคราะห์ Langmuir Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก
ผักตบชวาในการดูดซับสีน้ำเงิน



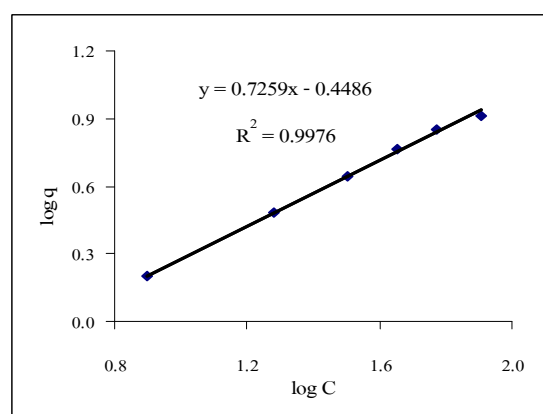
ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ



ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH15%



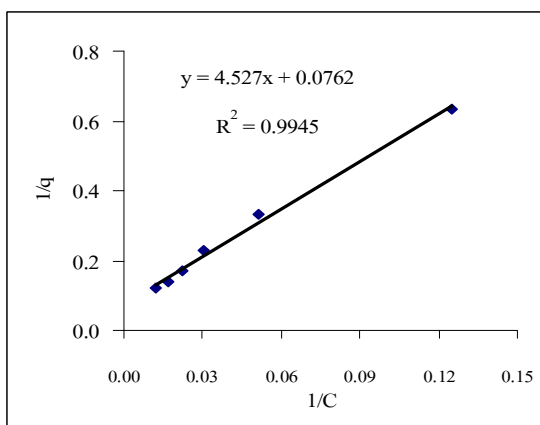
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH20%



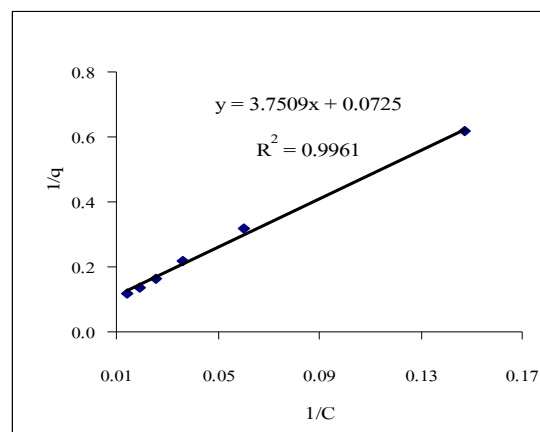
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH25%

ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	$\log q = \log K + 1/n \log C$	K	n
ไม่ปรับสภาพ	$y = 0.7307x - 0.4596$	0.9972	$\log q = -0.4596 + 0.7307 \log C$	0.3471	1.3686
NaOH 15%	$y = 0.7254x - 0.3874$	0.9979	$\log q = -0.3874 + 0.7254 \log C$	0.4098	1.3785
NaOH 20%	$y = 0.7091x - 0.2754$	0.9985	$\log q = -0.2754 + 0.7091 \log C$	0.5304	1.4102
NaOH 25%	$y = 0.7259x - 0.4486$	0.9976	$\log q = -0.4486 + 0.7259 \log C$	0.3560	1.3776

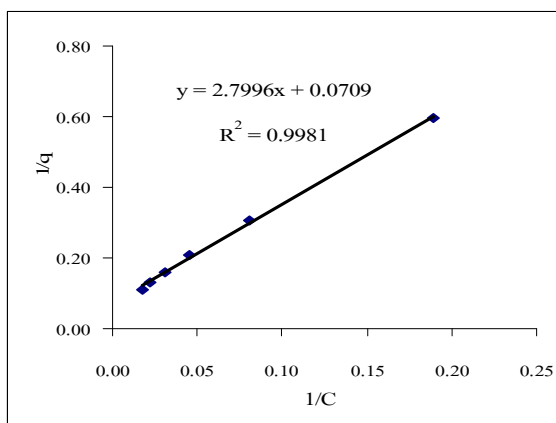
ภาพผนวกที่ 3 การวิเคราะห์ Freundlich Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก
ผักตบชวาในการดูดซับสีแดง



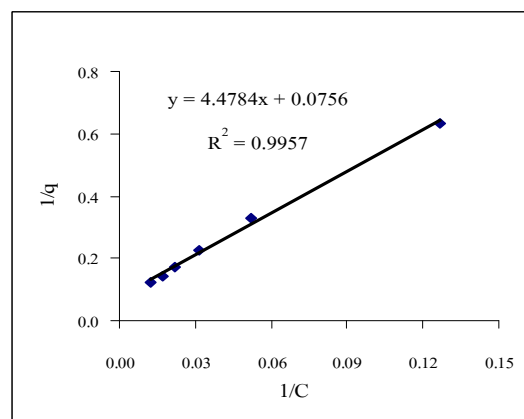
ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ



ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH15%



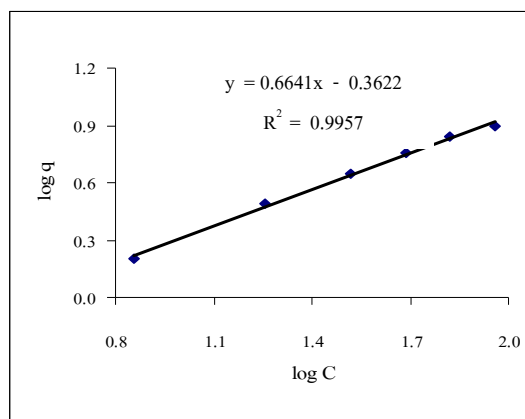
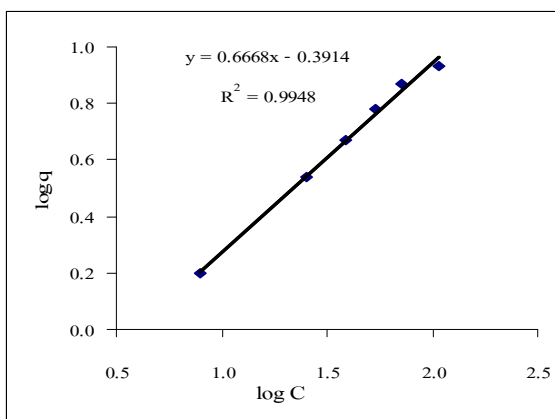
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH20%



ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH25%

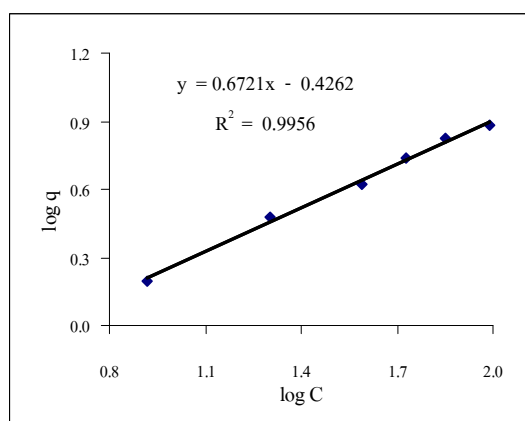
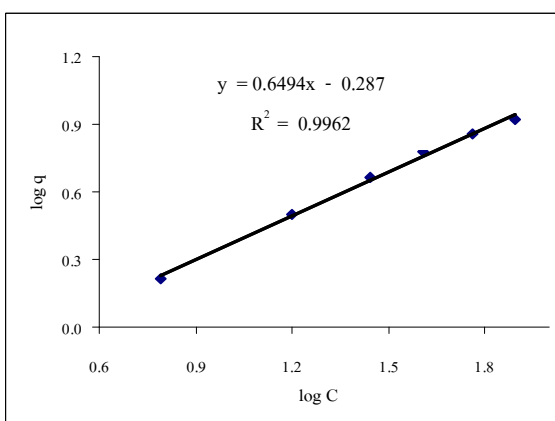
ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	$\log q = \log K + 1/n \log C$	K	q_m
ไม่ปรับสภาพ	$y = 4.5270x + 0.0762$	0.9945	$\log q = 0.0762 + 4.5270 \log C$	2.8989	13.1234
NaOH 15%	$y = 3.7509x + 0.0725$	0.9961	$\log q = 0.0725 + 3.7509 \log C$	3.6773	13.7931
NaOH 20%	$y = 2.7996x + 0.0709$	0.9981	$\log q = 0.0709 + 2.7996 \log C$	5.0380	14.1044
NaOH 25%	$y = 4.4784x + 0.0756$	0.9957	$\log q = 0.0756 + 4.4784 \log C$	2.9539	13.2275

ภาพผนวกที่ 4 การวิเคราะห์ Langmuir Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก
ผักตบชวาในการดูดซับสีแดง



ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ

ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH15%

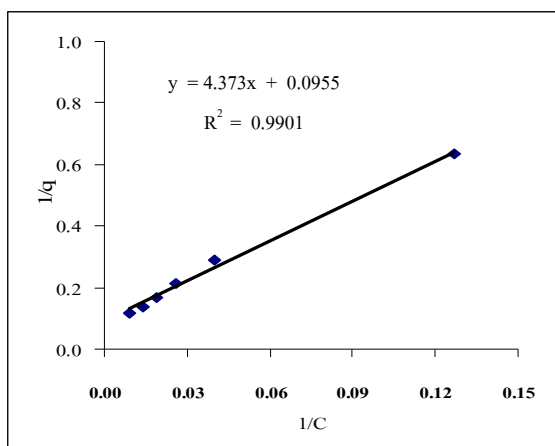


ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH20%

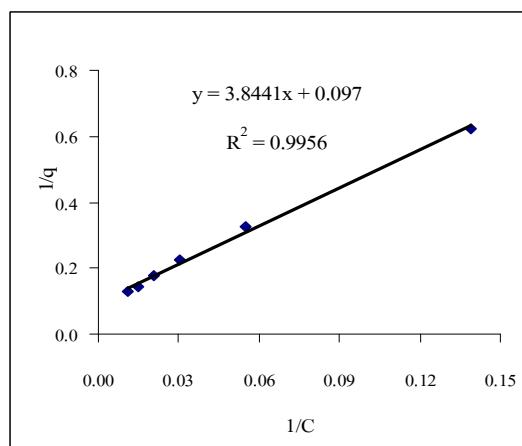
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH25%

ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	$\log q = \log K + 1/n \log C$	K	n
ไม่ปรับสภาพ	$y = 0.6722x - 0.4144$	0.9940	$\log q = -0.4144 + 0.6722 \log C$	0.3851	1.4877
NaOH 15%	$y = 0.6641x - 0.3622$	0.9957	$\log q = -0.3622 + 0.6641 \log C$	0.4343	1.5058
NaOH 20%	$y = 0.6494x - 0.287$	0.9962	$\log q = -0.287 + 0.6494 \log C$	0.5164	1.5399
NaOH 25%	$y = 0.6721x - 0.4262$	0.9956	$\log q = -0.4262 + 0.6721 \log C$	0.3748	1.4879

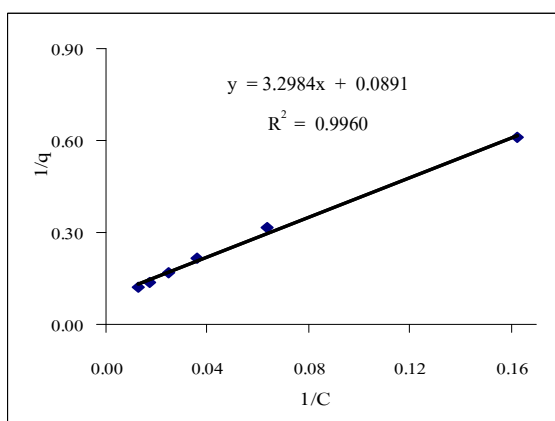
ภาพผนวกที่ 5 การวิเคราะห์ Freundlich Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาในการดูดซับสีเหลือง



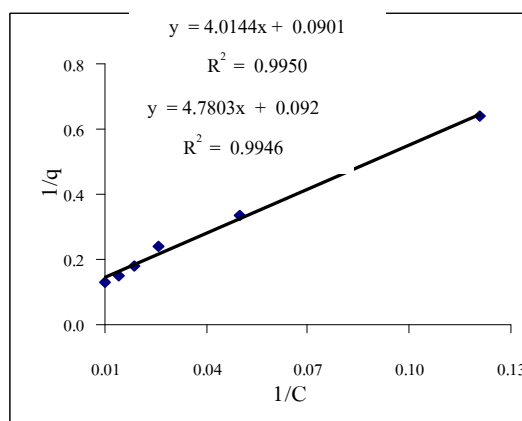
ตัวดูดซับไม่ปรับสภาพ



ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH15%



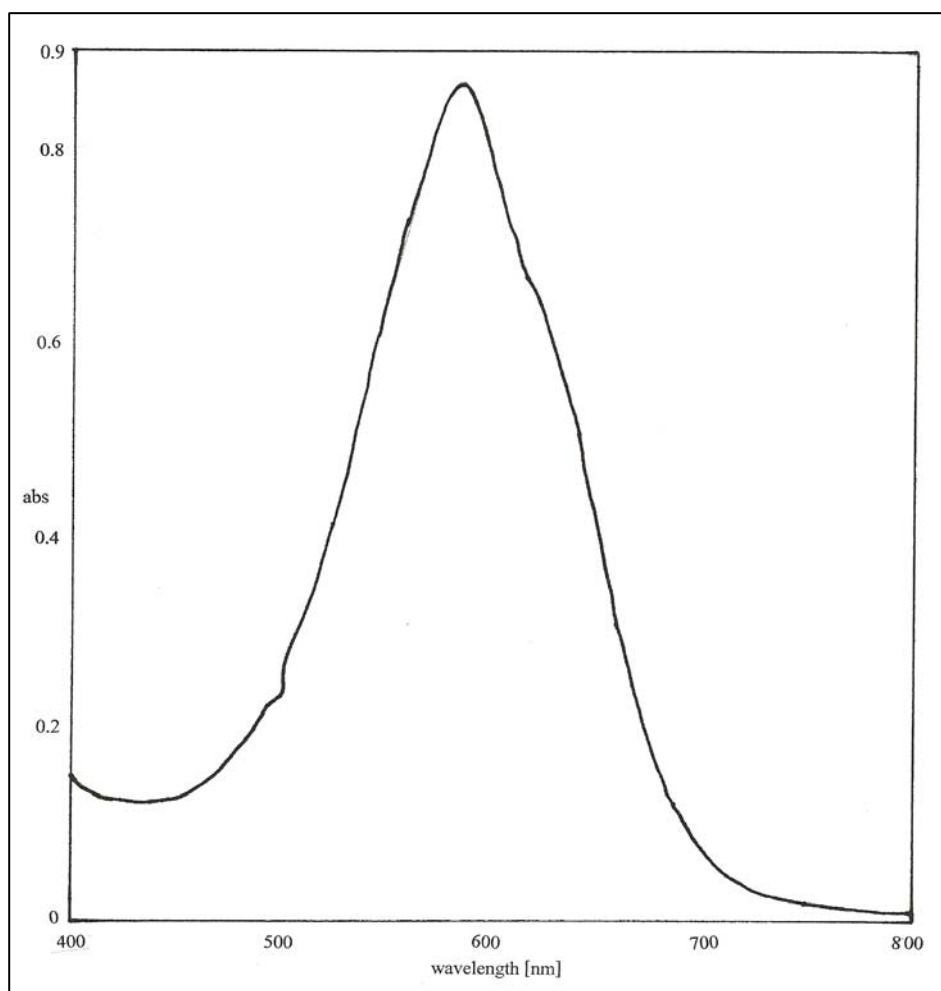
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH20%



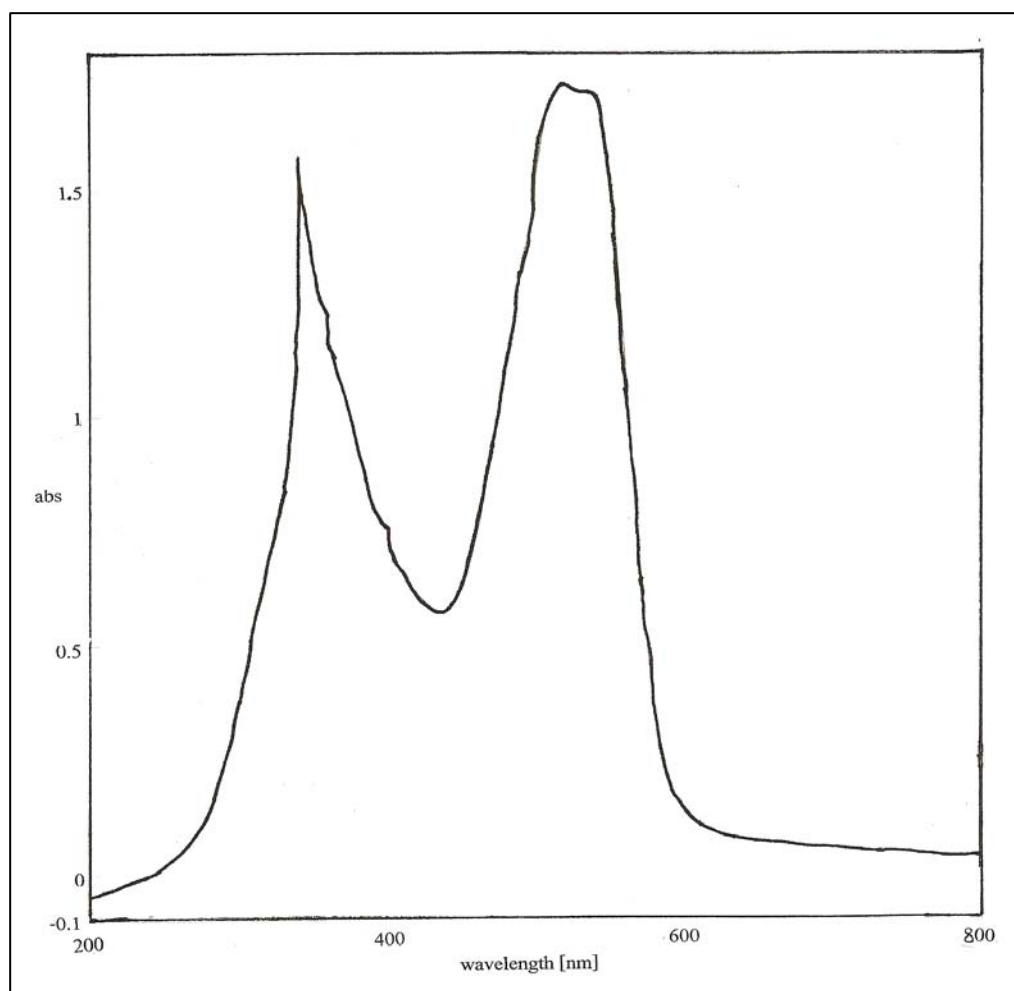
ตัวดูดซับปรับด้วย NaOH25%

ตัวดูดซับ	สมการ	R^2	$\log q = \log K + 1/n \log C$	K	q_m
ไม่ปรับสภาพ	$y = 4.373x + 0.0955$	0.9901	$\log q = 0.0955 + 4.373 \log C$	2.3945	10.4712
NaOH 15%	$y = 4.0144x + 0.0901$	0.9950	$\log q = 0.0901 + 4.0144 \log C$	2.7647	11.0988
NaOH 20%	$y = 3.2984x + 0.0891$	0.9960	$\log q = 0.0891 + 3.2984 \log C$	3.4027	11.2233
NaOH 25%	$y = 4.7803x + 0.092$	0.9946	$\log q = 0.092 + 4.7803 \log C$	2.2738	10.8696

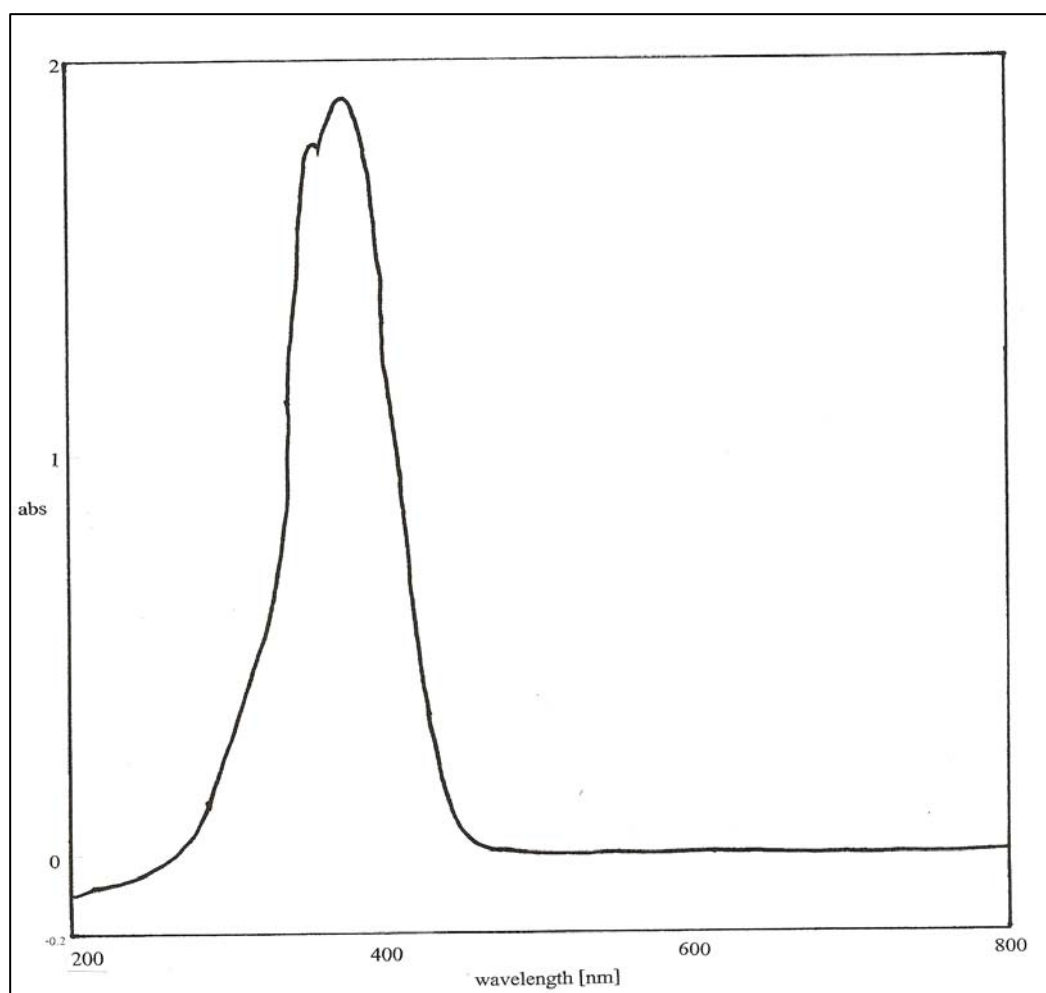
ภาพผนวกที่ 6 การวิเคราะห์ Langmuir Isotherm กับความเข้มข้นของสีโดยใช้ตัวดูดซับจาก
ผักตบชวาในการดูดซับสีเหลือง



ภาพผนวกที่ 7 กราฟวิเคราะห์ความยาวคลื่นสูงสุดของสีไคเรทโทนสีน้ำเงินโดยเครื่อง
ยูวี- วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



ภาพผนวกที่ 8 กราฟวิเคราะห์ความยาวคลื่นสูงสุดของสีโคเรกต์โทนสีแดงโดยเครื่อง
ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



ภาพผนวกที่ 9 กราฟวิเคราะห์ความยาวคลื่นสูงสุดของสีไคเรกท์โทนสีเหลืองโดยเครื่อง
ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวจินตนา จุลอุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	12 กรกฎาคม 2521
สถานที่เกิด	อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2539 จบชั้นมัธยมศึกษา จากโรงเรียนราชินีบูรณะ จ.นครปฐม พ.ศ. 2544 จบปริญญาตรี (วท.บ.) ชีววิทยาประยุกต์ จาก สถาบันราชภัฏนครปฐม จ.นครปฐม พ.ศ. 2550 จบปริญญาโท (วท.ม.) วิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครูผู้สอนวิทยาศาสตร์
ประวัติการทำงาน	