

การกำจัดสี่เหลี่ยมโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ

นางสาวชาริณี ม่วงคลองใหม่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF BASIC DYE USING MODIFIED OIL-PALM FIBER

Miss Charinee Muangklongmai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดสีเบสิกโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ

โดย

นางสาวชาริณี ม่วงคลองใหม่


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

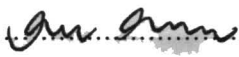
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

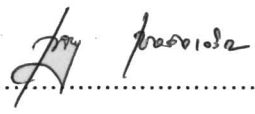
รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

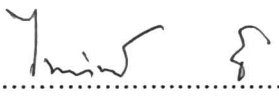
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีณย์ เตชะเสน)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพทิพย์ ธีรเวชญาณ)

ชาวิณี ม่วงคลองใหม่ : การกำจัดสีเบสิกโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ.  
(REMOVAL OF BASIC DYE USING MODIFIED OIL-PALM FIBER) อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 114 หน้า.

การวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการทดลองแบบที่ละเท โดยใช้เครื่องเขย้าที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 120 นาที ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีย้อมเบสิก 2 ชนิด คือ มาลาโคท์กรีน และเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมและลักษณะสมบัติของเส้นใยปาล์มทางกายภาพและทางเคมี จากผลการศึกษาพบว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด โดยกำจัดสีมาลาโคท์กรีนและเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 99.50 และ 98.20 ตามลำดับ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ช่วงพีเอช 6.0-9.0 ระยะเวลาการสัมผัส 120 นาที ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.4 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการเขย้า 160 รอบต่อนาที ปัจจัยที่ทำการศึกษาส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเพิ่มขึ้น และผลของพีเอชมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ และระยะเวลาการสัมผัส จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และความสามารถในการดูดซับมาลาโคท์กรีนและเมทิลีนบลู เท่ากับ 63.11 และ 67.83 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ตามลำดับ ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ พบว่า พื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มและขนาดรูพรุนที่เกิดจากการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยวิธีต่างๆ มีความใกล้เคียงจากเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ แต่จากการศึกษาพื้นผิว เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีรูพรุนจำนวนมากและมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ และจากการวิเคราะห์โครงสร้าง พบว่า หมู่ฟังก์ชันของ หมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอนิล อัลคิล อัลคีน และซัลโฟนิกเอซิด ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมอย่างมาก

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... ชานัน ม่วงคลองใหม่.....  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา..... 2551.....

# # 5070550721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : OIL-PALM FIBER / DYE REMOVAL / BASIC DYE /

CHARINEE MUANGKLONGMAI : REMOVAL OF BASIC DYE USING  
MODIFIED OIL-PALM FIBER. ADVISOR : ASSOC.PROF. PETCHPORN  
CHAWAKITCHAROEN, Ph.D., 114 pp.

This research investigated the comparison of basic dye removal efficiency by untreated oil-palm fiber, modified oil-palm fiber with sulfuric acid, modified oil-palm fiber with formaldehyde and modified oil-palm fiber with hydrogen peroxide. The experiment was carried out using batch test by using orbital shaker at 160 rpm for 120 minutes. The synthesis wastewater was prepared at the concentration 250 mg/l of basic dye (malachite green and methylene blue). The removal efficiency, optimum condition and the physical and chemical characteristics of oil-palm fibers were determined. The results indicated that the highest dye removal efficiency was modified oil-palm fiber with sulfuric acid. The removal efficiency for malachite green and methylene blue was at 99.50% and 98.20%, respectively. The optimum condition for maximum uptake was found at pH in the range of 6.0-9.0, contact time was 120 minutes at the initial concentration of 250 mg/l and adsorbent dosage at 0.4 g/100 ml with maintained agitation at 160 rpm. This study concluded that the optimum condition have effected to the efficiency of dye removal. As well as, the optimum pH was correlated with the initial malachite green concentration, adsorbent dosage and the contact time. From adsorption isotherm test, the results can be explained by Langmuir isotherm. The maximum adsorption capacity of malachite green and methylene blue was equivalent to 63.11 and 67.83 mg/g adsorbent, respectively. The physical characteristics of oil-palm fiber indicate that the BET surface area and pore volume of modified oil-palm fiber were not differ from untreated oil-palm fiber. Moreover, the surfaces of modified oil-palm fiber with sulfuric acid change from fiber to grains with cavities. The functional group results show adsorption bands of hydroxyl carbonyl alkyl alkenes and sulfonic acids groups that are the most effect for efficiency of adsorption.

Department : Environmental Engineering

Student's Signature Charinee Muangklongmai

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature Petchporn C

Academic Year : 2008

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ดังนั้นจึงขอแสดงความขอบคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้ ดังรายนามต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือดูแล ให้คำชี้แนะ และแก้ไขในสิ่งบกพร่องมาโดยตลอด อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ นับตั้งแต่การให้แนวคิดในการทำงานวิจัย จนกระทั่งจบโครงการ อันทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีถนัย เตชะเสน และ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพฑิพย์ ธีรเวชญาณ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขงานวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาคีวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาคีวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และช่วยอำนวยความสะดวกให้เสมอมา

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการขยะ และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาคีวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือชี้แนะ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. บุญรอด บิณฑสันต์ ที่ได้มอบทุนอุดหนุนการศึกษาของมูลนิธิธิดาเก๋จู่ฟาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อใช้เป็นค่าการศึกษาเล่าเรียน

ขอบคุณ พี่น้อง และพี่ๆ ทุกๆ คน ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้กำลังใจตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน.....	4
2.2 เส้นใยธรรมชาติ.....	10
2.3 สีย้อม.....	13
2.4 อุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	19
2.5 การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม.....	21
2.6 การคัดเลือกและรายละเอียดสีย้อมที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	25
2.7 การดูดซับ.....	29
2.8 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 แผนการวิจัย.....	49
3.2 การดำเนินการวิจัย.....	51
3.3 สรุปแผนการดำเนินการวิจัย.....	58

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	59
4.1 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของเส้นใยปาล์ม.....	59
4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับจากเส้นใยปาล์ม.....	61
4.3 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธี ต่างๆ ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์.....	70
4.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์....	72
4.5 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ.....	77
4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพกับงานวิจัยอื่นๆ..	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกากปาล์มน้ำมัน.....	7
ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนขององค์ประกอบในเส้นใยปาล์ม.....	10
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยบางประเภทกับประเภท ของสีย้อม.....	17
ตารางที่ 2.4 ผลของแพกเตอร์การแยกตัวจากลักษณะของรูปไอโซเทอม.....	39
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย.....	50
ตารางที่ 3.2 สรุปพารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวิเคราะห์.....	53
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบต่างๆ ของเส้นใยปาล์มจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม.....	60
ตารางที่ 4.2 ปริมาณเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรง.....	60
ตารางที่ 4.3 ความถ่วงจำเพาะและการบวมตัวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ.	63
ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ.....	64
ตารางที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชันที่พบในเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ.....	67
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยปาล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพ.....	71
ตารางที่ 4.7 ผลของการทดลองหาไอโซเทอมของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรด ซัลฟิวริก.....	83
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (b) จากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	83
ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของเส้นใยปาล์มที่ปรับ สภาพด้วยวิธีต่างๆ และวัสดุธรรมชาติอื่นๆ.....	84
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักของเส้นใยปาล์มที่หายไปหลังการตากแดด.....	94
ตารางที่ ก.2 ปริมาณเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรงเบอร์ต่างๆ.....	94
ตารางที่ ข.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพทั้ง 4 วิธี.....	96
ตารางที่ ข.2 การบวมตัวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ.....	96
ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมเบสิก.....	104
ตารางที่ ค.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมเบสิก.....	105
ตารางที่ ค.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมเบสิก.....	106
ตารางที่ ค.4 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมเบสิก.....	107

ตารางที่ ง. 1 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลา- ไคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้น.....	109
ตารางที่ ง. 2 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลา- ไคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ.....	109
ตารางที่ ง. 3 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีเมทิ- ลีนบลูโดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้น.....	110
ตารางที่ ง. 4 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีเมทิ- ลีนบลูโดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ.....	110

## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กากปาล์มน้ำมัน.....	7
รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	11
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส.....	12
รูปที่ 2.4 ก) สูตรโครงสร้างของหน่วยซ้ำกันของลิกนิน.....	12
ข) ลิกนินไม้เนื้ออ่อน.....	12
รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้.....	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมาลาไคท์กรีน.....	26
รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู.....	28
รูปที่ 2.8 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับ.....	36
รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท.....	37
รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท แบบเป็นเส้นตรง.....	37
รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์.....	38
รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์แบบเป็นเส้นตรง.....	38
รูปที่ 2.13 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช.....	40
รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจาก รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช.....	40
รูปที่ 3.1 สรุปรูปแผนการดำเนินการวิจัย.....	58
รูปที่ 4.1 เส้นใยปาล์มที่นำมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	59
รูปที่ 4.2 ปริมาณของเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรง.....	61
รูปที่ 4.3 วัสดุดูดซับที่ได้จากการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยวิธีต่างๆ.....	62
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.5 ภาคตัดขวางของเส้นใยปาล์ม.....	66
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ.....	68
รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	68
รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์.....	69
รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	69
รูปที่ 4.10 ค่าประจุบนพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	70

รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ.....	72
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกที่พีเอชต่างๆ โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	73
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	74
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	75
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	76
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้น.....	78
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ.....	79
รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้น.....	80
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ.....	81
รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีนและเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ.....	82
รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีนและเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้น.....	82
รูปที่ ๓.1 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	97
รูปที่ ๓.2 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	98
รูปที่ ๓.3 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์.....	99
รูปที่ ๓.4 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	100

รูปที่ ข.5 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ.....	101
รูปที่ ข.6 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	101
รูปที่ ข.7 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์.....	102
รูปที่ ข.8 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	102
รูปที่ ๑.1 ความยาวคลื่นแสง ( $\lambda_{max}$ ) ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีมาลาโคท์ กรีน.....	112
รูปที่ ๑.2 ความยาวคลื่นแสง ( $\lambda_{max}$ ) ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีเมทิลีนบลู....	112
รูปที่ ๑.3 กราฟมาตรฐานของสีมาลาโคท์กรีน.....	113
รูปที่ ๑.4 กราฟมาตรฐานสีเมทิลีนบลู.....	113

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นนำในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็นสีย้อม กรด ด่าง สารปรับปรุงคุณภาพต่างๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว เป็นต้น และสิ่งที่ไม่ได้ก็คือน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมที่ต้องใช้ในปริมาณที่มาก เพื่อให้ได้ผ้าหรือเส้นด้ายที่มีสีสวยงดงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งสีย้อมเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาด้านมลพิษทางน้ำและคุกคามต่อสิ่งแวดล้อม โดยที่น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจะมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมัน และของเสียไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ ปนเปื้อนออกมา นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง มีสภาพเป็นด่าง มีกลิ่นที่แรงและมีสีที่นํารังเกียจ เมื่อนํ้าเสียที่มีสีถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะหรือสิ่งแวดล้อม จะทำลายความสวยงามของธรรมชาติและทำให้สมดุลทางธรรมชาติเสียไปอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า การที่เกิดการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำทิ้ง สีย้อมที่พบในน้ำเสีย ซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์จะไปบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำ ส่งผลกระทบให้พืชที่อยู่ในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในน้ำลดลง ซึ่งมีผลให้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อยู่ในน้ำอาจตายได้ ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ ให้มากขึ้นในการกำจัดสีแต่ละชนิดออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งรับน้ำและแม่น้ำลำคลองธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการควบคุมและป้องกันการปล่อยน้ำเสีย ที่ไม่ได้รับการบำบัดหรือควบคุมออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะควรจะต้องมีกระบวนการกำจัดหรือบำบัดน้ำก่อนเพื่อลดปริมาณสีในน้ำทิ้ง ปัจจุบันได้มีการกำหนดข้อบังคับเกี่ยวกับการปล่อยน้ำเสียซึ่งเป็นที่ยอมรับในหลายๆ ประเทศ เช่น การดูจากปริมาณที่สิ่งมีชีวิตรับได้ สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้ง ระดับของสีในน้ำทิ้ง เป็นต้น

สีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด และแต่ละชนิดยากต่อการย่อยสลายโดยธรรมชาติ ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีทั้งกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำบัด ตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัด เป็นต้น สำหรับการดูดซับโดยใช้แอกติเวทเต็ดคาร์บอนเป็นวิธีที่รู้จักกันดีในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย ซึ่งมีราคาแพง และมีข้อจำกัดในการใช้บำบัดน้ำเสีย เพราะฉะนั้น ในปัจจุบันจึงมีการหาตัวดูดซับราคาถูกมาใช้เป็นตัวดูดซับกันอย่างกว้างขวาง ตัวดูดซับที่นำมาใช้ ยกตัวอย่างเช่น ของเสีย

จากการหมักปุ๋ย เขม่า ยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว ขี้เลื่อย เลน ถ่านหิน ชานอ้อย แอ้วล่อย ขนแกะ เปลือกอัลมอนต์ ใบตะบองเพชร ถ่าน เศษไม้จากต้นเมเปิล และถ่านจากกะลามะพร้าว เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้สนใจนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม ซึ่งอุตสาหกรรมที่สนใจ คือ อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โดยที่ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญและมีปลูกกันมากในเขตภาคใต้ของประเทศไทย และมีการนำกากปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เหลือหลังจากสกัดเอาน้ำมันออกไปแล้วมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ กากปาล์มน้ำมันที่ผลิตได้โดยทั่วไปจะมีหลายชนิด และมีคุณภาพแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการสกัดน้ำมัน ในส่วนของกากปาล์มน้ำมันที่เป็นส่วนที่เหลือจากการหีบน้ำมันผลปาล์มทั้งผล ซึ่งกากชนิดนี้จะมีทั้งส่วนของเปลือก กะลา และเนื้อในเมล็ดปาล์มปนกันอยู่ (พานิช ทินนิมิตร, 2527 และจารุรัตน์ เศรษฐภักดี, 2528) กากปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันชนิดที่หีบน้ำมันปาล์มทั้งผล จากการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีโดยกลุ่มวิเคราะห์อาหารสัตว์ กองอาหารสัตว์ พบว่า มีโปรตีนร้อยละ 5.31 ไขมันร้อยละ 12.71 เยื่อใยร้อยละ 36.44 และความชื้นร้อยละ 8.5 โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังไม่สามารถแยกกะลาออกจากเมล็ดปาล์มได้หมด ทำให้กากเมล็ดปาล์มที่ได้มีโปรตีนต่ำและมีส่วนที่เป็นเส้นใยอยู่ในปริมาณสูง (จารุรัตน์ เศรษฐภักดี, 2528)

จะเห็นได้ว่าการกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม มีปริมาณของเสียที่เป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งเกิดขึ้นมากมาย อันประกอบด้วย ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่มืออยู่อย่างมากมาย ซึ่งพบว่าในส่วนที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยจะมีอยู่ในปริมาณที่มาก โดยในเบื้องต้นได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเอาเส้นใยปาล์มมาใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น การนำเส้นใยปาล์มมาทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ การนำมาปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงสนใจศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการใช้เส้นใยปาล์มที่เป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์ม นำมาปรับสภาพด้วยสารเคมีเพื่อให้ความเหมาะสมและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และยังเป็น การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่อีกทางหนึ่งเพื่อลดปริมาณของเศษวัสดุเหลือทิ้งให้น้อยลง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีเบสิกในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เส้นใยปาล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ คือ เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย

กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 1 และ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการปริญญาโท ห้องปฏิบัติการ ชยะ และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยขอบเขตของการวิจัยมีดังนี้

1.3.1 ทำการทดลองแบบทีละเท (batch test)

1.3.2 เส้นใยปาล์ม (Palm fiber) จากโรงงานบีบน้ำมันปาล์ม

1.3.3 นำเส้นใยปาล์มมาปรับสภาพ 4 วิธี คือ เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใย ปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ฟอร์มัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 1 และไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50

1.3.4 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การบวม น้ำ พื้นที่ผิว ลักษณะพื้นผิว และลักษณะโครงสร้าง

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสี 2 ชนิด คือ สีมาลาไคท์กรีน (malachite green) และสีเมทิลีนบลู (methylene blue) โดยเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพทั้ง 4 วิธี

1.3.6 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความ เข้มข้นสีเริ่มต้น และปริมาณตัวดูดซับ

1.3.7 วิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมเบสิกของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ โดยใช้ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ในการวิเคราะห์

1.3.8 การวัดค่าสีโดยใช้เครื่องยูวีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2.3.1 เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มให้สามารถดูดซับสีย้อมออกจากน้ำ เสียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยการใช้สารเคมีในการปรับสภาพ

2.3.2 เป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสีออกจากน้ำเสียที่มาจากโรงงานฟอกย้อม

2.3.3 เป็นการนำของเสียประเภทเส้นใยปาล์มจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาใช้ให้เกิด ประโยชน์อีกทางหนึ่ง



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

##### 2.1.1 ความสำคัญของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันสูง ทำให้มีต้นทุนการผลิตและราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายทั้งในสินค้าอุปโภคและบริโภค ส่วนแบ่งการผลิตน้ำมันปาล์มต่อน้ำมันพืชของโลกจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วแต่ภายใต้ข้อตกลงการค้าระหว่างประเทศที่ทุกประเทศพยายามที่จะให้มีการเปิดเสรีการค้าระหว่างประเทศซึ่งกันและกัน ส่งผลให้น้ำมันปาล์มเป็นสินค้าหนึ่งไทยมีความเสียเปรียบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชตระกูลปาล์ม มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด (640-800 กิโลกรัมน้ำมันต่อพื้นที่ปลูก 1 ไร่) และเป็นพืชน้ำมันที่มีการผลิตทั่วโลกเป็นอันดับสอง คือ ประมาณร้อยละ 25 หรือคิดเป็นปริมาณผลิต 23.355 ล้านตันในปี พ.ศ. 2544 รองจากน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 28 โดยมีประเทศมาเลเซียเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลก (ร้อยละ 52) อินโดนีเซียเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 32) ส่วนประเทศไทยมีอันดับการผลิตอยู่อันดับที่ 4 ของโลก คิดเป็นสัดส่วนการผลิตเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น

##### 2.1.2 อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันในประเทศไทย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง เหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศไทย โดยบริเวณพื้นที่ที่ปลูกมากที่สุด คือ จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูล และตรัง โดยจังหวัดกระบี่ปลูกมากที่สุดจำนวน 537,637 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39.40 รองลงมาได้แก่จังหวัดสุราษฎร์ธานี 405,213 ไร่ และจังหวัดชุมพร 216,798 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29.70 และ 15.89 ของพื้นที่ปลูกทั่วประเทศ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากผลตอบแทนการปลูกปาล์มน้ำมันดีกว่าการปลูกพืชชนิดอื่น เช่น ยางพารา และการทำนาข้าว จึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูก ประกอบกับมีโครงการเปลี่ยนพื้นที่ปลูกปาล์มทั่วประเทศ คาดว่าปริมาณความต้องการน้ำมันปาล์มภายในเพิ่มขึ้นมาก เพราะราคาน้ำมันปาล์มในตลาดโลก

มีแนวโน้มที่สูงขึ้น (กรมวิชาการเกษตร, 2551) โดยที่น้ำมันปาล์มจัดเป็นน้ำมันพืชที่มีการบริโภคสูงสุดของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2549 มีการผลิตและบริโภคน้ำมันปาล์มสูงถึง 841,657 ตันต่อปี และมีแนวโน้มในการผลิตสูงขึ้น โดยปัจจุบันพบว่า มีโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์อยู่ทั้งหมด 11 ราย มีกำลังการผลิตรวม 56,447 ตันต่อเดือน

### 2.1.3 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

ในการผลิตน้ำมันปาล์มสามารถแบ่งลักษณะของกระบวนการผลิตได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ กระบวนการผลิตแบบหีบเปียก หรือสกัดแยกซึ่งสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ไอน้ำและความร้อน น้ำมันจากเนื้อเยื่อผลปาล์มกับน้ำมันจากเมล็ดในจะมีการสกัดแยกกัน ซึ่งการสกัดน้ำมันปาล์มประเภทนี้จะเกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีของเสียที่อยู่ในรูปเส้นใย กะลา ทะลายปาล์มเปล่า และกากตะกอน ส่วนกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มอีกประเภท เรียกว่า กระบวนการผลิตแบบหีบแห้ง หรือสกัดรวม ซึ่งเป็นการสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้น้ำปริมาณน้อย โดยจะสกัดน้ำมันจากผลปาล์ม และน้ำมันจากเมล็ดใน ซึ่งน้ำมันที่ได้จะมีราคาต่ำกว่าน้ำมันบริสุทธิ์ที่ผลิตจากเนื้อเยื่อผลปาล์มเพียงอย่างเดียว ส่วนของเหลือจากกระบวนการผลิตจะอยู่ในรูปกากปาล์มซึ่งใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มที่มีกระบวนการผลิตแบบหีบเปียกจะมีปริมาณการผลิตมากกว่าร้อยละ 80 ของน้ำมันปาล์มดิบทั้งหมด โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้ (สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน, 2550)

#### 1) การรับผลปาล์มและซังน้ำหนัก

ผลปาล์มที่ทางโรงงานรับซื้อส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปทะลายปาล์มสดซึ่งจะต้องมีการซังน้ำหนักและตรวจวัดคุณภาพผลปาล์มสด จากนั้นก็จัดเก็บบนลานเพื่อรอสกัดน้ำมันต่อไป

#### 2) การอบและนึ่งผลปาล์ม

ผลปาล์มสดที่ผ่านการซังและส่งขึ้นลานเทปาล์มจะถูกบรรจุลงในกระบะบรรจุปาล์ม และเคลื่อนผ่านรางเข้าสู่หม้ออบนึ่งไอน้ำที่ความดัน 3 บาร์ ใช้เวลาประมาณ 70-90 นาที โดยในขั้นตอนนี้จะทำให้ผลปาล์มนุ่ม ง่ายต่อการหีบ และเป็นการยับยั้งปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่ทำให้เกิดการดัดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

#### 3) การนวดแยกทะลายจากผลปาล์ม

ผลปาล์มที่อบนึ่งสุกแล้วจะถูกส่งเข้าหม้อกวน ซึ่งในระหว่างการกวนจะมีการเพิ่มความร้อนด้วยไอน้ำเพื่อแยกส่วนที่เป็นน้ำมันหรือเนื้อเยื่อผลปาล์มออกจากส่วนที่เป็นเมล็ดใน สะดวกต่อการหีบหรือบีบน้ำมันออกในขั้นตอนต่อไป

#### 4) การหีบหรือบีบน้ำมันจากผลปาล์ม

ผลปาล์มที่ผ่านการทวนจนนิ่มหรือละเอียดแล้วจะถูกป้อนเข้าเครื่องบีบน้ำมัน (Screw press) เพื่อแยกน้ำมันออกจากส่วนที่เป็นเมล็ดในที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือก สำหรับน้ำมันปาล์มในส่วนเส้นใยจะถูกส่งผ่านตะแกรงกรองน้ำมัน เพื่อสกัดเส้นใยและสิ่งเจือปนออกก่อนนำไปผ่านกรรมวิธีกรองแยก เส้นใยที่แยกออกมาแล้วจะส่งไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ เมล็ดในที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกจะผ่านกรรมวิธีการอบกะเทาะและแยกเมล็ดในต่อไป

#### 5) การกรองแยกน้ำมันปาล์มออกจากสิ่งเจือปน

น้ำมันปาล์มที่ผ่านตะแกรงกรองน้ำมันจะถูกส่งขึ้นถังกรองแยกและเพิ่มอุณหภูมิหรือทำน้ำมันให้ร้อนโดยการเพิ่มน้ำร้อนให้น้ำมันลอยตัว แล้วใช้กรวยดักเก็บน้ำมันเพื่อลดปริมาณความชื้นและสิ่งเจือปนเหลือเพียงประมาณร้อยละ 0.5 หลังจากนั้นน้ำมันปาล์มก็จะถูกส่งผ่านอุปกรณ์ขจัดความชื้นโดยใช้สุญญากาศดูดความชื้นและสิ่งเจือปนให้ลดลงเหลือประมาณร้อยละ 0.1 ซึ่งน้ำมันปาล์มที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วเป็นน้ำมันดิบ (Crude palm oil) ที่มีคุณภาพได้มาตรฐานแล้วจะถูกส่งเข้าถังเก็บเพื่อรอส่งจำหน่ายต่อไป

#### 6) การอบ กะเทาะ และแยกเมล็ดใน

เมล็ดในที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกจะถูกส่งเข้าไซโลอบเมล็ดใน เพื่ออบให้เปลือกและกะลาแห้งและกรอบ ซึ่งสะดวกต่อการกะเทาะเมล็ดใน จากนั้นจึงแยกเมล็ดในและกะลาออกจากกันโดยผ่านเครื่องแยกกะลาออกจากเมล็ดใน ทั้งนี้กะลาปาล์มจะถูกส่งไปเป็นเชื้อเพลิงเสริมสำหรับหม้อไอน้ำ ส่วนเมล็ดในที่กะเทาะเปลือกแล้วจะถูกส่งขึ้นถังอบให้แห้งก่อนจะบรรจุกระสอบส่งจำหน่ายต่อไป

#### 7) การบีบน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ

เมล็ดในที่ผ่านการกะเทาะเปลือกและอบแห้งแล้วจะถูกนำไปตีให้แตกด้วยเครื่องตีเมล็ดในแล้วบดด้วยเครื่องบดเมล็ดในก่อนนำเข้าเครื่องบีบเมล็ดใน กากของเมล็ดในที่ได้จะนำไปบรรจุกระสอบส่งขายเป็นอาหารสัตว์ ส่วนน้ำมันที่ได้จะถูกนำไปกรองเพื่อทำความสะอาดด้วยเครื่องกรองน้ำมันเมล็ดใน ก่อนนำน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบที่ได้บรรจุถังเพื่อรอจำหน่าย

#### 8) กระบวนการแยกน้ำมันจากน้ำเสียก่อนบำบัด

สำหรับน้ำมันปาล์มที่ปนมากับน้ำร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะส่งเข้าอุปกรณ์แยกน้ำ (Sludge separator หรือ Sludge centrifuge) เพื่อนำน้ำมันส่วนนี้กลับเข้าสู่กรรมวิธีกรองแยกอีกครั้งหนึ่ง และน้ำเสียที่ได้จะส่งเข้าระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

#### 2.1.4 กากปาล์มน้ำมัน (ปัญญา ธรรมศาล และคณะ, 2535)

กากปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม กากปาล์มน้ำมันที่พบในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. กากเปลือกปาล์ม (Palm Press Fiber) เป็นส่วนที่ได้จากการหีบเปลือกปาล์ม ส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานปาล์มน้ำมัน
2. กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม (Palm Kernel Meal) เป็นส่วนที่ได้จากการสกัดน้ำมันเนื้อปาล์ม
3. กากปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fiber) เป็นส่วนที่ได้จากการหีบปาล์มทั้งผล เป็นส่วนที่มีมาก และใช้ในการเลี้ยงสัตว์ได้



รูปที่ 2.1 กากปาล์มน้ำมัน (กรมปศุสัตว์, 2551)

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกากปาล์มน้ำมัน (กรมปศุสัตว์, 2551)

ส่วนประกอบ (ร้อยละ)	กากผลปาล์ม	กากเมล็ดปาล์ม
- ความชื้น	12.82	9.67
- โปรตีน	7.08	10.18
- ไขมัน	6.91	10.22
- เส้นใย	30.51	21.14
- เถ้า	4.55	4.25
- แคลเซียม	-	0.25

สำหรับในการวิจัยนี้ได้นำเอาส่วนของกากปาล์มน้ำมันที่เป็นส่วนเส้นใยที่ได้จากการหีบปาล์มทั้งผลมาใช้ โดยกากปาล์มน้ำมันดังกล่าวมีลักษณะสมบัติ คือ (สมพงษ์ เทศประสิทธิ์, 2526)

- กากปาล์มน้ำมันมีปริมาณโปรตีนค่อนข้างต่ำโดยมีประมาณร้อยละ 7 แต่มีปริมาณเส้นใยสูงประมาณร้อยละ 30

- กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ซึ่งมีส่วนประกอบของกากเนื้อในเมล็ดปาล์มและส่วนที่เป็นกะลาปนกัน มีโปรตีนประมาณร้อยละ 10-12 และมีเส้นใยประมาณร้อยละ 20-25

### 2.1.5 การนำของเหลือจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มใช้เป็นประโยชน์

การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ที่เป็นวัสดุเศษเหลือที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วย ทะลายปาล์มเปล่า 230 กิโลกรัม/ตันของทะลายปาล์มสด เส้นใยปาล์ม 145 กิโลกรัม/ตันของทะลายปาล์มสด กะลา 60 กิโลกรัม/ตันของทะลายปาล์มสด และกากสลัดจ์น้อยกว่า 30 กิโลกรัม/ตันของทะลายปาล์มสด ที่ใช้ขั้นตอนการสกัดน้ำมันแบบมาตรฐานที่ปรับปรุงที่ใช้ถังตกจมและเครื่องเหวี่ยงแยก ทั้งหมดประมาณ 315 กิโลกรัม/ตันของทะลายปาล์มสด (ปัญญา สุวรรณ, 2551)

1) **ทะลายปาล์มเปล่า** ทะลายปาล์มเปล่าจัดเป็นเศษวัสดุที่มีปริมาณมากที่สุด (คิดเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักปาล์มสด) ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม การนำทะลายปาล์มเปล่าเพื่อนำกลับไปใช้ในสวนปาล์ม เพื่อให้เป็นปุ๋ยและสารปรับสภาพดิน จัดเป็นการใช้ประโยชน์ที่ควรให้ความสำคัญเป็นอันดับแรก มีแนวทางในการใช้ประโยชน์ของทะลายปาล์มเปล่าดังนี้

- การใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุคลุมดิน เพื่อป้องกันการชะหน้าดิน ช่วยลดการสูญเสียความชื้นจากผิวน้ำดิน และใช้เป็นสารอาหาร ประโยชน์จะได้รับมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสภาวะของชั้นสัมพัทธ์ของสถานที่ ดังนั้นการช่วยป้องกันความชื้นจะมีความสำคัญในพื้นที่ที่แห้งแล้งมากกว่าบริเวณชายฝั่งทะเล

- การใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นปุ๋ย อย่างไรก็ตามปัญหาและอุปสรรคของการใช้ทะลายปาล์มเปล่า เป็นปุ๋ย มีหลายประการ ประการแรกคือทะลายปาล์มเปล่ามีปริมาณจำเพาะสูง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงในการขนส่ง และต้องจ่ายค่าแรงงานในการตกแต่ง ประการที่สองคือ การรบกวนจากหนู แมลงและตัวด้วง ซึ่งมีผลไปทำลายโดยการกัดกินยอดของต้นปาล์ม

- การใช้ทะลายปาล์มเปล่าในการเพาะเห็ด แต่ยังมีนำไปใช้กันน้อย

- การใช้ทะลายปาล์มเปล่าในการผลิตไม้อัดพาร์ติเคิล (Particle board) จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุนี้ ข้อจำกัดการใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำคือการมีปริมาณความชื้นสูงและมีความร้อนต่ำ (ทะลายปาล์มเปล่าแห้งมีค่าความร้อนต่ำกว่า 10 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) อย่างไรก็ตามการใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นแหล่งเชื้อเพลิงไม่มีความจำเป็นมากนัก เนื่องจากมีเศษวัสดุอื่นๆ ดีกว่าเส้นใยปาล์มและกะลาปาล์ม เป็นต้น

2) **เส้นใยปาล์ม** มีปริมาณร้อยละ 15 ของทะลายปาล์ม เส้นใยปาล์มใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำ (ค่าความร้อนของเส้นใยปาล์มแห้ง มีค่าน้อยกว่า 5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) การนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้แก่ การใช้เป็นซับสเตรตสำหรับการย่อยสลายให้ได้น้ำตาล และเป็นอาหารสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยผสมในปริมาณร้อยละ 10-20 ส่วนปริมาณที่สูงเกินไป (ร้อยละ 40-60) มีผลทำให้การย่อยได้ของสัตว์ลดลง การปรับปรุงคุณภาพอาจทำได้โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือยูเรียร้อยละ 5-6 แล้วหมัก 2-3 วัน การเสริมอาหารเส้นใยปาล์มด้วยโปรตีน เช่น ปลาป่น กากถั่วเหลือง และกากน้ำตาลทำให้การกินของสัตว์เพิ่มขึ้น

3) **กะลา** โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มใช้กะลาเป็นแหล่งเชื้อเพลิงสำหรับหม้อกำเนิดไอน้ำ (ค่าความร้อนของกะลาแห้งประมาณ 17 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) แต่เนื่องจากนิยมใช้เส้นใยปาล์มมากกว่า จึงเกิดการสะสมของกะลาในโรงงาน การนำกะลาไปใช้ประโยชน์อีกอย่างหนึ่ง คือ ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

4) **กากสลัดจ์** สำหรับโรงงานที่ใช้เครื่องเครื่องถ่ายของเหลว (Decanter) ในการแยกสกัดหรือแยกน้ำมัน จะได้กากสลัดจ์เป็นเศษวัสดุสามารถนำไปใช้ทำเป็นปุ๋ยได้เช่นเดียวกับทะลายปาล์มเปล่า

5) **น้ำเสีย** น้ำเสียที่สกรปรกจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ในขั้นต้นจะมีการแยกน้ำมันก่อนการบำบัดน้ำเสียแต่ยังคงมีน้ำมันเหลืออยู่สูงมากกว่า 250 มิลลิกรัมต่อลิตร หากมีการนำน้ำเสียเข้าระบบบำบัดอากาศแบบปิดสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ได้ (การเกิดก๊าซโดยเฉลี่ย 0.4 ลิตรต่อกิโลกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด) ค่าพลังงานความร้อน 20-25 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร หรือเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biogas) เพื่อการใช้พลังงานทดแทนในระบบ การผลิตไฟฟ้าและผลิตความร้อน เป็นการส่งเสริมให้โรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มความสามารถในการผลิต ช่วยเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเชิงพาณิชย์ให้เพิ่มมากขึ้น ลดการนำเข้าน้ำมันที่มีราคาแพง ก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านเศรษฐกิจ เป็นการช่วยเหลือภาคการเกษตรให้มีรายได้เพิ่มขึ้นจากการทิ้งหรือเผาของเหลือจากภาคการเกษตร โดยป้อนเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้การผลิตไฟฟ้าจากการใช้พลังงานทดแทนที่มาจากทรัพยากรดังกล่าว ยังส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศของโลกน้อยกว่าการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งนับเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

## 2.2 เส้นใยธรรมชาติ (กรมป่าไม้, 2548)

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) เป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญ หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติม และสารเสริมแรง เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มปริมาณการผลิต และเสริมแรงแก่ผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ

เส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ จัดเป็นเส้นใยธรรมชาติ ดังนั้นย่อมมีโครงสร้างเหมือนกับเส้นใยชนิดอื่นๆ โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนขององค์ประกอบในเส้นใยปาล์ม (จิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ, 2542)

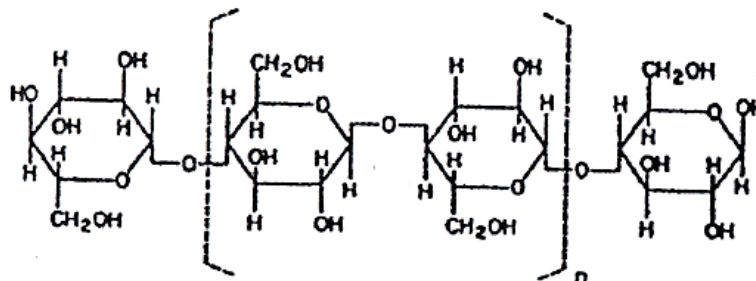
ชนิดขององค์ประกอบ	คิดเป็นร้อยละ
1. เซลลูโลส (Cellulose)	39.9
2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	28.9
3. ลิกนิน (Lignin)	20.3
4. สารประกอบอื่นๆ	3.6

### 2.2.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_6)_n$  เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบร่วมกับลิกนิน เพนโตแซนกัน แกมมาไนน์ ไซมัน และสารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น

เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึก คุณสมบัติการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพคือ ส่วนที่มี

น้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี ในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (กรมป่าไม้, 2548)

### ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) และกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่ปฏิกิริยาจะหยุดที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่สารเซลลูโลสจะบวมตัวในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) บางครั้งทำให้เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

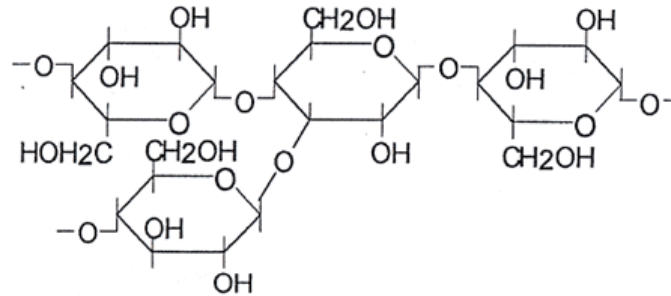
การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับ หรือการคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมันจนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของเซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยวจะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน โดยค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มาหรืออาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

### 2.2.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งมีความคล้ายกับเซลลูโลส แต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูโคนิก และกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสาร



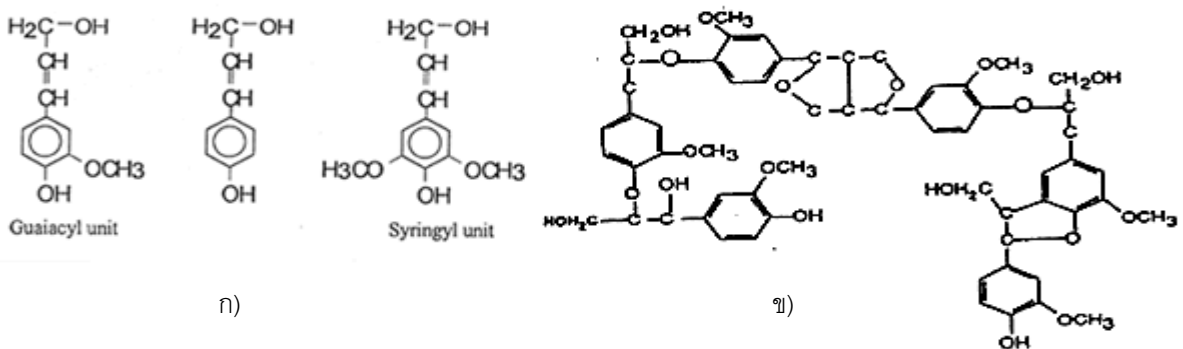
อื่นๆ เช่น ลิกนิน เซลลูโลสเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในแกลบ ชังข้าวโพด เฮกไซเซน  
สูตรทางเคมีคือ  $(C_6H_{12}O_5)_2$  โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (กรมป่าไม้, 2548)

### 2.2.3 ลิกนิน

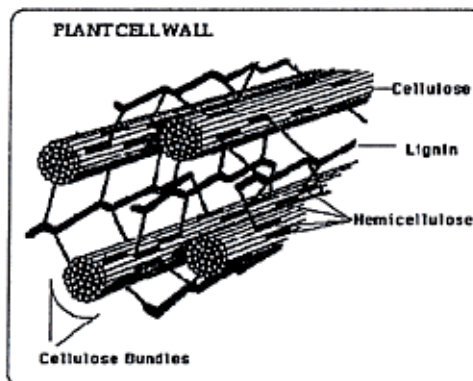
ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส  
ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด  
ซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มี  
ลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน เมื่อพืชตายลิกนินจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือ  
ลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา ตัวอย่างหน่วยที่ซ้ำกันของลิกนินดังแสดงใน  
รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ก) สูตรโครงสร้างของหน่วยซ้ำกันของลิกนิน ข) ลิกนินไม้เนื้ออ่อน (กรมป่าไม้, 2548)

ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นกับ  
ชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง และในไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุนาน

จะมีปริมาณลิกนินมากเช่นเดียวกัน โดยการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้จะเป็นไปดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ (กรมป่าไม้, 2548)

### 2.3 สีย้อม

สีย้อม (dyestuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจทำให้เกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือเกิดพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ซึ่งสายตาสารสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาสารออกมาต่างกันไป ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) **สีย้อมธรรมชาติ** (natural dyestuffs) เป็นสีย้อมได้ที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2) **สีย้อมสังเคราะห์** (synthetic dyestuffs) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี

### 2.3.1 การจำแนกสีย้อม

การจำแนกสีย้อมสามารถจำแนกได้ 3 วิธี คือ

- การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ
- การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี
- การจำแนกสีย้อมตามวิธีการใช้งาน

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัตถุประสงค์ที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเรกต์ เป็นต้น

#### 2.3.1.1 สีเอซิด (acid dye)

สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน โยขนแกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

#### 2.3.1.2 สีไดเรกต์ (direct dye)

หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะไซท์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

#### 2.3.1.3 สีเบสิก (basic or cationic dye)

สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุบวก ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มี

ประจุบวกจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

#### 2.3.1.4 สีดิสเพอร์ส (disperse dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตต เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกคว้นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรสออกไซด์ เป็นต้น สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในตัวย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน (amino anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

#### 2.3.1.5 สีรีแอกทีฟ (reactive dye)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

#### 2.3.1.6 สีอะโซอิก (azoic dye)

สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตต สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

#### 2.3.1.7 สีแว๊ต (vat dye)

เป็นสีย้อมที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อจะทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว๊ตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว๊ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว๊ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (anthraquinoid)

### 2.3.1.8 สีมอร์แดนต์ หรือโครม (mordant or chrome dye)

สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

### 2.3.1.9 สีอินเกรน

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

### 2.3.1.10 สีออกซิเดชัน (oxidation dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

### 2.3.1.11 สีซัลเฟอร์ (sulfur dye)

เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อจะทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมผ้า สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยที่เหมาะสมกับประเภทของสีย้อมแสดงดังตารางที่ 2.3 ทำให้ทราบได้ว่าเส้นใยปาล์มที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมเบสิกนั้น เมื่อนำมาปรับสภาพแล้วนั้นควรมีหมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบทางเคมีในรูปแบบใดที่จะสามารถทำให้เกิดการดูดซับได้ดีและมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยบางประเภทกับประเภทของสีย้อม

เส้นใย	โครงสร้างทางเคมีของเส้นใย	สีย้อมที่ใช้
ขนสัตว์	$\text{NH}_2$ , $\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	เอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ โครม รีแอกทีฟ
ไหม	$\text{NH}_2$ , $\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	เอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ เบสิก แว็ต
Cuprommonium Rayon	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ไดเรกต์ แว็ต ซัลเฟอร์
วิสคอส เรยอน	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ไดเรกต์ แว็ต ซัลเฟอร์
ฝ้าย	$\text{OH}$	ไดเรกต์ แว็ต ซัลเฟอร์ รีแอกทีฟ
Secondary cellulose acetate	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$	ดิสเพอร์ส
Cellulose Triacetate	$\text{COOH}$	ดิสเพอร์ส
ไนลอน 6.686	$\text{NH}_2$ , $\text{COOH}$ , $\text{CONH}$	เอซิด เมทัลคอมเพล็กซ์ ไดเรกต์ ดิสเพอร์ส รีแอกทีฟ
อะคริลิก	$\text{COOH}$ , $\text{SO}_3\text{H}$ , $\text{OSO}_3\text{H}$	เบสิก ดิสเพอร์ส
โพลีเอสเตอร์	$\text{OH}$ , $\text{COOH}$ , $\text{COO}$	ดิสเพอร์ส

ที่มา: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544

### 2.3.2 การเกิดสีของสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527) คือ

- กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group)
- กลุ่มไนโตร (Nitro Group)
- กลุ่มอะโซ (Azo Group)
- กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group)
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group)
- กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group)

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยุ่บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์สามารถมองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

### 2.3.3 ทฤษฎีการย้อมสี

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนชนิดที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาซีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกัน ในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย (อัจฉราพร ไสละสูต, 2527) คือ

- พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)
- แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals' force)
- แรงไอออน (ionic force)
- พันธะโควาเลนต์ (covalent bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย นอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสีย้อม หรืออาจกล่าวอย่างง่าย ๆ ว่ารูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อกระบวนการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาว ก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น จะทำให้เกิดการติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น อาจกล่าวได้ว่าการที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและผลทางฟิสิกส์ร่วมกัน

### 2.3.4 สารช่วยย้อม (Additives)

สารช่วยย้อม เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในระบบการย้อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อม ให้มีการดูดติดสีได้มากขึ้น สม่่าเสมอมากขึ้น และทำให้สีย้อมติดเส้นใยแล้วมีความคงทนมากขึ้น สารช่วยย้อมที่สำคัญ สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภท คือ

- กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอนเมื่อใช้สีย้อมเอซิด
- ด่าง ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก แวร์ต และกำมะถัน
- เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมเอซิดและการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแวร์ต ดิสเพอร์ส และสีเอซิดบางชนิด
- สารพา (Carrier) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารละลายอินทรีย์ ใช้ย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารรีดิวซ์ ใช้รีดิวซ์ตัวสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

### 2.4 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อมผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่แปรเปลี่ยนไปที่เราเรียกว่า น้ำเสีย เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี ตลอดจนทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำตายเนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูง ทำให้ขาดออกซิเจนและผลกระทบของน้ำเสียนี้ยังเป็นตัวบ่งชี้การทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและนับว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม คือ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วย สี บีโอดี ซีโอดี กรด-ด่าง สารแขวนลอย ความร้อน และอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ มลสารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี (dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยส่วนมากแล้วมลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีต่างๆ ไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัด



ได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอกทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีแวลต์ สีดิสเพอร์ส เป็นต้น ซึ่งน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีแหล่งที่มาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

#### 2.4.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่างๆ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) ดังนี้

1. น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่ง น้ำในส่วนนี้จะมีสีที่เหลือจากกระบวนการย้อมไหลปะปนมากับน้ำ และน้ำที่ใช้ในกระบวนการซักล้างหลังการฟอกย้อม
2. น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ โดยในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าได้น้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อน้ำจะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงจะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย
3. น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการย้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาด สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
4. น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องและทำความสะอาดโรงงาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีการปนเปื้อนของสารทำความสะอาดและสิ่งสกปรกต่าง ๆ เช่น น้ำมันจากเครื่องจักรในโรงงาน ดินทราย เป็นต้น

#### 2.4.2 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอต่อสิ่งแวดล้อมมีดังนี้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

##### 1. สารอินทรีย์

- 1) ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) ลดลง ซึ่งมีผลทำให้
  - สิ่งมีชีวิตในน้ำตาย เนื่องจากขาดออกซิเจน
  - ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเอง (self purification) ได้ทัน
  - ทำให้เกิดกลิ่น
  - ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจ
- 2) สารอินทรีย์บางชนิดอาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีผลทำให้

- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
  - เกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ (bioaccumulation) หากสารนั้นเป็นสารที่สลายตัวได้ยาก
2. อุณหภูมิ น้ำเสียอุณหภูมิสูงมีผลทำให้
- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
  - ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดลดลง
  - เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์
3. ของแข็งแขวนลอย
- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ
  - สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้
  - ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
4. ของแข็งละลายน้ำ

ถ้าหากความเข้มข้นของของแข็งละลายบางชนิดที่มีส่วนประกอบของโลหะหนัก เช่น เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม มีความเข้มข้นสูงกว่า 5 มก./ล. จะเป็นอันตรายต่อปลา หรือทองแดงมีความเข้มข้น 0.1 – 0.5 มก/ล จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในน้ำ ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้

#### 5. สี

- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
- ทำให้ปริมาณแสงที่จะผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลงส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำลดลง

#### 6. โลหะหนัก

- ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรคภัยแรงได้
- เกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศ
- เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์

### 2.5 การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรกำจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจาก

โรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้ (Metcalf และ Eddy, 1991)

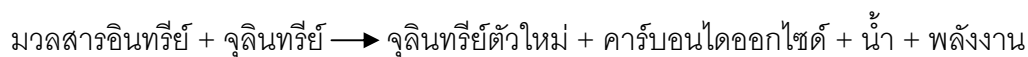
### 2.5.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีเอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิบัติการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม

### 2.5.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

เป็นกระบวนการที่อาศัยเชื้อจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

- ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กิน ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง ปฏิกริยาทางชีวเคมีของกระบวนการแสดงได้ดังนี้



- ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ดัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศ และไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ชุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

### 2.5.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้น ต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยน้ำทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์นั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอช ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

### 2.5.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลของสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ เป็นพวกวงแหวน กับพันธะคู่ หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้น การที่จะทำลายโมเลกุลของสีย้อมนั้น ต้องทำลายที่หมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนเนชั่น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

### 2.5.5 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็นประเภทได้ดังนี้

### 2.5.5.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

ใช้ในการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีย้อมดิสเพอร์สที่สีย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมซัลเฟอร์ สีแฉะ และสีย้อมประเภทสีย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

### 2.5.5.2 ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เหมาะสำหรับการใช้กำจัดไอออนของสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตาม สีย้อมที่สีย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

### 2.5.5.3 ไดนามิคเมมเบรน (Dynamic Membrane)

ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก สแตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ไฮดรอกไซด์ของเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Hydrous zirconium (IV) oxide) และกรดโพลีอะคริลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

### 2.5.5.4 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่สีย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

## 2.5.6 เทคโนโลยีใหม่ๆ (New Technology)

เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกัน คือ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น

### 2.5.6.1 ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์

ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงาน ประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกัน ดังนั้น เทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

### 2.5.6.2 ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์

ที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีน และไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้

### 2.5.6.3 ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์หรือพืชแห้ง

เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ เซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันไว้แลกเปลี่ยนไอออนหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้ ซึ่งเส้นใยปาล์มที่ใช้ในงานวิจัยก็จัดอยู่ในตัวดูดซับประเภทนี้เช่นกัน

## 2.6 การคัดเลือกและรายละเอียดสีย้อมที่นำมาใช้ในงานวิจัย

### 2.6.1 การคัดเลือกสีย้อม

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าสีย้อมสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังนั้นการที่จะทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียให้ครอบคลุมสีทุกชนิดจึงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการศึกษาการกำจัดสีย้อมโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ในงานวิจัยนี้ ได้มีขั้นตอนในการเลือกสีย้อมที่นำมาใช้ในการศึกษา ดังนี้

1. เลือกสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากว่าสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำสามารถบำบัดได้ง่ายกว่า เช่น การทำให้รวมตัวกันเป็นกลุ่มแล้วตกตะกอน เป็นต้น ซึ่งสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ดี ได้แก่ สีเอซิด สีไดเรกต์ สีเบสิก สีรีแอคทีฟ และสีมอร์แดนท์

2. สีย้อมที่ละลายน้ำได้ แบ่งเป็น กลุ่มที่ให้ประจุบวก และกลุ่มที่ให้ประจุลบ โดยในการวิจัยได้ใช้เส้นใยจากธรรมชาติ คือ เส้นใยปาล์มที่นำมาปรับสภาพเพื่อใช้ดูดซับสีออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่า กลุ่มของสีย้อมที่ให้ประจุบวกสามารถใช้วัสดุจากธรรมชาติมาดูดซับเพื่อบำบัดสีได้ดี ซึ่งสีที่ให้ประจุบวก คือ สีเบสิก ซึ่งงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกใช้สีเบสิก 2 ชนิด ได้แก่ สีมาลาโคทีกรีน และสีเมทิลีนบลู

## 2.6.2 รายละเอียดสีย้อม

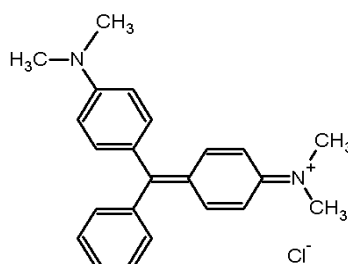
### 2.6.2.1 มาลาไคท์กรีน (malachite green)

#### 1) ลักษณะทั่วไป

สูตรโมเลกุล:  $C_{23}H_{25}N_2$

ชื่อสามัญ: 4-[(4-dimethylaminophenyl)-phenyl-methyl]-N,N-dimethyl-aniline

มวลโมเลกุล: 364.911 กรัมต่อโมล



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมาลาไคท์กรีน (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน, 2551)

มาลาไคท์กรีนเป็นสีย้อมเบสิกชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเขียว ละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงิน มาลาไคท์กรีนที่ใช้นั้นปัจจุบันมีอยู่ 2 รูป คือ

- รูปของมาลาไคท์กรีนออกซาเลต (Malachite green oxalate)
- รูปของมาลาไคท์กรีนไฮโดรคลอไรด์ (Malachite green hydrochloride)

#### 2) ชื่อทางการค้าอื่นๆ ของมาลาไคท์กรีน :

มาลาไคท์กรีน มีชื่อเรียกอื่นๆ อีก เช่น วิคทอเรียกรีน (Victoria Green) แอนิลีนกรีน (Aniline Green) เบนซัลดีไฮด์กรีน (Benzaldehyde Green) ไชน่ากรีน (China Green) ไดมอนด์กรีน (Diamond Green) และบริลเลียนกรีน (Brilliant Green)

#### 3) คุณสมบัติทั่วไป

1. มาลาไคท์กรีนเป็นสีสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับย้อมวัสดุต่างๆ เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ผ้าฝ้าย และกระดาษ

2. มาลาไคท์กรีน จะถูกดูดซึม และมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นลูโคมาลาไคท์กรีน (Leucomalachite Green : LMG) ในเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำ และจะตกค้างเป็นระยะเวลานาน

#### 4) ความเป็นพิษของมาลาไคท์กรีน

- เหนียวนำไปเกิดเนื้องอกที่ต่อมไทรอยด์ตับ ในสัตว์ทดลอง ในขณะที่ลูโคมาลาไคท์กรีน สามารถก่อให้เกิดมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์ และตับในสัตว์ทดลอง

- เหนียวนำไปเกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมในการก่อให้เกิดเนื้องอกในสัตว์ทดลอง
- ทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม โดยการเพิ่มความยาวของสายดีเอ็นเอ
- ทำให้การพัฒนาของตัวอ่อนหลังฟักออกจากไข่ผิดปกติไปจากเดิมถึง 3-5 เท่า
- เป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจของสัตว์น้ำและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเลือด ทำให้ระดับของแคลเซียมและโปรตีนในเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว
- เป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่าย พืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืดและทะเล

### 5) การตกค้าง

มาลาโคทกรีน ที่ละลายในน้ำจะถูกดูดซึมเข้าสู่ปลาได้อย่างรวดเร็วและสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของปลาและเปลี่ยนรูปไปเป็น ลูโคมาลาโคทกรีน ที่ไม่มีสี อัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ มาลาโคทกรีน และลูโคมาลาโคทกรีน จะตรวจพบมากที่บริเวณไขมันในช่องท้องและจะตรวจพบน้อยในน้ำเลือด เนื่องจากมาลาโคทกรีน ลูโคมาลาโคทกรีน สามารถแพร่กระจายไปได้อย่างกว้างขวางทั่วทุกเนื้อเยื่อของปลาทำให้เกิดการสะสมและติดแน่นในเนื้อเยื่อต่างๆ ได้ดี และถูกกำจัดออกจากเนื้อเยื่อได้ช้า

### 6) มาลาโคทกรีนในประเทศต่างๆ

- ปี 2533 ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาได้ประกาศห้ามใช้มาลาโคทกรีนในการรักษาโรคสัตว์น้ำ
- มาลาโคทกรีน และลูโคมาลาโคทกรีน ไม่อนุญาตให้มีการตกค้างในสัตว์น้ำเพื่อการบริโภคในประเทศออสเตรเลีย หน่วยงานตรวจสอบและกักกันของประเทศออสเตรเลียได้เริ่มสุ่มตรวจหา มาลาโคทกรีน และลูโคมาลาโคทกรีน ในสัตว์น้ำนำเข้าเพื่อการบริโภคตั้งแต่วันที่ 26 กันยายน 2548
- ประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรป ไม่อนุญาตให้ใช้มาลาโคทกรีนในการรักษาโรคสัตว์น้ำ (ตามกฎหมายข้อบังคับ Council Regulation 2377/90)
- ในประเทศฮ่องกง มาลาโคทกรีนถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่ก่ออันตรายและห้ามพบในอาหารทุกชนิดที่ขายภายในประเทศ
- ประเทศเกาหลีประกาศห้ามใช้มาลาโคทกรีนในสินค้าสัตว์น้ำจากการเพาะเลี้ยง และกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบเข้มงวดในผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำนำเข้า



7) **ค่าต่ำสุดของสารมาลาไคท์กรีน** (กองตรวจสอบรับรองมาตรฐานคุณภาพ สัตว์น้ำและผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ, 2551)

- เป็นสารที่ก่อให้เกิดกลายพันธุ์ (Mutagenic) โดยทำให้ไข่ของปลาที่แช่ด้วยสารชนิดนี้มีการพัฒนาไปเป็นตัวอ่อนอย่างไม่สมบูรณ์
- เป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) ในสัตว์ทดลอง
- Commission Regulation No. 2002/657/EC กำหนด ค่าต่ำสุดของสารมาลาไคท์กรีนที่ระดับ 2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

### 2.6.2.2 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)

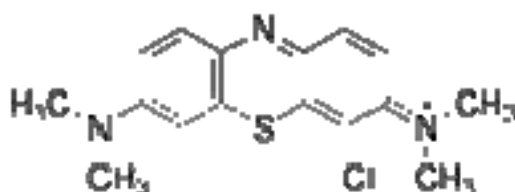
สูตรโมเลกุล :  $C_{16}H_{18}N_3ClS$

ชื่อสามัญ : 3, 7-bis(Dimethylamino)-phenazathionium chloride  
Tetramethylthionine chloride

มวลโมเลกุล : 319.85 กรัมต่อโมล

เมทิลีนบลู (Methylene blue) เป็นสีเบสิกชนิดหนึ่ง สีข้อมเบสิกเป็นสารอินทรีย์ชนิดที่มีประจุบวกของเกลือแอมโมเนียม ซัลเฟต หรือออกซาเนียม ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ข้อมติดเส้นใย เซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ให้แคตไอออนทำให้เรียกสีนี้ว่า สีแคตไอออน ซึ่งสามารถข้อมติดกับเส้นใยโดยประจุบวกของโมเลกุลสีข้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย ส่วนใหญ่ใช้ข้อมขนสัตว์และเส้นใยอื่นๆ ที่เตรียมให้มีประจุในสภาพที่เป็นกรด

เมทิลีนบลูเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นรูปวงแหวนแบบเฮตเตอโรไซคลิก-อะโรมาติก สูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเมทิลีนบลูนี้ได้ถูกใช้ในงานต่างๆ หลายแขนง เช่น งานทางด้านชีววิทยา งานทางด้านเคมี และการข้อมสีของผ้าฝ้าย ที่อุณหภูมิห้องนั้นเมทิลีนบลูจะอยู่ในรูปของแข็ง ไม่มีกลิ่น เป็นผงสีเขียวเข้ม และจะเป็นสารละลายสีน้ำเงินเมื่อละลายน้ำ



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างเมทิลีนบลู (wikipedia, 2008)

เมทิลีนบลูเสถียรมากในร่างกายมนุษย์ และถ้าถูกดูดซึมเข้าไปในร่างกายโดยการกินหรือการดูดซึม จะสามารถต้านทานกรดจากกระเพาะอาหารได้ดีพอๆ กับเอนไซม์ภายในกระเพาะอาหาร ซึ่งเมทิลีนบลูอาจจะไม่ได้ถูกย่อยโดยตรงโดยตับ อาจจะถูกกรองออกโดยไต

## 2.7 การดูดซับ (Adsorption) (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545)

การดูดซับนั้นจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) โดยกลไกการดูดซับเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดซับ มีการนำเอาการดูดซับไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและงานด้านสิ่งแวดล้อม

สำหรับแรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับนั้น แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

### 1. แรงทางกายภาพ (Physical waal's force) ประกอบด้วย

1) **แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal's force)** อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพเป็นขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้นๆ ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้น การคายการดูดซับ (desorption) จึงเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2) **แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)** เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงของโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะมี

เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

## 2. แรงทางเคมี (chemical force)

เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับแล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดจากการให้อิเล็กตรอน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ซึ่งมีความมากกว่าแรงทางกายภาพ และจากแรงทางเคมีนี้ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (irreversible) เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของเหลวหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของเหลวนั้น

### 2.7.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attractive force) อย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับถูกทำให้เกาะติดแน่นอยู่กับโมเลกุลของสารดูดซับ โดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นหลายๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพนี้ทำให้เกิดส่วนที่หนา และผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยการคายการดูดซับ (desorption) จะสามารถเกิดขึ้นได้

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption) จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัส

ของสารดูดซับ ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จึงมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ความแข็งแรงของแรงดึงดูด สามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูง โดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี มีดังนี้ คือ

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยน หรือใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช้ค่าที่สำคัญในการพิจารณา
4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดขึ้นที่ 1 แล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลานานพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกัน แต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว และถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไม่มากนัก พบว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น และใช้กันมากในอุตสาหกรรมนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ

สำหรับเส้นใยพอลัมในการวิจัยนี้ได้มีการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งสามารถเกิดการดูดซับได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพเนื่องจากรูพรุนบนเส้นใยพอลัม และเกิดการดูดซับทางเคมีเนื่องจากการปรับสภาพที่เป็นการเพิ่มประจุและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

### 2.7.2 กลไกของการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีช่องหรือรูพรุน โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ
2. การแพร่ภายใน เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกริยาพื้นผิว เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้น ความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละลายได้

### 2.7.3 ขั้นตอนการดูดซับ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลาย (adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน
4. การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารมายังสารดูดซับภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1) ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorbate)

การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับ ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำจะลดลงเมื่อความยาวของพันธะถูกใช้

ยาวขึ้น นอกจากนั้นขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย โดยขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

## 2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุน ถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

## 3) อุณหภูมิ (Temperature)

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง

## 4) พีเอช (pH)

พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง และพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเป็นเบสในการดูดซับ

## 5) ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัด อัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ในระบบที่ช่องหลอดมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับในกรณีนี้การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนของเหลวในระบบสูงความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

## 6) เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

## 2.8 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Equilibrium Adsorption and Adsorption isotherms)

การดูดซับ เกิดจากตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลาย และก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของของแข็ง ในเวลานั้นจะเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็ง ที่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับ จะมีค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักหรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิศูนย์องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งอาจแสดงได้ด้วยการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น หรือปริมาณ หรือปริมาตรของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้เทียบกับความดันย่อย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับนั้นที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption Isotherms) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมกันมากที่สุด

กราฟการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่นี้ อธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างเฟสของของเหลวและของแข็ง อัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และจะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย คุณสมบัติของตัวถูกละลาย หรือความเข้มข้นและสมบัติของตัวถูกละลาย เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มของข้อมูลดังแสดงในรูปความสัมพันธ์ของจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของของแข็ง กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล การแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของการดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

### 2.8.1 รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับ มีอยู่ 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ไอโซเทอมแบบที่ 1 (รูปที่ 2.8(ก)) พบมากที่สุด เป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งโมเลกุล (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous Powders) ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

ไอโซเทอมแบบที่ 2 (รูปที่ 2.8(ข)) พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอินฟินิต) โดยจะเกิดบนวัสดุที่

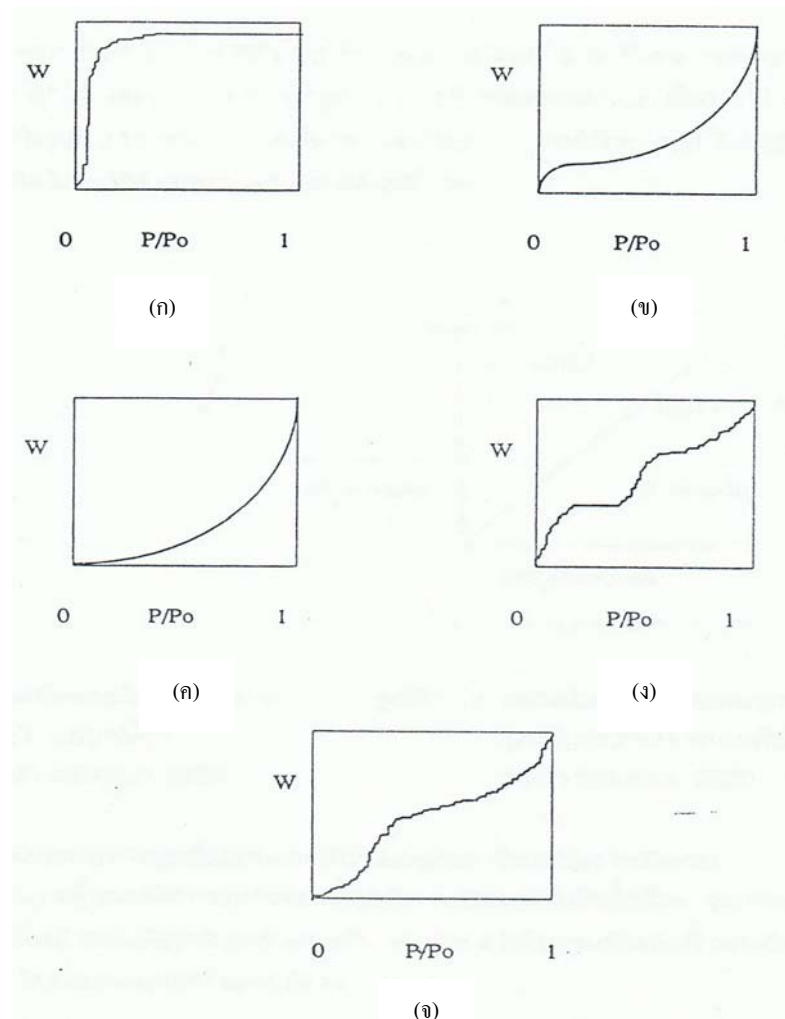
ไม่มีรูพรุน (Nonporous Powder) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่ารูพรุนขนาดเล็ก (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherms) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

ไอโซเทอมแบบที่ 3 (รูปที่ 2.8(ค)) การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (The Adsorbate Heat of Liquefaction) ดังนั้น การดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

ไอโซเทอมแบบที่ 4 (รูปที่ 2.8(ง)) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนตัวดูดซับ มีวัสดุรูพรุนประมาณ 15-1000 อังสตรอม การดูดซับคล้ายแบบที่ 2 สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับนั้นถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับในแบบที่ 2 คือ เกือบเป็นแบบผิวชั้นเดียว (monolayer) สมบูรณ์

ไอโซเทอมแบบที่ 5 (รูปที่ 2.8(จ)) การดูดซับคล้ายแบบที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นต่ำ แต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่ง เช่นเดียวกับแบบที่ 4 เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าน้อยๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15-1000 อังสตรอม





รูปที่ 2.8 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับ: W = ปริมาณการดูดซับ; P/Po = ความดันสัมพัทธ์ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

## 2.8.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ

สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับ ได้แก่

### 2.8.2.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (Brunauer, Emmett and Teller Adsorption Isotherms)

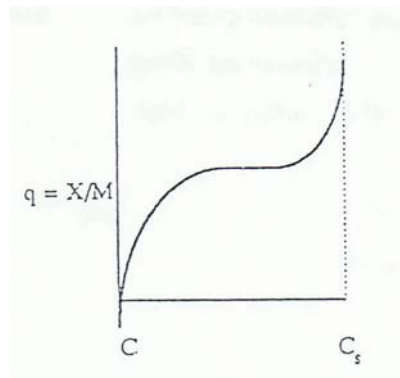
แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 โดยค่า C จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ Cs ซึ่งมีสมการดังนี้

$$q = X/M = BCQ^0 / [(Cs-C) \cdot (B-1) \cdot C / Cs]$$

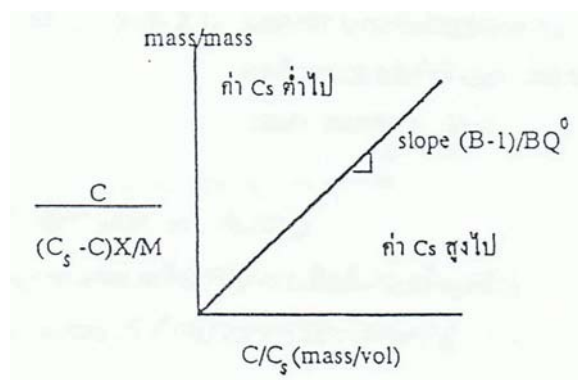
$$\text{หรือ } C/Cs = [BQ^0 / (B-1)] \cdot [CM / X(Cs-C)]$$

เมื่อ	X/M	คือ	ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)
	B	คือ	ค่าคงที่ ขึ้นกับพลังงานของ adsorbent-adsorbate interaction
	C	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย
	Q°	คือ	น้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เรียงตัวแบบผิวชั้นเดียว
	Cs	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อิ่มตัว

เมื่อวาดกราฟระหว่าง  $[CM/X(C_s - C)]$  กับ  $C/C_s$  จะได้รูปที่ 2.10 ซึ่งสามารถคำนวณหา ค่าคงที่ B และ  $Q^\circ$  ได้ แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 2.9 จะต้องประมาณค่า  $C_s$  เพื่อนำมาคำนวณ และเขียนกราฟในรูปที่ 2.10 ก่อน ถ้าไม่ได้เส้นตรง จะต้องปรับค่า  $C_s$  ใหม่ให้เหมาะสม ซึ่งถ้าปรับค่า  $C_s$  สูงหรือต่ำเกินไป จะได้ลักษณะของเส้นกราฟดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)



รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท แบบเป็นเส้นตรง (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

### 2.8.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherms)

รูปแบบนี้สมมติให้การดูดซับของตัวดูดซับมีลักษณะเป็นผิวชั้นเดียว (monolayer) และไม่มีการเคลื่อนย้ายของตัวดูดซับไปตำแหน่งอื่นในผิวสัมผัส ไอโซเทอมลักษณะนี้ แสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 โดยสมการแลงเมียร์ แสดงได้ดังนี้

$$q = X/M = bC_e q_m / (1 + bC_e)$$

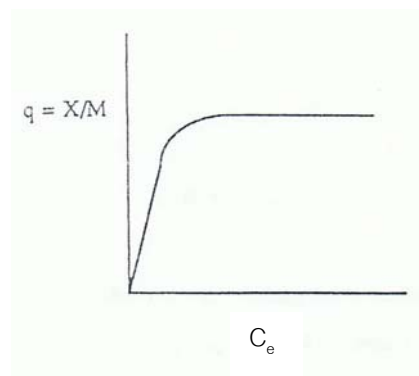
$$\text{หรือ } 1/q = [(1/bq_m) * (1/C_e)] + (1/q_m)$$

$$K_L = bq_m$$

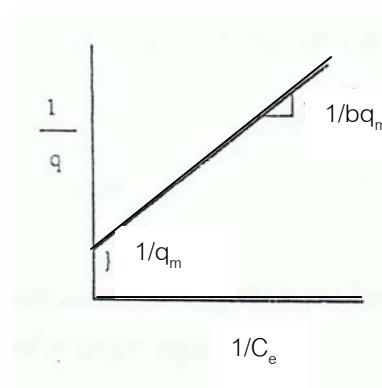
เมื่อ  $b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (ลูกบาศก์เดซิเมตร/มิลลิกรัม)

$q_m$  คือ ปริมาณตัวถูกละลายบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัมของตัวดูดซับ)

$K_L$  คือ ค่าคงที่สมดุลของแลงเมียร์ (ลูกบาศก์เดซิเมตร/กรัมของตัวดูดซับ)



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์แบบเป็นเส้นตรง (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

ลักษณะของรูปไอโซเทอม สามารถบอกได้ว่าการดูดซับในการทดลองได้ผลดีหรือไม่ ซึ่งจะใช้การคำนวณจากค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยจะแสดงให้อยู่ในรูปค่าคงที่ของการแยกตัว  $r$  (dimensionless constant separation factor) ซึ่งจะได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$r = 1/(1+bC_0)$$

โดยที่  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร)  
ผลของค่า  $r$  ที่มีต่อการดูดซับแสดงไว้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลของแฟกเตอร์การแยกตัวจากลักษณะของรูปไอโซเทอม (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

Separation Factor " $r$ "	ลักษณะของไอโซเทอม
$r > 1$	การดูดซับไม่ดี
$r = 1$	การดูดซับคงที่หรือการดูดซับดี
$0 < r < 1$	การดูดซับดี
$r = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

### 2.8.2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherms)

สมการของฟรอนด์ลิช และกราฟจะมีลักษณะเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งมีสมการดังนี้

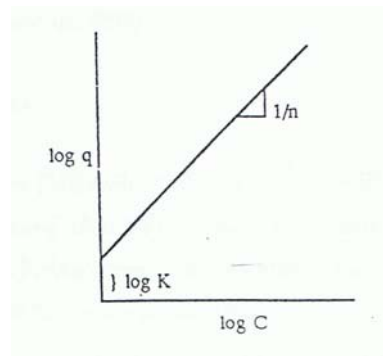
$$q = X/M = KC^{1/n_1}$$

หรือ  $\log q = \log K + (1/n_1) * \log C$

โดย  $K$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถการดูดติดผิวของตัวดูดติดผิว

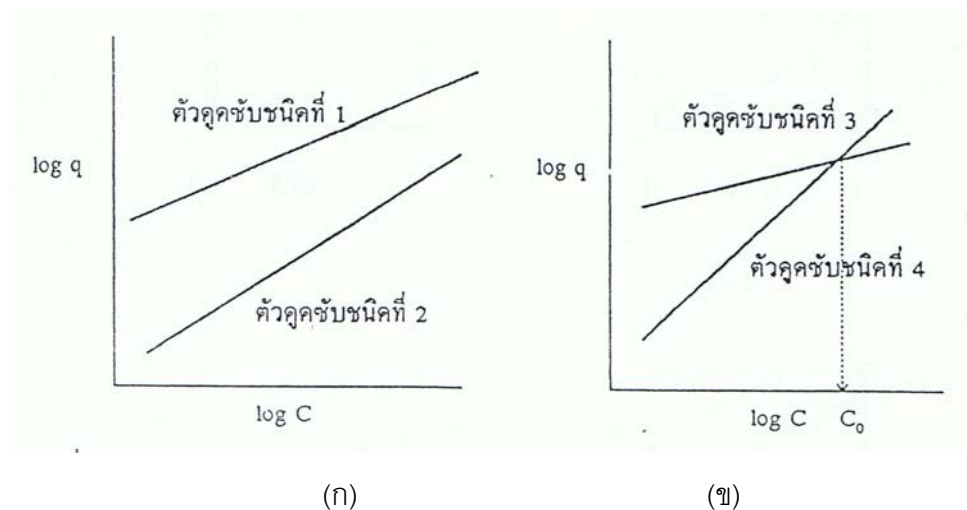
$1/n_1$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

เมื่อวาดรูปตามสมการของฟรอนด์ลิช จะมีลักษณะเหมือนรูปที่ 2.13 ค่าคงที่ต่างๆ ( $K$  และ  $n_1$ ) คำนวณหาได้จากการวาดรูประหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  (รูปที่ 2.13) ค่า  $n_1$  จะใช้เป็นตัวบอกความสามารถในการดูดซับที่ดี และความจุของตัวดูดซับ ถ้าค่า  $n_1$  มากกว่า 1 หมายความว่า ตัวดูดซับที่ใช้สามารถดูดซับตัวถูกละลายได้ดี และถ้าค่า  $n_1$  มากกว่า 1 แต่น้อยกว่า 10 การดูดซับนั้นสามารถดำเนินไปได้ด้วยดี



รูปที่ 2.13 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978)

สมการนี้ใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลาง ในการพิจารณาเลือกตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่ากัน พิจารณาจากค่าไอโซเทอมได้ ดังรูปที่ 2.14(ก) จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 2.14(ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า  $C_0$  แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะสูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นสูงกว่า  $C_0$  ดังนั้นต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ ในรูปที่ 2.14(ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าการบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะเหมาะสมกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (ชลธา ไกรวัฒน์สุพรรณ และคณะ, 2538)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลในงานวิจัยต่างๆ จากการศึกษา พบว่า มีการนำเอาเส้นใยจากวัสดุชนิดต่างๆ มาปรับสภาพเพื่อนำมาใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสีย ซึ่งในที่นี้จะศึกษาถึงวิธีการปรับสภาพเส้นใยพอลัมด้วยวิธีต่างๆ และการนำเอาเส้นใยพอลัมที่ปรับสภาพไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งก็คือการกำจัดสีในน้ำเสียนั่นเอง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

เกศสุชา พูลคำ (2537) ใช้ผักตบชวาและชานอ้อย เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนองค์ประกอบผักตบชวามีเซลลูโลสร้อยละ 43-44 ลิกนินร้อยละ 12-15 แพนโตแซนร้อยละ 14-15 และสารอื่นๆ ส่วนองค์ประกอบในชานอ้อยมีไฮโดรเซลลูโลสร้อยละ 82.52 แอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 44 ลิกนินร้อยละ 19.78 แพนโนแซนร้อยละ 27.21 และสารอื่นๆ ซึ่งโลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพผักตบชวาและชานอ้อย ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ปรับสภาพอยู่ในช่วง 0.686-0.809 มิลลิกรัมสมมูล/กรัม และผักตบชวาที่ปรับสภาพ (carboxymethyl water hyacinth) อยู่ในช่วง 0.330-0.496 มิลลิกรัมสมมูล/กรัม ส่วนชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าอยู่ในช่วง 0.065-0.086 มิลลิกรัมสมมูล/กรัม และชานอ้อยที่ปรับสภาพ (carboxymethyl bagasse) มีค่าอยู่ในช่วง 0.052-0.069 มิลลิกรัมสมมูล/กรัม นอกจากนี้พบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมีค่าสูงกว่านิกเกิล และสังกะสี สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า น้ำเสียที่มีโลหะหนักน้อยมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ซึ่งใช้ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 นอร์มัล สำหรับการรีเจนเนเรชั่นใช้ประมาณ 3 ปริมาตรเบด (bed volumes)

ชลธา ไกรวัตนุสสรณ์ และคณะ (2538) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชานอ้อย และศึกษาผลของความชื้นที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านให้ได้เป็นถ่านกัมมันต์ ผลการวิจัยพบว่า ความชื้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการกระตุ้นเท่ากับ ร้อยละ 54.4 ซึ่งจะให้ผลการดูดซับสีจากน้ำตาลได้สูงสุดถึงร้อยละ 97.4

พิธิ กระสินธุ์ศรี (2539) นำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2, 5, 10, 20, 30 และ 37 (ปริมาตรต่อปริมาตร) พบว่า การปรับสภาพโครงสร้างผักตบชวากับฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 ให้ประสิทธิภาพดีในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก โดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์ ผลการทดลองพบว่า ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยน

ไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 เท่ากับ 1.0962, 0.6983 และ 1.0375 มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม สำหรับไอออนของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี นอกจากนี้ยังพบว่าในการแลกเปลี่ยนไอออนของทองแดงมีค่าสูงกว่าไอออนของนิกเกิลและสังกะสี หลังจากคอลัมน์หมุดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนของโลหะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ประมาณ 1 ปริมาตรเบด หลังจากล้างคอลัมน์ด้วยน้ำปราศจากไอออนก็สามารถนำคอลัมน์กลับมาใช้ได้ใหม่ โดยไม่กระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson สำหรับไอออนของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี คือ -0.85, -1.00 และ -0.78 ตามลำดับ จากค่าสัมประสิทธิ์ข้างต้นพบว่า เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่มีไอออนของโลหะหนักลง จะมีผลทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสีพบว่าคอลัมน์ชนิดนี้สามารถกำจัดโลหะได้เป็นที่น่าพอใจ และจากผลการวิจัยดังกล่าว สามารถนำผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 5 มาใช้แทนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักจากน้ำเสียชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ (2542) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสี ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์ไนซ์ครอสส์ลิงก์เซลลูโลส ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ ชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม การทดลองจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสามชนิด ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ (Untreated cellulose) และ วัสดุที่ปรับสภาพด้วยสารควอร์เทอร์ไนซ์ และสารสร้างครอสส์ลิงก์ (Quaternized crosslinked cellulose) โดยทดลองกับสี 2 ชนิด คือ สีรีแอกทีฟ (Remazol Black B, Remazol Brilliant Blue และ Remazol Reed 3BS) และสีไดเรกต์ (Best Direct Black B, Sirius Blue KCFN และ Sirys Rubine KZBL) ที่มีความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ภายหลังการทดลองพบว่า ชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำกว่าควอร์เทอร์ไนซ์ครอสส์ลิงก์เรซิน ที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน โดยที่ประสิทธิภาพของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 4 ( ร้อยละการกำจัดต่อกรัมของวัสดุ) ในขณะที่ควอร์เทอร์ไนซ์ครอสส์ลิงก์ชานอ้อย ควอร์เทอร์ไนซ์ครอสส์ลิงก์ ผักตบชวา และควอร์เทอร์ไนซ์ครอสส์ลิงก์เส้นใยลูกปาล์ม มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 95-99

รัชนิย์ รุกขชาติ (2544) ศึกษาความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีรีแอกทีฟและสีไดเรกต์ ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ทั้งชนิดที่ไม่ได้ผ่าน และผ่านการปรับสภาพด้วยการทำควอร์เทอร์-

ไนซ์โครสสลิงก์ ทดลองโดยใช้เครื่องเขย่า ผลการทดลองพบว่า วัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ จะมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและมีร่องลึกต่างๆ มากกว่าวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเล็กน้อย รวมทั้งมีค่าความหนาแน่น การบวมน้ำ พื้นที่ผิวและโครงสร้างหลักของวัสดุ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH), หมู่อัลคิล (-CH) และ หมู่คาร์บอนิล ( $\text{CH}_2\text{-O}$ ) และหมู่อัลคีน ( $\text{C}=\text{C}$ ) สูงกว่าวัสดุที่ไม่ได้ปรับสภาพ สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมนั้น พบว่า ตันมันสำปะหลัง ใบสับปะรดและกาบมะพร้าว ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ มีประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟและสีไดเรกต์ เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 15.35 ซึ่งต่ำกว่าวัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ที่มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95.54 จากการศึกษาหาขีดความสามารถสูงสุดในการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าตันมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ที่ผ่านการปรับสภาพมีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.68, 0.86 และ 0.86 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ และจากผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้กาบมะพร้าวพบว่า ความสามารถในการดูดติดสี มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ และที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กาบมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีไดเรกต์ ไชเรียส บรู เคซีเอฟเอ็น (Sirius Blue KCFN) ไชเรียส รูไบน์ เคเซทบีแอล (Sirius Rubine KZBL) และ เบส ไดเรกต์ แบล็ค บี (Best Direct Black B) และสีรีแอคทีฟ รีม่าโซล บริลเลียน บรูอาร์ (Remazol Brilliant Blue R) รีม่าโซล บริลเลียน เรด 3 บีเอส (Remazol Brilliant Red 3BS) และ รีม่าโซล แบล็ค บี (Remazol Black B) ได้ 455, 556, 455, 625, 625 และ 625 มิลลิกรัมต่อกรัมของกาบมะพร้าว ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงนั้น พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจริงของวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 7.92 ซึ่งต่ำกว่าวัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98.65 ส่วนถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงเท่ากับร้อยละ 100

ลัดดา ยาวีร์ชน (2544) ศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีรีแอคทีฟและสีไดเรกต์ และสีน้ำกาบสาของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม ทั้งชนิดที่ไม่ได้ผ่าน และผ่านการปรับสภาพด้วยการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองพบว่า วัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ จะมีลักษณะพื้นผิวขรุขระและมีร่องลึกต่างๆ มากกว่าวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพเล็กน้อย รวมทั้งมีค่าความหนาแน่น การบวมน้ำ พื้นที่ผิว และ



โครงสร้างหลักของวัสดุ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH), หมู่อัลคิล (-CH และ  $-\text{CH}_2\text{O}$ ) และหมู่อัลคีน ( $\text{C}=\text{C}$ ) สูงกว่าวัสดุที่ไม่ได้ปรับสภาพ สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมนั้นพบว่า ชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์มที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ มีประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟ และสีไดเรกต์ เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 6.02 ซึ่งจัดว่าต่ำกว่าวัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์มาก โดยวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพ จะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 91.54 ซึ่งผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้ชานอ้อย พบว่า ความสามารถในการดูดติดสี มีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ นอกจากนี้ผลจากการทดลองแบบคอลัมน์ สรุปได้ว่าชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้มากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟ รีมาโซล แบล็ค บี (Remazol Black B) รีมาโซล บริลเลียน บลู อาร์ (Remazol Brilliant Blue R) และ รีมาโซล บริลเลียน เรด 3 บีเอส (Remazol Brilliant Red 3BS) และสีไดเรกต์ เบส ไดเรกต์ แบล็ค บี (Best Direct Black B) ไชเรียส บลู เคซีเอฟเอ็น (Sirius Blue KCFN) และ ไชเรียส รูไบน์ เคแซทบีแอล (Sirius Rubine KZBL) ได้ 141, 247, 247, 99, 211 และ 229 มิลลิกรัมต่อกรัมของชานอ้อย ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำจากสำนั้น จากการทดลองแบบทีละเท พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำจากสำของวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 13.55 ซึ่งต่ำกว่าวัสดุที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำจากสำ เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 75.26 และเมื่อทดลองผ่านคอลัมน์ พบว่าชานอ้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการทำควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำจากสำ เท่ากับ 457, 847 และ 43 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุ ตามลำดับ

ธนกร จันทสุบรรณ (2545) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานฟอกย้อมสำหรับควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์เซลลูโลส(QC) ที่เตรียมจากเส้นใยลูกปาล์มเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองแบบทีละเท ทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส อัตราการกวนและศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี ผลการศึกษาพบว่ากำจัดสีเข้าสู่สมดุลภายในเวลาสัมผัส 60 นาที และถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุลเร็วกว่าเส้นใยลูกปาล์ม พบว่าอัตราเร็วการกวนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมื่อกวนด้วยความเร็วมากกว่า 60 รอบต่อนาที โดยในอัตราเร็วการกวนที่เท่ากันถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุลการดูดซับเร็วกว่าควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์เซลลูโลสที่เตรียมจากเส้นใยลูกปาล์ม ผลของพีเอช กำจัดสีได้ดีที่พีเอชต่ำ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นใกล้เคียงกัน พบว่าถ่านกัมมันต์ และ

ควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์เซลลูโลสที่เตรียมจากเส้นใยลูกปาล์มกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าในน้ำเสียจริง ควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์เซลลูโลสที่เตรียมจากเส้นใยลูกปาล์มกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ แต่ถ่านกัมมันต์กำจัดสีในน้ำเสียจริงได้ดีกว่าเส้นใยลูกปาล์ม โดยค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีของถ่านกัมมันต์ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงเท่ากับร้อยละ 81.3 และ 84.6 ตามลำดับ และของควอร์เทอร์ไนซ์โครสสลิงก์เซลลูโลสเส้นใยลูกปาล์มเท่ากับร้อยละ 99.9 และ 74.3 ตามลำดับ จากการศึกษาไอโซเทอมความสามารถในการดูดซับสีสูงสุดในน้ำเสียสังเคราะห์แบบสีเดียวและน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมของถ่านกัมมันต์เป็น 1,456 และ 438 กรัมSUต่อกรัมวัสดุ และความสามารถในการดูดซับสีสูงสุดของเส้นใยลูกปาล์มในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์แบบสีเดียว น้ำเสียสังเคราะห์แบบสีผสม และน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมเป็น 1,705, 780 และ 286 กรัมSUต่อกรัมวัสดุ อัตราค่าบำบัดสีเฉลี่ยในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมของถ่านกัมมันต์และเส้นใยลูกปาล์มเป็น 0.13 บาทต่อลิตร และ 1.35 บาทต่อลิตร ตามลำดับ

สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์ (2549) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ โดยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เส้นใยปาล์มที่ใช้มีขนาด 2.00 ถึง 4.67 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยใช้จาร์เทสต์กวนที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักและลักษณะทางกายภาพของวัสดุ พบว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยกำจัดทองแดง นิกเกิล และสังกะสีได้เท่ากับร้อยละ 82.58 ร้อยละ 90.98 และร้อยละ 94.46 ตามลำดับ ซึ่งเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด คือ กำจัดทองแดงได้ 8.68 มิลลิกรัมต่อกรัม กำจัดนิกเกิลได้ 3.77 มิลลิกรัมต่อกรัม และกำจัดสังกะสีได้ 6.72 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดของเส้นใยปาล์มมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักน้อยมาก ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.78 ซึ่งต่ำกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ (ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.27) แต่มีค่าสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.29) โดยจากการใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิว (BET) พบว่า ปริมาณพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับ

สภาพมีค่า 2.11 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าปริมาณพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (1.61 ตารางเมตรต่อกรัม) และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (1.93 ตารางเมตรต่อกรัม) สำหรับขนาดรูพรุนของเส้นใยปาล์มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยขนาดรูพรุนของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีขนาดเฉลี่ย 55.82 อังสตรอม ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ (เฉลี่ย 34.02 อังสตรอม) และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (เฉลี่ย 34.01 อังสตรอม) นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง พบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชัน -OH, -CH, -CH<sub>2</sub>O- และ C=C อีกด้วย

Garg และคณะ (2003) ศึกษาการกำจัดสีออกจากสารละลายโดยการดูดซับด้วยซีลี้อยู่ที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์และกรดซัลฟิวริก โดยสีที่ใช้ในงานวิจัย คือ มาลาไคท์กรีน (malachite green) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสีเริ่มต้นที่ใช้ ปริมาณตัวดูดซับ พีเอช และระยะเวลาการสัมผัส โดยนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของซีลี้อยู่ที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกสูงกว่าซีลี้อยู่ที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ โดยอัตราการดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6-9 ของทั้งซีลี้อยู่ที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์และกรดซัลฟิวริก จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับดังกล่าวสามารถดสีในสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแนะนำว่าควรทำการทดลองแบบทีละเทินถึงปฏิกิริยาที่มีการปั่นกววนด้วย

Garg และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับเฮกซะวาเลนตีโครเมียมจากสารละลายโดยใช้ซีลี้อยู่ที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์และกรดซัลฟิวริก ในการศึกษาได้ทำการแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนตีโครเมียมเริ่มต้น ปริมาณของตัวดูดซับ พีเอช และระยะเวลาการสัมผัส แล้วนำผลไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ปรับสภาพเหมือนกัน พบว่า ซีลี้อยู่ที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการดูดซับเฮกซะวาเลนตีโครเมียมสูงกว่าซีลี้อยู่ที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ อัตราการดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 3 ปริมาณของเฮกซะวาเลนตีโครเมียมที่ความเข้มข้นสูงสุดถูกแยกออกจากสารละลายภายใน 60 นาที จะเห็นได้ว่าซีลี้อยู่ที่นำมาปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์และกรดซัลฟิวริกมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาทำเป็นตัวดูดซับเฮกซะวาเลนตีโครเมียมออกจากสารละลายได้

Shukla และคณะ (2005) นำส่วนประกอบเส้นใยที่มีลิกนินและเซลลูโลสมาใช้ โดยนำกากมะพร้าวมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้แก่ นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) โดยนำ

กาบมะพร้าวที่นำมาปรับสภาพด้วยการออกซิไดส์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ผลการทดลองพบว่า กาบมะพร้าวที่นำมาปรับสภาพแล้วนั้นมีความสามารถสูงสุดในการกำจัดนิเกิล สังกะสี และเหล็ก ได้ 4.33, 7.88 และ 7.49 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ส่วน กาบมะพร้าวที่ไม่ปรับสภาพนั้นมีความสามารถสูงสุดในการกำจัดนิเกิล สังกะสี และเหล็ก ได้ 2.51, 1.83 และ 2.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อตัวดูดซับไม่สามารถทำงานได้จะนำมาฟื้นฟู (Regeneration) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

Tan และคณะ (2006) ได้ศึกษาสมดุลและจลศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเส้นใยปาล์มในการกำจัดสีเบสิก จากการศึกษา เส้นใยปาล์มที่เป็นของเหลือทิ้งทางการผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซียได้ถูกนำมาใช้ในการเตรียมเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมดุลและจลศาสตร์การดูดซับ โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าต่างๆ คือ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู และอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า ที่พีเอชเท่ากับ 6.5 ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษา ศึกษาการเข้าสู่สภาวะสมดุลของไอโซเทอมการดูดซับตามไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ฟรุนดริช เทมกิน และ Dubinin-Radushkevich พบว่าการเข้าสู่สมดุลเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยความสามารถในการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 277.78 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าจลศาสตร์ในการดูดซับเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสอง และยังได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ทางด้วยเทอร์โมไดนามิกส์ คือ เอนทัลปีที่สภาวะมาตรฐาน ( $\Delta H^\circ$ ) เอนโทรปีที่สภาวะมาตรฐาน ( $\Delta S^\circ$ ) และพลังงานอิสระที่สภาวะมาตรฐาน ( $\Delta G^\circ$ ) จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเส้นใยปาล์มสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Isa และคณะ (2008) ศึกษาการนำเส้นใยปาล์มที่เป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้มาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก เพื่อใช้ในการกำจัดเฮกซะวาเลนตีโครเมียมออกจากสารละลาย ในการดูดซับเฮกซะวาเลนตีโครเมียมโดยใช้เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ทำการทดลองแบบทีละเท ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดลองนี้ คือ พีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดเฮกซะวาเลนตีโครเมียมได้มากที่สุดจากสารละลายพบว่ามีค่าเท่ากับ 1.5 ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นเริ่มต้นของเฮกซะวาเลนตีโครเมียม ปริมาณตัวดูดซับตลอดจนระยะเวลาสัมผัสระหว่างเฮกซะวาเลนตีโครเมียมและตัวดูดซับ และการแยกเอาเฮกซะวาเลนตีโครเมียมออกจากเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพแล้วนั้นกระทำได้ง่าย จึงควรใช้เส้นใยปาล์มที่

ผ่านการปรับสภาพมาใช้ดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมออกจากสารละลายเพียงครั้งเดียวจะเหมาะสมกว่า

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า ได้มีการนำเอาเส้นใยปาล์มมาปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ หลากหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งในภาพรวมจะพบว่า เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพแล้วนั้นสามารถกำจัดมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสียออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การกำจัดจะเกิดประสิทธิภาพที่ดีได้นั้นจะต้องศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้วย ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทดลอง คือ พีเอช ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้น ตลอดจนอุณหภูมิที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำเสียนั้นๆ ว่าเป็นอย่างไร ซึ่งหากน้ำเสียมีลักษณะสมบัติเบื้องต้นที่เหมาะสมต่อการบำบัด ก็จะเป็นการง่ายที่จะควบคุมและดำเนินการในการบำบัด ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยลงในการปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสมก่อนการบำบัด และประหยัดระยะเวลาในการดำเนินการ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมระหว่างเส้นใยปาล์มที่ไม่ได้ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 1 และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 การวิจัยนี้นับเป็นการนำของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย

#### 3.1 แผนการวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เตาอบ (air oven)
- 2) เตาเผา (muffle furnace)
- 3) ขวดรูปชมพู่
- 4) ขวดพิกโนมิเตอร์
- 5) เครื่องวัดพีเอช
- 6) เครื่องบดวัสดุ
- 7) เครื่องชั่งละเอียด
- 8) เครื่องเขย่าแบบวง (orbital shaker)
- 9) เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve Shaker)
- 10) เครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
- 11) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
- 12) เครื่องยูวีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV spectrophotometer)
- 13) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของสาร (Surface Area Size Analyzer)

##### 3.1.2 สารเคมี

- 1) วัตถุดิบ: เส้นใยปาล์ม ได้จากโรงงานบีบน้ำมันปาล์ม จังหวัดตรัง
- 2) สีย้อม: กลุ่มสีย้อมเบสิก 2 ชนิด ได้แก่

- สีเมทิลีนบลู
- สีมาลาไคท์กรีน

3) สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม

- กรดซัลฟิวริก( $H_2SO_4$ )
- ฟอรั่มัลดีไฮด์ ( $CH_2O$ )
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )

5) สารเคมีอื่นๆ

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ )
- สารละลายอะซิเตตบัพเฟออร์ และฟอสเฟตบัพเฟออร์

### 3.1.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรอิสระ</b> 1. การปรับสภาพวัสดุ 2. ชนิดของสีย้อม 3. พีเอช 4. ระยะเวลาสัมพัทธ์ 5. ความเข้มข้นของสีย้อม 6. ปริมาณของเส้นใยปาล์ม	- ไม่ผ่านการปรับสภาพ - ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 - ปรับสภาพด้วยฟอรั่มัลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 1 - ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 - มาลาไคท์กรีน - เมทิลีนบลู - 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 - 20, 40, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที - 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร - 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัม
<b>ตัวแปรคงที่</b> 1. ชนิดของวัสดุ 2. ปริมาณน้ำเสีย 3. อัตราเร็วในการกวน 4. อุณหภูมิ	- เส้นใยปาล์ม - 100 มิลลิลิตร - 160 รอบต่อนาที - 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย (ต่อ)

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรตาม</b> 1. ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด 2. ความสามารถในการกำจัดสีย้อม	- ปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ - ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม

### 3.1.4 ลำดับขั้นการวิจัย

การวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

- 1) การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 2) การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ ไม่ผ่านการปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 3) การศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ
- 4) การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์
- 5) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่
  - พีเอช
  - ระยะเวลาสัมผัส
  - ความเข้มข้นเริ่มต้น
  - ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้
- 6) ศึกษาไอโซเทอมของการกำจัดสีย้อมของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ

## 3.2 การดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 การเตรียมวัสดุเบื้องต้น

นำเส้นใยปาล์มไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บใส่ถุง ผนึกปากถุงให้แน่นไม่ให้อากาศเข้า



### 3.2.2 การปรับสภาพเส้นใยปาล์ม แบ่งการปรับสภาพเส้นใยปาล์มออกเป็น 4 วิธี คือ

#### 3.2.2.1 เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ (เกศสุชา พูลคำ, 2537)

นำเส้นใยปาล์มมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชประมาณ 6-7 แล้วนำไปอบในเตาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

#### 3.2.2.2 เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 (Isa, 2008)

1. นำเส้นใยปาล์มที่ทำให้แห้งแล้วนั้นมาผสมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98
2. ให้ความร้อนในเตาเผาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
3. นำเส้นใยออกจากเตาเผา นำมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. ล้างด้วยน้ำกลั่น 5-6 ครั้ง
5. นำไปแช่ในโซเดียมไบคาร์บอเนตเข้มข้นร้อยละ 1 ค้างไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดกรดส่วนเกินออก
6. แยกส่วนที่เป็นของเหลวออกไป และส่วนที่เป็นของแข็งจะถูกนำไปทำให้แห้งในเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

#### 3.2.2.3 เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 1 (Garg และคณะ, 2003)

1. นำเส้นใยปาล์มมาผสมกับสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 1 อัตราส่วน 1:5 (น้ำหนักต่อปริมาตร)
2. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
3. กรองแยกเอาส่วนของเหลวออก และส่วนที่เป็นเส้นใยปาล์มนำไปล้างน้ำกลั่น 5-6 ครั้ง แล้วนำไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

#### 3.2.2.4 เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Shukla และคณะ, 2005)

1. นำเส้นใยปาล์ม 100 กรัม ใส่ในสารละลาย 2 ลิตร ซึ่งมีส่วนประกอบของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15 กรัมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง
2. โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนถึง 85 องศาเซลเซียส ในเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

### 3.2.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของเส้นใยพาล์มที่ปรับสภาพ

พารามิเตอร์ตามวิธีการวิเคราะห์ต่างๆ ดังสรุปในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปพารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความถ่วงจำเพาะ	ขวดพิคโนมิเตอร์
การบวมน้ำ	กระบอกตวง
การศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของสาร (BET Surface Area Analyzer)
การศึกษาลักษณะพื้นผิว	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
การศึกษาลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ	เครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (FTIR)
ค่า Point of Zero Charge ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ )	Batch equilibrium technique
การวัดค่าสี - มาลาโคท์กรีน - เมทิลีนบลู	เครื่องยูวีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ - ที่ความยาวคลื่น 617 นาโนเมตร - ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร

#### 3.2.3.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific density)

นำเส้นใยพาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ มาหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ ดังนี้คือ

1. ชั่งน้ำหนักขวดเปล่าพร้อมฝาขวด (A)
2. ใส่เส้นใยพาล์มที่ปรับสภาพแล้วลงในขวดแล้วชั่งน้ำหนักรวม (B)
3. เติมน้ำลงไปให้เต็มขวด ปิดฝา แล้วชั่งน้ำหนักรวมอีกครั้ง (C)
4. นำขวดไปล้างให้สะอาด จากนั้นนำมาใส่น้ำให้เต็มขวดโดยที่ไม่มีเส้นใยพาล์มแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (D)

$$5. \text{การคำนวณ ค่าความถ่วงจำเพาะ} = (B - A) / (D - C)$$

### 3.2.3.2 การศึกษาค่าการบวมน้ำ

นำเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ มาหาค่าการบวมน้ำ ดังนี้คือ

1. นำเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพแล้วมาตวงปริมาตร บันทึกปริมาตร (A)
2. ใส่น้ำให้ท่วมวัสดุ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง บันทึกปริมาตรอีกครั้ง (B)
3. คำนวณ การบวมน้ำ =  $B / A$

### 3.2.3.3 การศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

นำเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของวัสดุ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของสาร (Surface Area Size Analyzer, BET)

### 3.2.3.4 การศึกษาลักษณะพื้นผิว

นำเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของพื้นที่ผิวของการปรับสภาพแต่ละวิธี เช่น ความลึกของรอยบนผิว ปริมาตรร่องบนพื้นผิว เป็นต้น

### 3.2.3.5 การศึกษาลักษณะโครงสร้าง

นำเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ไปทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันเพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างโดยใช้เครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (FTIR)

### 3.2.3.6 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว (Point of Zero Charge ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ )) ด้วยวิธี Batch equilibrium technique (Smiciklas และคณะ, 2000)

1. เตรียมสารละลายไปแตสเซียมนิเตรต 0.10 นอร์มัล แล้วปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเป็น 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11.5 ด้วยกรดไนตริก 0.1 นอร์มัล หรือสารละลายเบสไปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล
2. เติมเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพปริมาณ 0.04 กรัม ลงในสารละลายไปแตสเซียมนิเตรต 0.1 นอร์มัล ที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่างๆ ดังข้อ 1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ในขวดขนาด 25 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่น แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. เก็บตัวอย่างสารละลายมาทำการปั่นเหวี่ยงที่ 4,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วแยกส่วนใสไปวัดพีเอชสุดท้ายของสารละลาย

4. นำค่าพีเอชที่วัดได้มาพล็อตกราฟระหว่างพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไป-แอสซีเอ็มในเตรตก่อนเติมเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ กับค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลายไป-แอสซีเอ็มในเตรตหลังเติมเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ เพื่อหาค่าประจุบนพื้นผิว

### 3.2.4 การวัดค่าสี

สีเบสิกที่ใช้มี 2 ชนิด คือ สีเมทิลีนบลู และสีมาลาโคท์กรีน วัดค่าสีที่ความยาวคลื่น 660 และ 617 นาโนเมตร ตามลำดับ ในหน่วย SU โดยใช้เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยทำการภาพมาตรฐานในการวัดสี ดังนี้

#### 3.2.4.1 การทำการภาพมาตรฐานของสีเมทิลีนบลู

1. นำสารละลายสีเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร

2. นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และค่าความเข้มข้นของสีเมทิลีนบลูซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

#### 3.2.4.2 การทำการภาพมาตรฐานของวัดสีมาลาโคท์กรีน

1. นำสารละลายสีมาลาโคท์กรีนที่มีความเข้มข้น 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 617 นาโนเมตร

2. นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสีมาลาโคท์กรีนออกซาเลต ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.2.5 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

1. ชั่งเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ให้ได้น้ำหนัก 0.4 กรัม
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 7 (ควบคุมพีเอชให้เท่ากับ 7 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์)
3. ทำการกวนด้วยอัตราเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. กรองเอาวัสดุออก แล้วนำสารละลายที่เหลือไปวัดค่าสี แล้วบันทึกผล

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ และเลือกวิธีการปรับสภาพเส้นใยปาล์มที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสี เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

### 3.2.6 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.2.6.1 การแปรผันพีเอช

1. ชั่งเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพให้ได้น้ำหนัก 0.4 กรัม
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ (ควบคุมพีเอช 2-6 โดยใช้อะซิเตตบัฟเฟอร์ และพีเอช 7-9 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์)
3. ทำการกวนด้วยอัตราเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. กรองเอาวัสดุออก แล้วนำสารละลายที่เหลือไปวัดค่าสี แล้วบันทึกผล

#### 3.2.6.2 การแปรผันระยะเวลาสัมผัส

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.6.1
3. ใส่เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพแล้วปริมาณ 0.4 กรัม
4. ทำการกวนด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20, 40, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
5. กรองเอาวัสดุออก แล้วนำสารละลายที่เหลือไปวัดค่าสี บันทึกผล

#### 3.2.6.3 การแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้น

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.6.1
3. ใส่เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพแล้วปริมาณ 0.4 กรัม
4. ทำการกวนด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาตามผลการทดลองที่ได้ในข้อ 3.2.6.2 ที่อุณหภูมิห้อง
5. กรองเอาวัสดุออก แล้วนำสารละลายที่เหลือไปวัดค่าสี และบันทึกผล

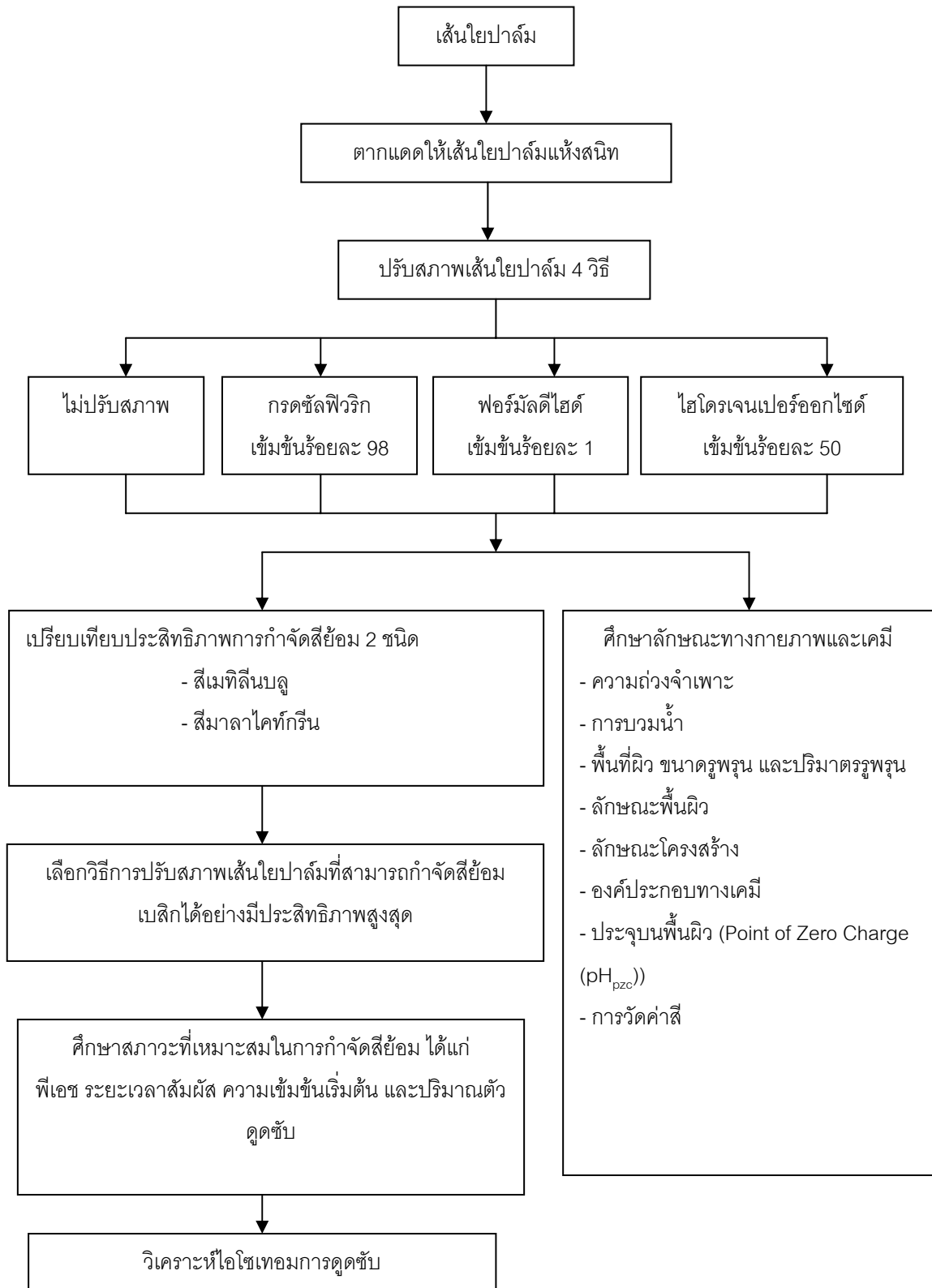
### 3.2.6.4 การแปรผันปริมาณตัวดูดซับ

1. ชั่งเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ให้ได้น้ำหนัก 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.6.1
3. ทำการกวนด้วยอัตราเร็ว 160 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาตามผลการทดลองที่ได้ในข้อ 3.2.6.2 ที่อุณหภูมิห้อง
4. กรองเอาวัสดุออก แล้วนำสารละลายที่เหลือไปวัดค่าสี แล้วบันทึกผล

### 3.2.7 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

1. ชั่งเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพแล้วให้ได้น้ำหนัก 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.6.1
3. ทำการกวนด้วยอัตราเร็ว 160 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาตามผลการทดลองที่ได้ในข้อ 3.2.6.2 ที่อุณหภูมิห้อง
4. กรองเอาวัสดุออก แล้วนำสารละลายที่เหลือไปวัดค่าสี แล้วบันทึกผล
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1. – 4. โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 100, 150, 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และเปลี่ยนชนิดของสีย้อม
8. วิเคราะห์หาไอโซเทอมโดยใช้สมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชและแลงเมียร์

### 3.3 สรุปแผนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 สรุปแผนการดำเนินการวิจัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากเส้นใยปาล์มเพื่อใช้ในการกำจัดสีข้อมเบสิกในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิว จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการตามลำดับขั้นตอนที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ แยกเป็นแต่ละการทดลองตามลำดับ ดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของเส้นใยปาล์ม

เส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ นำมาจากโรงงานบีบน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานจากกระบวนการบีบน้ำมันปาล์ม โดยเส้นใยปาล์มที่เก็บมาจากโรงงานมีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เส้นใยปาล์มที่นำมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า เส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลองเมื่อนำมาตากแดดจะมีน้ำหนักที่สูญเสียไปร้อยละ 10 (ตารางที่ ก.1) ซึ่งน้ำหนักที่หายไปนั้นเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำจากการระเหยออกไปจากเส้นใยปาล์มเมื่อถูกความร้อนจากแสงแดด ทำให้น้ำหนักของเส้นใยปาล์มหลังการตากแดดหายไปเล็กน้อย และจากตารางที่ 4.1 ได้แสดงชนิดองค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งเส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลองจัดเป็นของเสียซึ่งคิดเป็นปริมาณร้อยละ 13 ที่เกิดจากการผลิตน้ำมันปาล์ม ดังแสดงในตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบต่างๆ ของเส้นใยปาล์มจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

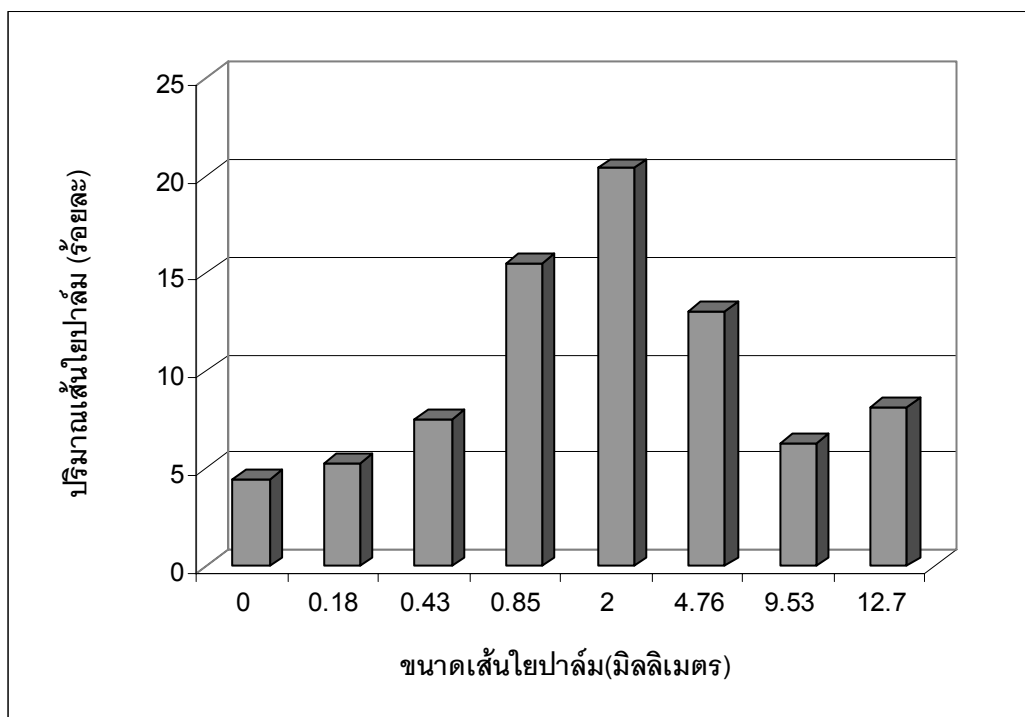
ชนิดขององค์ประกอบ	ร้อยละ
ทะลายเปล่า	59
น้ำมัน	18
เส้นใยปาล์ม	13
กะลา	7
ความชื้น	3
รวม	100

ที่มา: ข้อมูลจากโรงงานผลิตปาล์มน้ำมัน ในจังหวัดตรัง

ในการวิจัยนี้ได้นำเส้นใยปาล์มมาแยกขนาดตามขนาดของตะแกรงเบอร์ต่างๆ เพื่อให้ทราบการกระจายขนาดคละของตัวอย่าง (ตารางที่ ก.2) ทำให้ได้เส้นใยปาล์มที่มีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งพบว่าเส้นใยปาล์มมีขนาดมากที่สุดในช่วง 2 ถึง 4.76 มิลลิเมตร (ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 10) โดยคิดเป็นปริมาณร้อยละ 20.37 ของเส้นใยปาล์มทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรง (สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์, 2549)

ขนาดตะแกรง		เส้นใย		เศษเม็ดเปลือกปาล์ม		รวม	%
เบอร์ตะแกรง	มิลลิเมตร	กรัม	%	กรัม	%		
1/2 นิ้ว	12.70	51.80	8.16	25.30	3.98	77.10	12.14
3/8 นิ้ว	9.53	40.20	6.33	34.10	5.37	74.30	11.70
เบอร์ 4	4.76	83.19	13.10	62.60	9.86	145.79	22.96
เบอร์ 10	2.00	129.33	20.37	0	0.00	129.33	20.37
เบอร์ 20	0.85	98.53	15.52	0	0.00	98.53	15.52
เบอร์ 40	0.43	47.83	7.53	0	0.00	47.83	7.53
เบอร์ 80	0.18	33.55	5.28	0	0.00	33.55	5.28
ถาดรองผ่านเบอร์ 80	0	28.52	4.49	0	0.00	28.52	4.49
รวม		512.95	80.78	122	19.21	634.95	100.0



รูปที่ 4.2 ปริมาณของเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรง

#### 4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุดูดซับจากเส้นใยปาล์ม

วัสดุดูดซับที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ โดยใช้สารเคมีเป็นตัวปรับสภาพ ทำให้ได้วัสดุดูดซับ 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ได้แก่ เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น มีลักษณะที่แตกต่างไปจากเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กล่าวคือ จะมีลักษณะเป็นผงละเอียด และมีสีดำ ค้ำยถ่าน ในขณะที่เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะเป็นเส้นใย สำหรับลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ทำการศึกษา ได้แก่ การหาค่าความถ่วงจำเพาะ การศึกษาค่าการบวมน้ำ การศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน ลักษณะพื้นที่ผิว ลักษณะโครงสร้าง และการวิเคราะห์หาค่าประจุบนพื้นผิว (Point of Zero Charge ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ )) ซึ่งผลการทดลองที่ได้ดังจะกล่าวต่อไปนี้



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4.3 วัสดุดูดซับที่ได้จากการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยวิธีต่างๆ ก) ไม่ปรับสภาพ ข) ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ค) ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ ง) ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

#### 4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific density)

ผลการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 4 วิธี (ตารางที่ 4.3 และผลการทดลองโดยละเอียดในตารางที่ ข.1) พบว่า การปรับสภาพนั้นส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยปาล์ม โดยเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุด คือมีค่าเท่ากับ 1.7 รองลงมาคือ เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.3 ส่วนเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นมีความถ่วงจำเพาะต่ำสุด โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.9 ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่สารเคมีแต่ละประเภทที่ใช้ในการปรับสภาพเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของเส้นใยปาล์ม ตามลำดับ (สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์, 2549)

#### 4.2.2 การบวมน้ำ

จากตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ ข.2 พบว่าเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าการบวมน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 1.46 รองลงมาคือ เส้นใยที่ไม่ปรับสภาพเท่ากับ 1.09

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 1.03 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการบวมน้ำเล็กน้อย ส่วนเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าการบวมน้ำเท่ากับ 1.0 แสดงให้เห็นว่า เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นไม่มีการบวมน้ำ นั่นคือ ไม่มีการดูดซึมน้ำเข้าไปเก็บไว้ในตัวของวัสดุ ซึ่งการบวมตัวของเส้นใยนั้น เป็นการเก็บน้ำเข้าไปในตัวของเส้นใย ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ในโครงสร้าง ดังนั้นปริมาณน้ำที่ถูกเก็บไว้หรือการบวมน้ำ จะเพิ่มตามความสามารถในการดูดซับได้ (ชัชฎาพร องอาจ, 2545)

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปาล์มในเรื่องความถ่วงจำเพาะและการบวมน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความถ่วงจำเพาะและการบวมน้ำของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย	ความถ่วงจำเพาะ	การบวมน้ำ
ไม่ปรับสภาพ	1.3	1.09
กรดซัลฟิวริก	1.7	1.00
ฟอร์มัลดีไฮด์	1.3	1.03
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0.9	1.46

#### 4.2.3 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

จากผลการศึกษาพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของสาร (BET) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และผลการวิเคราะห์โดยละเอียดในรูปที่ ข.1 – ข.4 (ภาคผนวก ข) พบว่า การปรับสภาพเส้นใยปาล์มโดยใช้สารเคมีนั้น ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ กล่าวคือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีพื้นที่ผิวในปริมาณมากที่สุด คือ 8.77 ตารางเมตรต่อกรัม รองลงมาคือ เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 6.86 ตารางเมตรต่อกรัม เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเท่ากับ 6.55 ตารางเมตรต่อกรัม และเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก 3.14 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดรูพรุนของเส้นใยมีความแตกต่างกันโดยมีค่าจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ดังนี้คือ เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 71.88 อังสตรอม เส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 68.98 อังสตรอม เส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 56.22 อังสตรอม และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีขนาดรูพรุนน้อยที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 49.32 อังสตรอม

จะเห็นได้ว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี BET แต่พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเบสิกสูงที่สุด จากการวิเคราะห์ผล สามารถกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่ทำให้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถดูดซับสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดี ทั้งที่มีพื้นที่ผิวค่อนข้างน้อย อาจเนื่องมาจากวิธีการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน หรือประจุบนพื้นผิวของเส้นใยปาล์ม ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้ดี โดยที่พื้นที่ผิวไม่ได้เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย ดังนั้น จึงต้องทำการวิเคราะห์และศึกษาปัจจัยอื่นๆ ซึ่งมีผลทำให้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

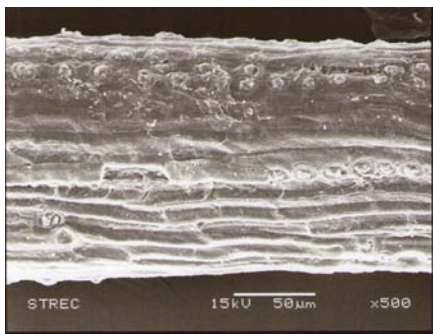
ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./ก.)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม, Å)
ไม่ปรับสภาพ	6.55	0.0092	56.22
กรดซัลฟิวริก	3.14	0.0041	68.98
ฟอร์มัลดีไฮด์	6.86	0.0123	71.88
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	8.77	0.0108	49.32

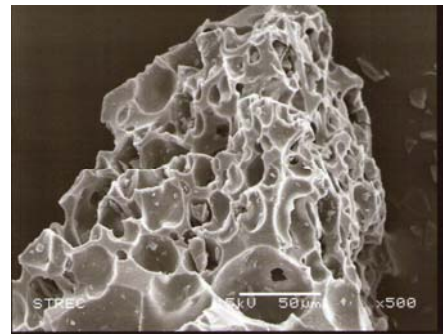
#### 4.2.4 ลักษณะพื้นผิว

จากการศึกษาพบว่า การปรับสภาพเส้นใยปาล์มโดยใช้สารเคมีนั้นมีผลต่อลักษณะของพื้นผิว รวมถึงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปาล์ม ดังรูปที่ 4.3 ที่ได้แสดงไปแล้ว กล่าวคือ ลักษณะของสีที่เปลี่ยนแปลงไป โดยสังเกตได้ว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์มีสีที่ไม่แตกต่างจากเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ ส่วนเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าสีของเส้นใยปาล์มจะมีสีที่อ่อนลงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ได้ปรับสภาพ ส่วนเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเจน กล่าวคือ เปลี่ยนเป็นสีดำ มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งเปลี่ยนรูปไปจากการเป็นเส้นใยก่อนที่จะทำการปรับสภาพ และเมื่อนำเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาศึกษาพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดรูพรุนและพื้นผิวที่ขรุขระขึ้นในปริมาณที่มากกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงในเรื่องของโครงสร้างของเส้นใยและรูปร่างที่ยังคงความเป็น

เส้นใยปาล์มอยู่ แต่เมื่อเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนนั้นจะพบว่าเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีรูพรุนขนาดใหญ่และมีความลึกของรูพรุนและร่องลึกค่อนข้างมาก ในขณะที่เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์จะมีรูพรุนและกลุ่มของเส้นใยที่ปิดรูพรุนอยู่ปนกันในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยขนาดของรูพรุนจะไม่ใหญ่และลึกเท่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพนั้นจะพบรูพรุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยพื้นที่ของรูพรุนส่วนมากจะถูกกลุ่มของเส้นใยปิดทับและรูพรุนจะมีความลึกน้อย



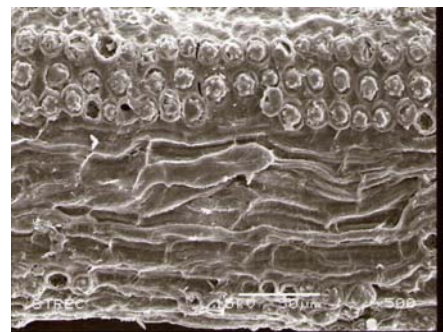
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 เท่า

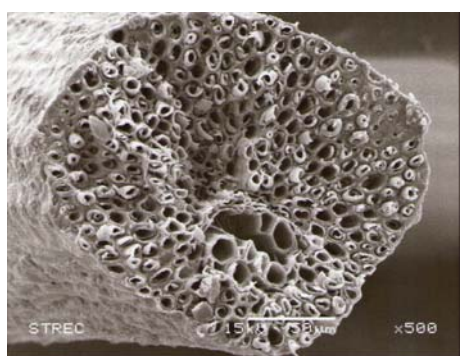
ก) ไม่ปรับสภาพ ข) ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ค) ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์

ง) ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สำหรับในส่วน of เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น จะมีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมากที่สุด และมีความลึกของรูพรุนมากที่สุด แต่จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดส่องดูเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในหลายๆ ส่วน จะพบว่ามีส่วนที่เกิดรูพรุนจำนวนมาก และมีบางส่วนก็เกิดรูพรุนจำนวนน้อย หรือไม่มีรูพรุนเลย และยังพบว่าตัววัสดุมีสารเคมีมาเคลือบที่พื้นผิวด้วย ซึ่งในส่วนนี้ อาจเป็นไปได้ว่า ทำให้เส้นใย

ปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นมีโครงสร้างที่เอื้อต่อการดูดติดผิว ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีอื่น

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงภาคตัดขวางของเส้นใยปาล์มที่นำมาจากโรงงาน ซึ่งพบว่า ลักษณะเบื้องต้นของเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะของภาคตัดขวางที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ส่วนเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นไม่สามารถดูภาคตัดขวางได้ เพราะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ทำให้ไม่สามารถผ่าออกเป็นสองส่วนได้ แต่จากการดูลักษณะพื้นผิว ก็สามารถคาดเดาได้ว่าจะมีรูพรุนอยู่เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 4.5 ภาคตัดขวางของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ (ที่กำลังขยาย 500 เท่า)

#### 4.2.5 ลักษณะโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์หาโครงสร้างของเส้นใยปาล์ม โดยเครื่องวิเคราะห์หมู่โครงสร้าง (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) (รูปที่ 4.6 – 4.9) พบว่า เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีโครงสร้างหลักที่เหมือนกันคือ หมู่อัลคิล หมู่อัลคีน หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล และหมู่ซัลโฟนิกเอซิด

จากผลการศึกษาโครงสร้าง พบว่า เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ในเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

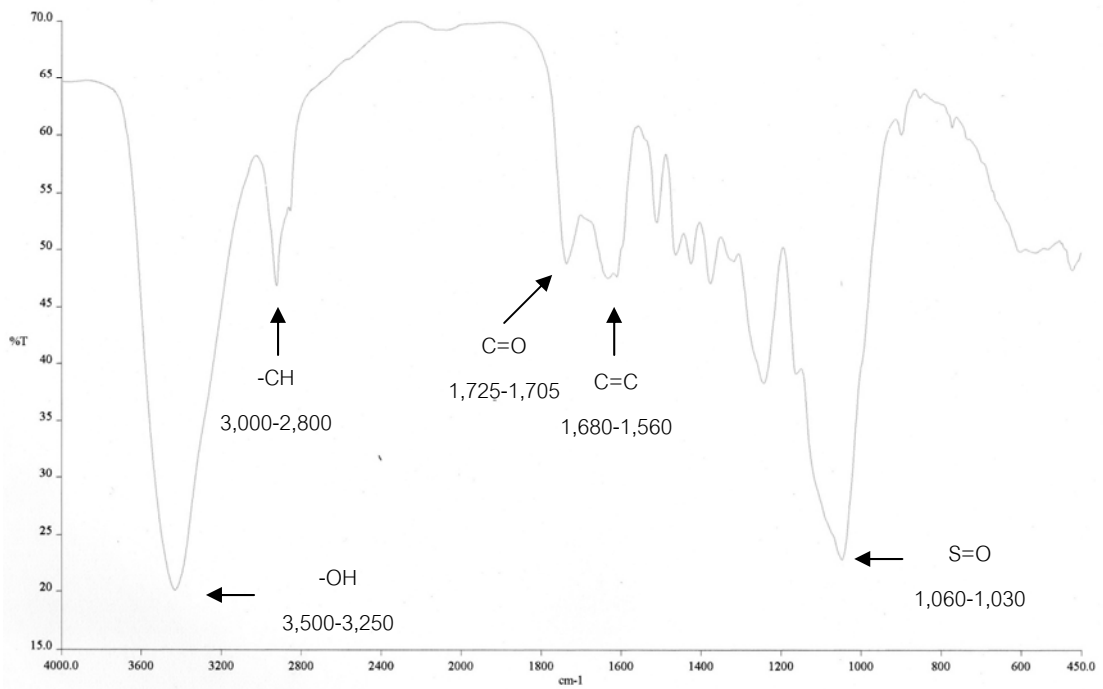
ตารางที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชันที่พบในเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ

หมู่ฟังก์ชัน	สูตรโครงสร้าง	ช่วงความถี่ (cm <sup>-1</sup> )
ไฮดรอกซิล	-OH	3,500-3,250
คาร์บอนิล	C=O	1,725-1,705
อัลคิล	-CH	3,000-2,800
อัลคีน	C=C	1,680-1,560
หมู่ซัลโฟนิกเอซิด	S=O	1,060-1,030

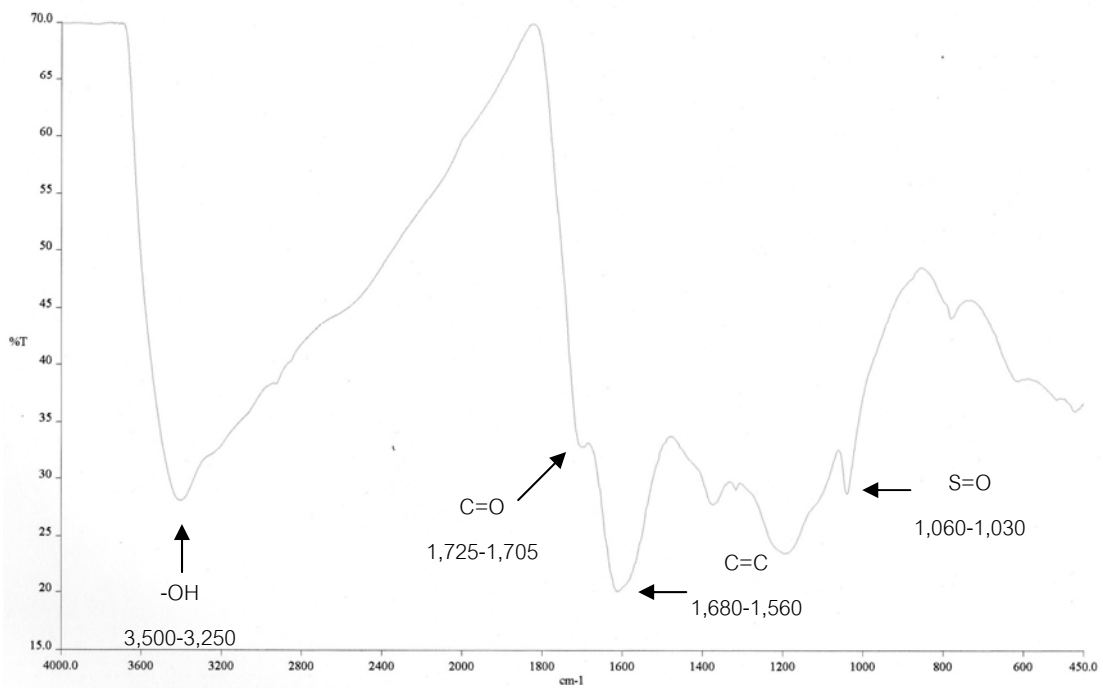
ซึ่งจะพบว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น จะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พบดังกล่าวในปริมาณที่สูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีอื่น ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 4.6 – 4.9 (ผลวิเคราะห์โดยละเอียดในรูปที่ ข.5-ข.8) กล่าวคือ ในรูปที่ 4.7 ที่เป็นการดูดซับในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก จะเห็นว่าปริมาณการดูดซับจะมีค่าสูง (ร้อยละแสงที่ส่องผ่านจะมีค่าน้อย(%T)) สังเกตได้จากเส้นกราฟที่มียอดกราฟที่มาก ในขณะที่เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีลักษณะของเส้นกราฟที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งในส่วนนี้สามารถกล่าวได้ว่า เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่า เพราะว่ามีปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวในปริมาณที่มาก ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนประจุ และยึดเกาะกับโมเลกุลของสีย้อมเบสิกให้มาติดติดผิวที่พื้นผิวของวัสดุได้เป็นจำนวนมาก

เมื่อนำผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า หมู่ฟังก์ชันที่พบมีความคล้ายคลึงกัน โดยพบว่า ในงานวิจัยของสิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์ (2549) หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีโครงสร้างหลักที่เหมือนกันคือ หมู่อัลคิล หมู่ไฮดรอกซิลหรือส่วนประกอบของอะมิโน (Hydroxy or Amino compound) และอะลิฟาติกแอลกอฮอล์ (Aliphatic Alcohol) ส่วนที่แตกต่างกันคือ อะโรมาติกแอลกอฮอล์ (Aromatic Alcohol) ซึ่งจะพบอยู่ในเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเท่านั้น ส่วนในงานวิจัยของลัดดา ยาวิรัช พบโครงสร้างหลักของเส้นใยปาล์ม ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH), หมู่อัลคิล (-CH และ -CH<sub>2</sub>O) และหมู่อัลคีน (C=C) ของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการทำควอร์เทอร์ไนซ์ครอสลิงก์สูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ได้ปรับสภาพ แต่ในงานวิจัยนี้มีส่วนที่ต่างกัน คือ พบหมู่ฟังก์ชันของหมู่ซัลโฟนิกเอซิดเพิ่มเติมด้วย

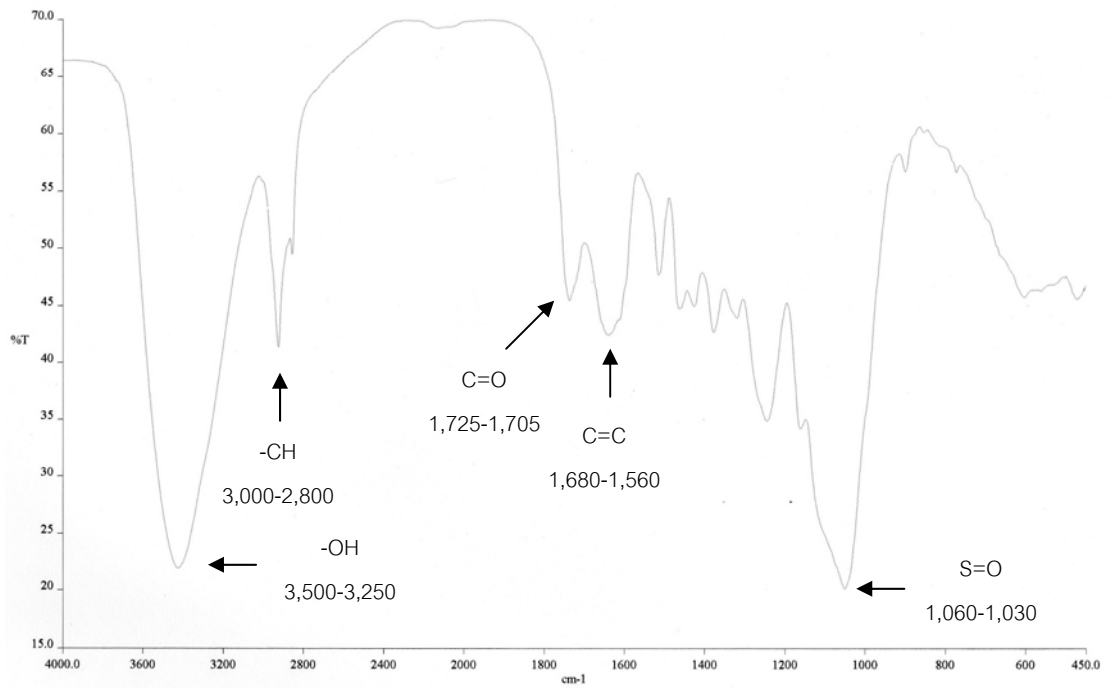




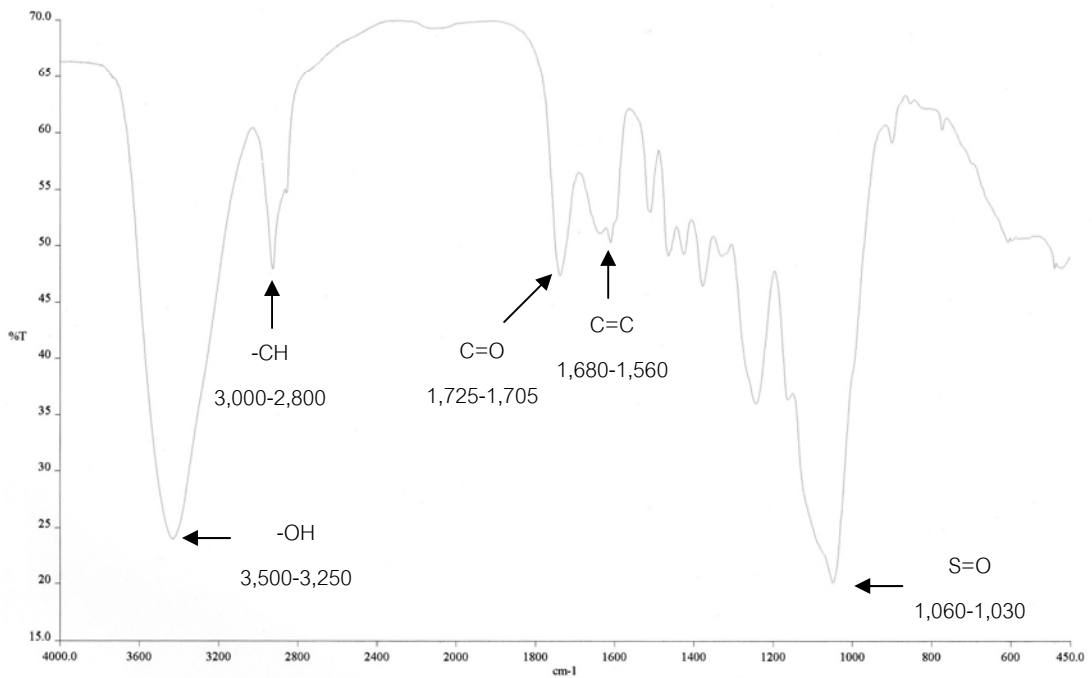
รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยพอลิแอมที่่ไม่ปรับสภาพ



รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยพอลิแอมที่่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก



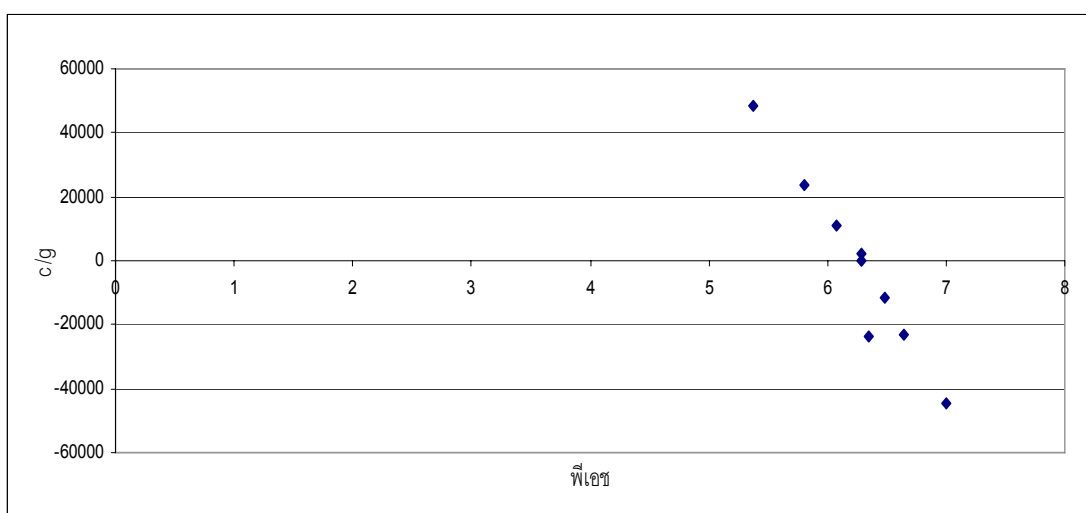
รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยพอลิมที่ปรับสภาพด้วยพอร์มัลดีไฮด์



รูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยพอลิมที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

#### 4.2.6 ค่าประจุบนพื้นผิว (Point of Zero Charge ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ))

จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าประจุบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ พบว่า เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไม่สามารถนำมาหาค่าประจุบนพื้นผิวได้ เนื่องจากว่าตัววัสดุมีขนาดที่ใหญ่เกินไป ดังนั้น จึงได้ทำการหาค่า Point of Zero Charge ของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเพียงชนิดเดียวซึ่งผลที่ได้ แสดงในรูปที่ 4.10 จากข้อมูลที่ได้ พบว่า เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าประจุบนพื้นผิวสมดุลที่พีเอชเท่ากับ 6.29



รูปที่ 4.10 ประจุบนพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

#### 4.3 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองนี้เป็นการทดลองนำวัสดุดูดซับที่เตรียมจากเส้นใยปาล์มทั้ง 4 ชนิด มาทดลองเพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเบสิก 2 ชนิด คือ สีมาลาโคท์กรีน และสีเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้เท่ากับ 7 โดยควบคุมพีเอชให้คงที่โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นตัวควบคุม ทำการทดลองแบบที่ละเท โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เป็นปริมาตร 100 มิลลิลิตร และใส่สารดูดซับปริมาณ 0.4 กรัม จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที นำมาวัดพีเอชอีกครั้ง และหาความเข้มข้นของสีที่เหลืออยู่ในน้ำและที่ถูกรักษาโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำมาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นดังกล่าว แล้วนำผลที่ได้ของวัสดุดูดซับทั้ง 4 ชนิด มาเปรียบเทียบกัน ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.6

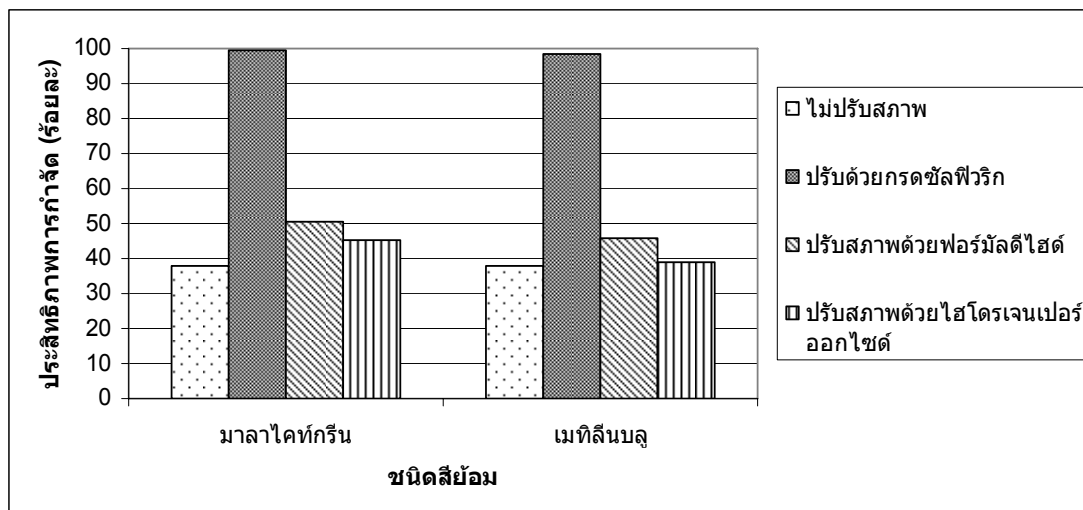
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ

ชนิดสีย้อม	ชนิดเส้นใยปาล์ม	พีเอช		ความเข้มข้นสีย้อม(มก./ล.)			ร้อยละการกำจัด
		ก่อน	หลัง	เริ่มต้น	คงเหลือ	สีที่ถูกกำจัด	
มาลาโคท์กรีน	ไม่ปรับสภาพ	7.00	7.02	248.00	153.49	94.51	38.11±1.012
	ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก	7.00	7.01	248.00	1.24	246.76	99.50±0.234
	ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์	7.00	7.05	248.00	122.66	125.34	50.54±1.235
	ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	7.00	7.05	248.00	136.20	111.80	45.08±1.364
เมทิลีนบลู	ไม่ปรับสภาพ	7.00	7.00	248.00	154.01	93.99	37.90±0.198
	ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก	7.00	7.03	248.00	4.46	243.54	98.20±0.779
	ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์	7.00	7.02	248.00	134.32	113.68	45.84±0.640
	ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	7.00	7.06	248.00	151.28	96.72	39.00±0.410

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของวัสดุดูดซับทั้ง 4 แบบ ดังรูปที่ 4.11 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเบสิก 2 ชนิด คือ สีมาลาโคท์กรีน และ สีเมทิลีนบลู ของเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ 38.11 และ 37.90 ตามลำดับ เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.50 และ 98.20 ตามลำดับ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 50.54 และ 45.84 ตามลำดับ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 45.08 และ 39.00 ตามลำดับ จะเห็นว่า เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุด เมื่อเทียบเปรียบเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ดังนั้น จึงได้ทำการคัดเลือกเอาเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมาทำการทดลองในขั้นต่อไป ในเรื่องการหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ พีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และปริมาณตัวดูดซับ เพื่อที่จะหาว่าที่สภาวะใดที่ทำให้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพสามารถดูดซับสี

ย่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และปัจจัยที่ทำการศึกษาส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอย่างไรบ้าง



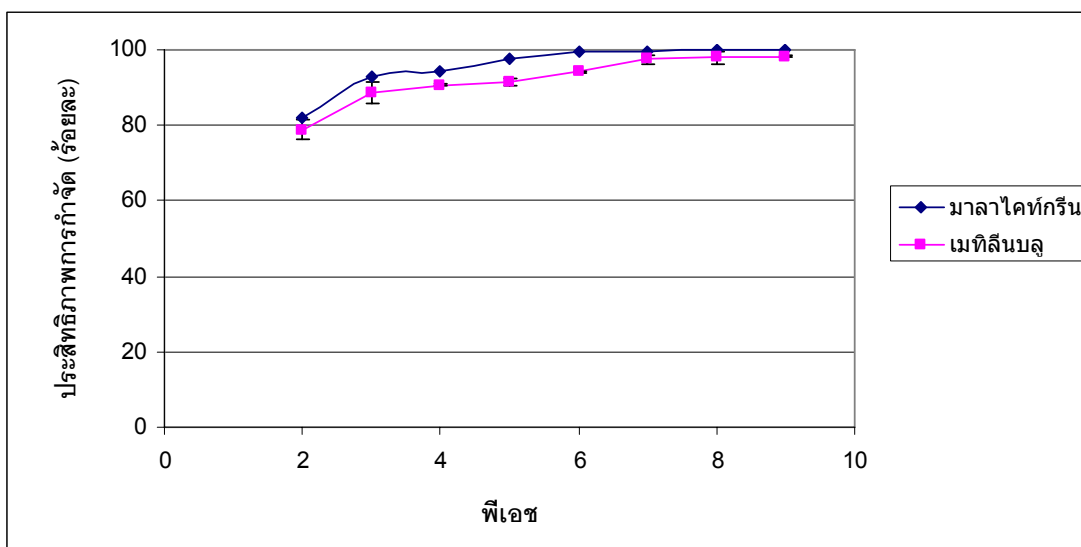
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ

#### 4.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

##### 4.4.1 การแปรผันพีเอช

ในการทดลองเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมเบสิกออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก โดยในการทดลองได้ทำการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง 8 ค่า คือ พีเอชเท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ ใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 0.4 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของน้ำเสียสังเคราะห์

การเปลี่ยนแปลงของพีเอชก่อนและหลังการเติมเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่า พีเอชหลังการเติมเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากได้มีการเติมบัฟเฟอร์เพื่อควบคุมไม่ให้พีเอชเปลี่ยนแปลงเพื่อที่จะได้ทราบถึงสภาวะนั้นจริงๆ ว่าการกำจัดสีย้อมมีประสิทธิภาพมากเพียงใด โดยบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการควบคุมพีเอช ได้แก่ อะซิเตตบัฟเฟอร์ควบคุมพีเอชในช่วง 2-6 และฟอสเฟตบัฟเฟอร์ใช้ควบคุมพีเอชในช่วง 7-9 ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12 และตารางที่ ค.1



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกที่พีเอชต่างๆ โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ส่วนไอออนชนิดอื่นๆ ที่มีความสามารถดูดติดผิววัสดุดูดซับได้นั้น มีผลมาจากพีเอชในสารละลาย

จากผลการทดลอง ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวสีย้อมนั้นเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งในกระบวนการกระตุ้นเส้นใยปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น จะทำให้เกิดกลุ่มฟังก์ชัน (Functional Group) หลายชนิดที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ จากการทดลองพบว่า พีเอชของสารละลายหลังจากใส่สารดูดซับที่ปริมาณต่างๆ ลงไปแล้วทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชลดลง ผลของพีเอชที่มีต่อร้อยละการกำจัดสีย้อมเบสิกของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก จากเส้นกราฟ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่พีเอชในช่วง 6-9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเบสิกสูงกว่าในช่วงพีเอช 2-5

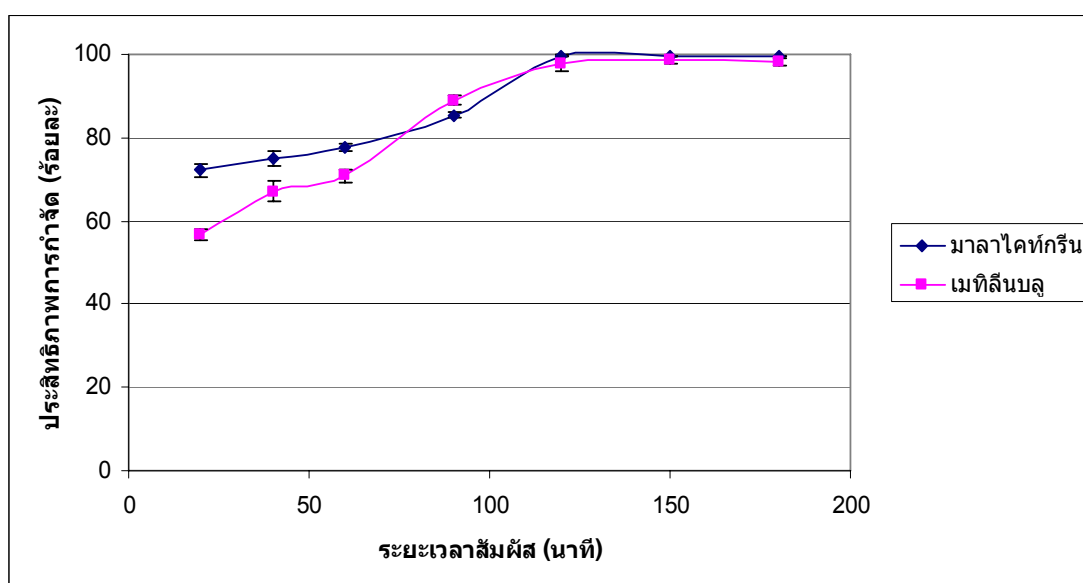
จากผลการทดลองที่ได้ ได้ทำการเลือกค่าพีเอชที่มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป โดยเลือกที่พีเอชเท่ากับ 7 เพราะใกล้เคียงกับสภาพน้ำโดยทั่วไป คือ มีค่าเป็นกลาง และเป็นค่าที่อยู่ในช่วง 6-9 ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

#### 4.4.2 การแปรผันระยะเวลาสัมผัส

ทำการทดลองโดยการแปรผันระยะเวลาสัมผัส เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อความสะดวกรวดเร็วและประหยัดเวลาในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย

กรดซัลฟิวริกปริมาณ 0.4 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด ที่ได้จากการทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20, 40, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ กัน ดังรูปที่ 4.13 จะเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน กล่าวคือ จากเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสให้มากขึ้น โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีมาลาโคทกรีนและสีเมทิลีนบลู มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 72.3 และ 56.7 ตามลำดับ และจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และพบว่า การดูดติดผิวของสีย้อมเบสิกกับเส้นใยพอลัมที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เข้าสู่สมดุล โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกเริ่มคงที่ มีค่าเท่ากับระยะเวลาสัมผัส 120 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่สมดุลเท่ากับร้อยละ 99.5 และ 98.3 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13



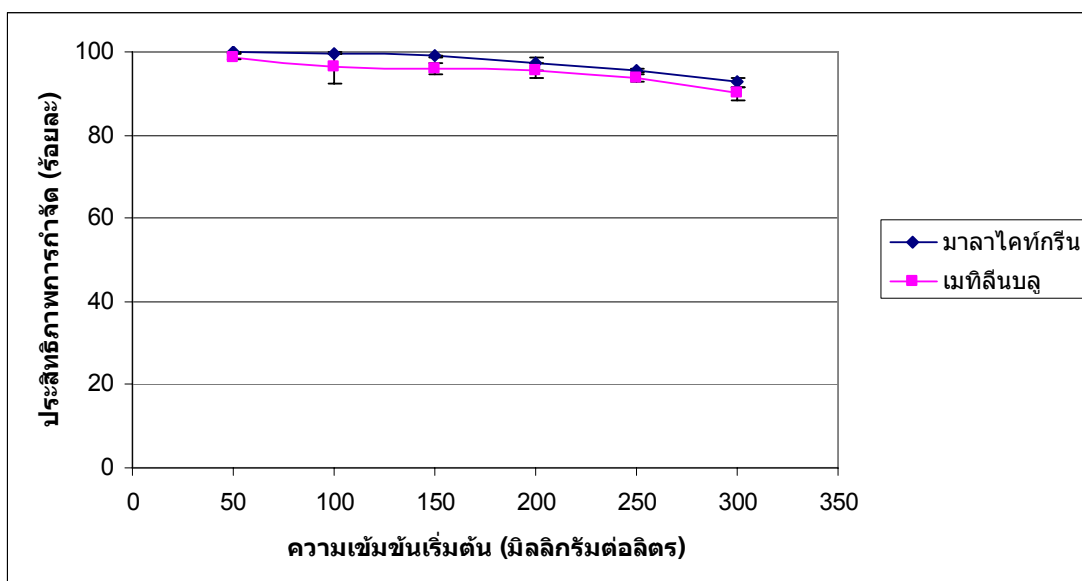
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ โดยใช้เส้นใยพอลัมที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

#### 4.4.3 การแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้น

ทำการทดลองโดยการแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ เพื่อหาว่าเส้นใยพอลัมที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นสามารถกำจัดสีได้สูงสุดที่ความเข้มข้นใด โดยใช้เส้นใยพอลัมที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกปริมาณ 0.4 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร โดยใช้

เสียดังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด ที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

จากการแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียดังเคราะห์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเบสิกจะต่ำลง เนื่องจากพื้นที่ผิวของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นมีอยู่จำกัด เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นสูงขึ้น จึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัส และปริมาณประจุที่จะมาแลกเปลี่ยนจึงไม่เพียงพอ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง แต่จากการศึกษาเพิ่มเติม พบว่า หากเพิ่มระยะเวลาสัมผัสให้มากขึ้น หรือการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้มากขึ้น จะทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น (Isa, 2008) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีย้อมที่มีในน้ำเสียดังเคราะห์หรืออย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังสัมพันธ์กันระยะเวลาและปริมาณตัวดูดซับอีกด้วย



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเบสิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

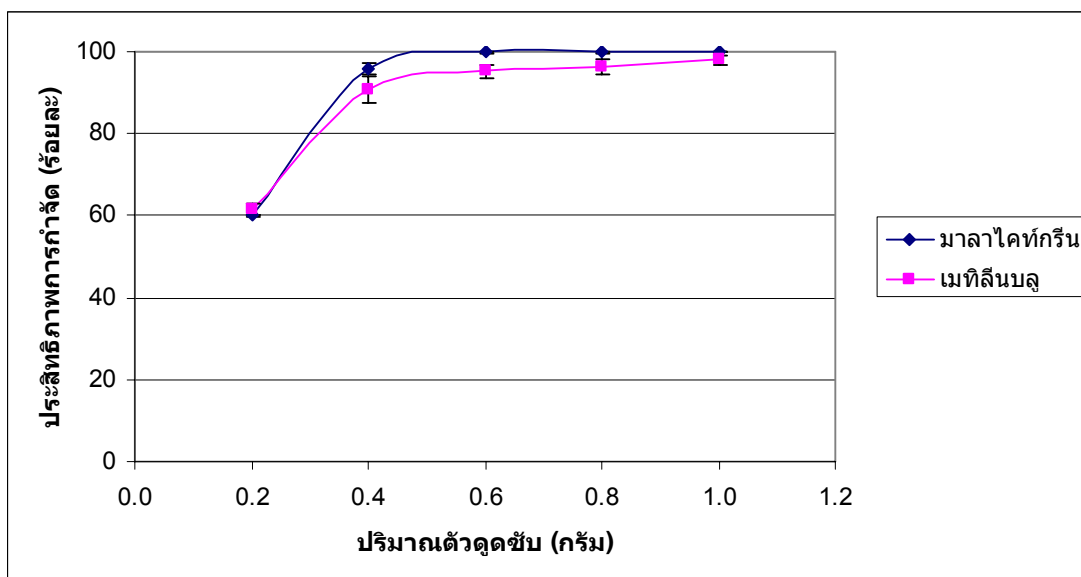
โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกยังสามารถกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียดังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือที่ความเข้มข้นเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพที่กำจัดสีย้อมได้ไม่ให้ผลดีเท่าที่ควร ซึ่งสังเกตได้จากความเข้มของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ยังคงมีสีเข้มอยู่



#### 4.4.4 การแปรผันปริมาณตัวดูดซับ

ทำการทดลองโดยการแปรผันปริมาณตัวดูดซับซึ่งในที่นี้ก็คือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อหาว่าจะสามารถใช้ปริมาณเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเป็นจำนวนน้อยที่สุดเท่าใดที่จะสามารถกำจัดสีข้อมออกจากน้ำเสียได้สูงสุด เพื่อเป็นการประหยัดปริมาณตัวดูดซับที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก ปริมาณ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร โดยใช้สีข้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

ผลของการแปรผันปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ผลจากการแปรผันปริมาณตัวดูดซับ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวที่จะทำให้ประจุของสีข้อมเข้ามายึดเกาะ หรือมีการแลกเปลี่ยนประจุเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.4 กรัม ก็สามารถกำจัดสีข้อมออกจากน้ำเสียได้สูงที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 120 นาที และดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟ คือ หากเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้มากขึ้น ก็จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมได้มากขึ้นอีก



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมเบสิกที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน โดยใช้เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

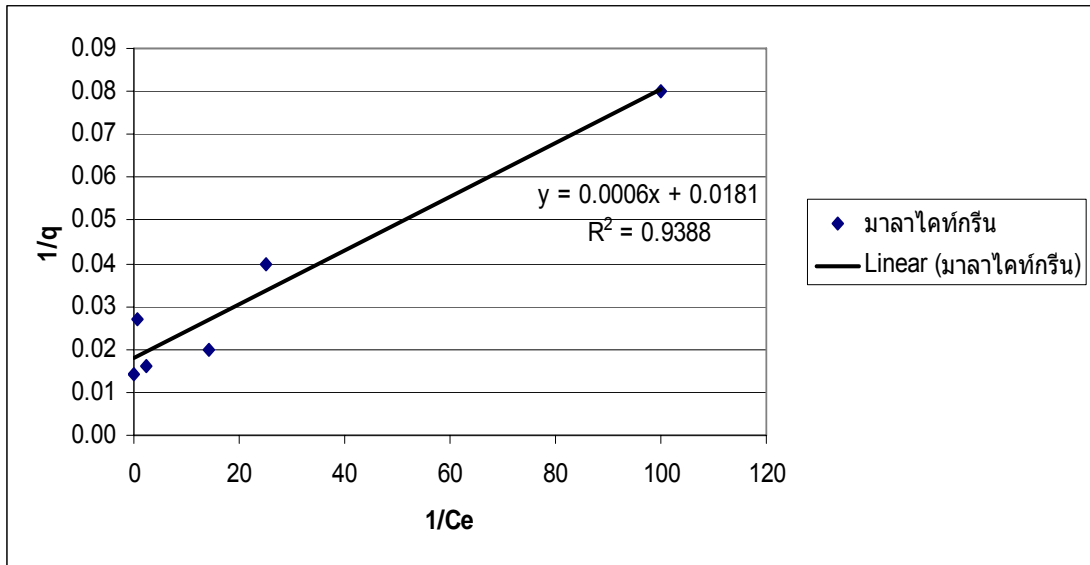
#### 4.5 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

จากผลการศึกษาถึงผลของไอโซเทอมของเส้นใยปาล์ม ซึ่งทำการวิจัยโดยแปรเปลี่ยนปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการดูดซับ และทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อมเบสิก โดยใช้แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) และ ฟรุนดลิชไอโซเทอม (Freundlich Isotherm) พบว่า ในการทดลองโดยการแปรเปลี่ยนปริมาณของเส้นใยและโดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้น ทำให้สามารถหาค่าความสามารถสูงสุดในการกำจัดสีย้อมได้ โดยเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นมีค่าความสามารถในการกำจัดสีย้อมสูงสุด คือ กำจัดสีมาลาโคท์กรีนได้ 63.11 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ กำจัดสีเมทิลีนบลูได้ 67.83 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ผลการศึกษาไอโซเทอม แสดงในรูปที่ 4.16 – 4.19 และตารางที่ ง. 1 – ง.4

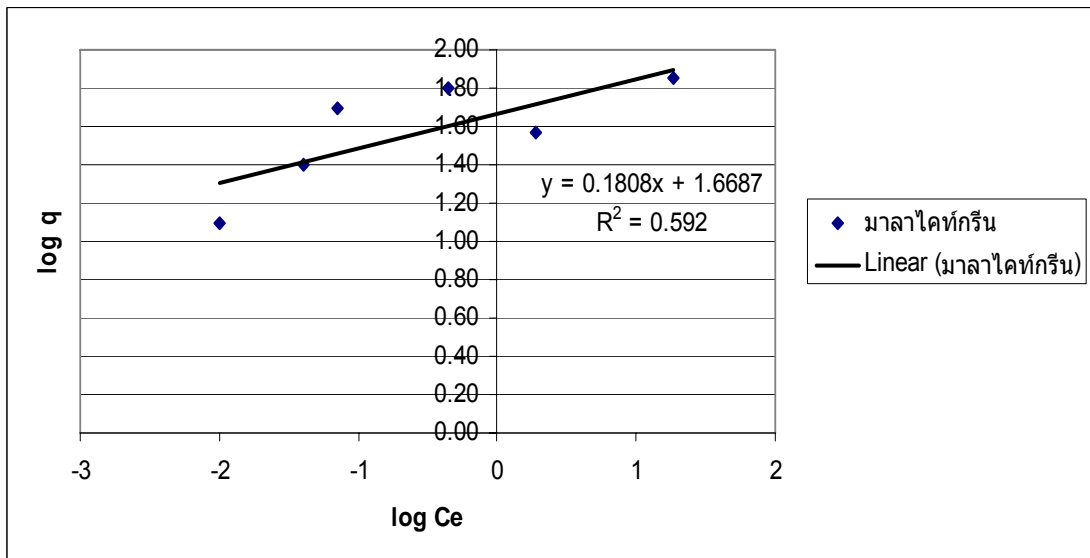
จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (b) จากการพล็อตกราฟได้ ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะกล่าวต่อไป ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ เป็นค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เดซิเมตรต่อมิลลิกรัม พบว่ามีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.8

จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งเปรียบเทียบค่า  $R^2$  ที่ได้จากไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์เมื่อแปรเปลี่ยนความเข้มข้นและเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ และแสดงความสามารถสูงสุดในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม สามารถสรุปได้ว่า จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกในการกำจัดสีย้อมเบสิก 2 ชนิด คือ สีมาลาโคท์กรีน และสีเมทิลีนบลู ให้ผลการทดลองที่เป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ สามารถอธิบายการดูดซับได้ด้วยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เพราะมีค่า  $R^2$  ที่สูงกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช โดยเมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับในการกำจัดสีมาลาโคท์กรีนและเมทิลีนบลูจะมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.8760 และ 0.8667 ตามลำดับ และความสามารถในการดูดซับมาลาโคท์กรีนและเมทิลีนบลู เท่ากับ 63.11 และ 62.33 มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ และเมื่อแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นจะได้ว่า มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9388 และ 0.7019 ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีนและสีเมทิลีนบลู เท่ากับ 58.84 และ 67.83 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ตามลำดับ

แลงเมียร์

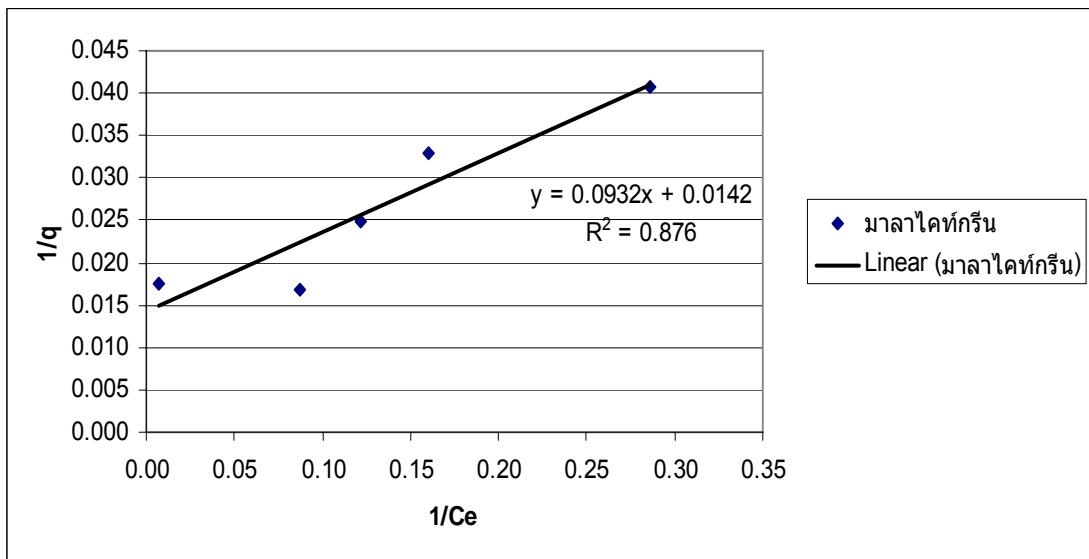


ฟรุนดลิช

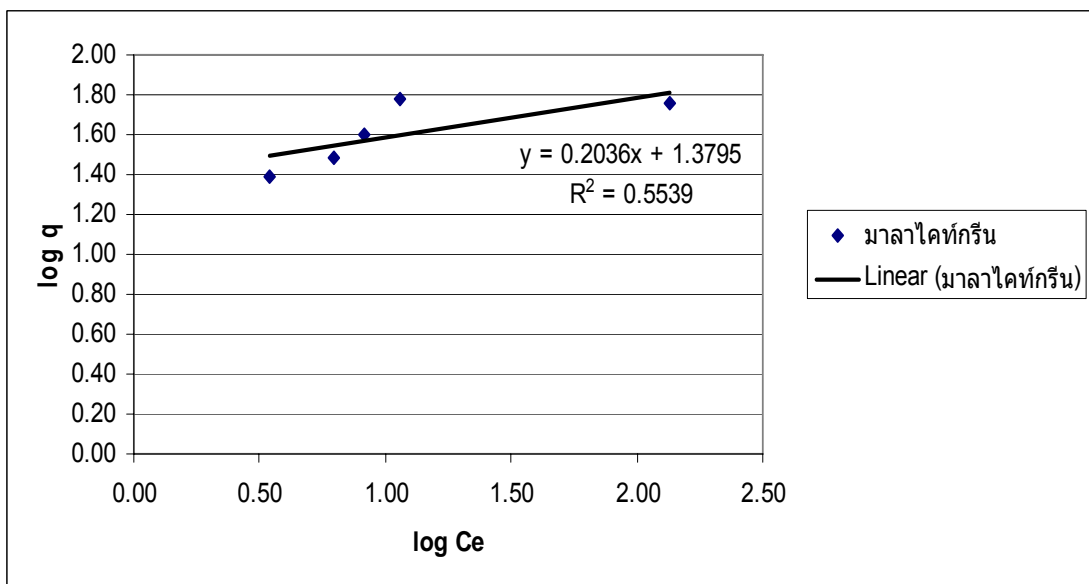


รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลาไคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้น

แลงเมียร์

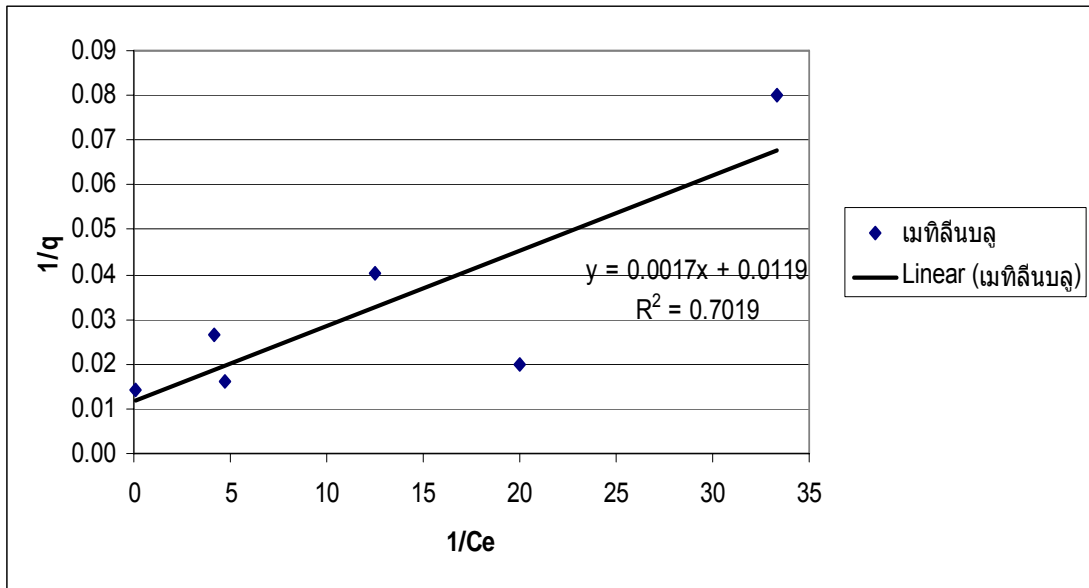


ฟรุนดลิช

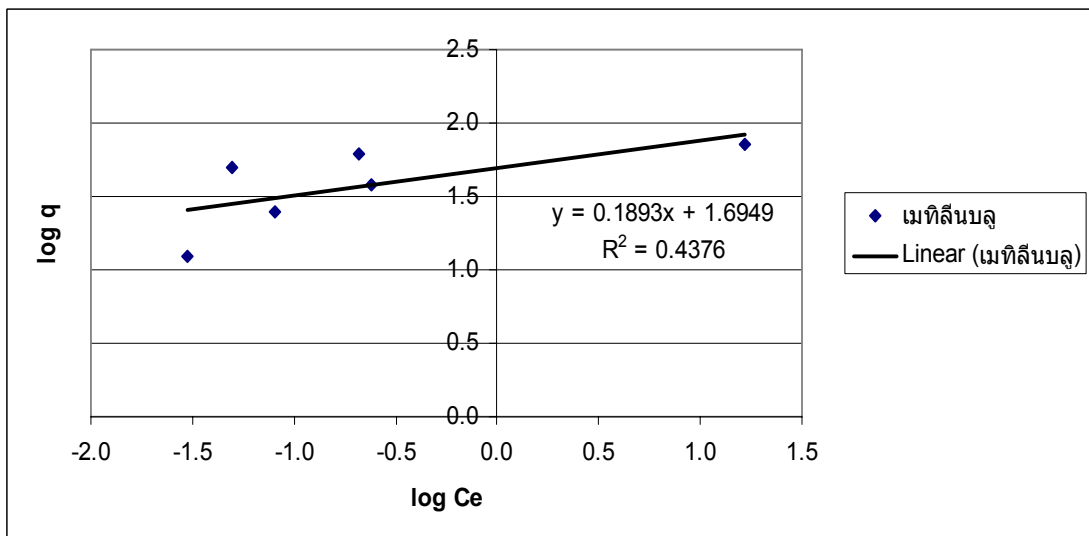


รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ

แลงเมียร์

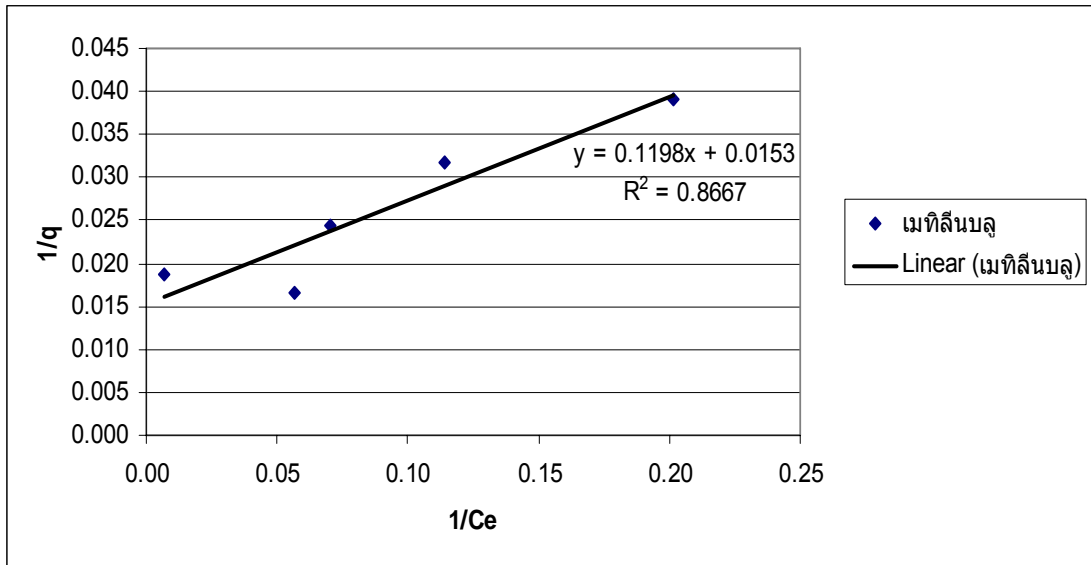


ฟรอนดลิช

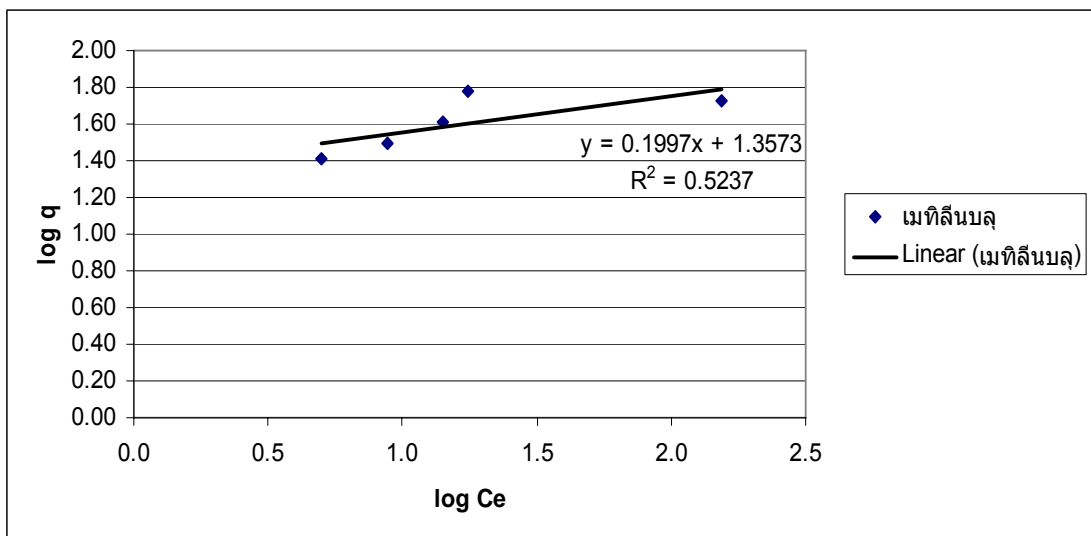


รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรอนดลิชในการดูดซับสีเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้น

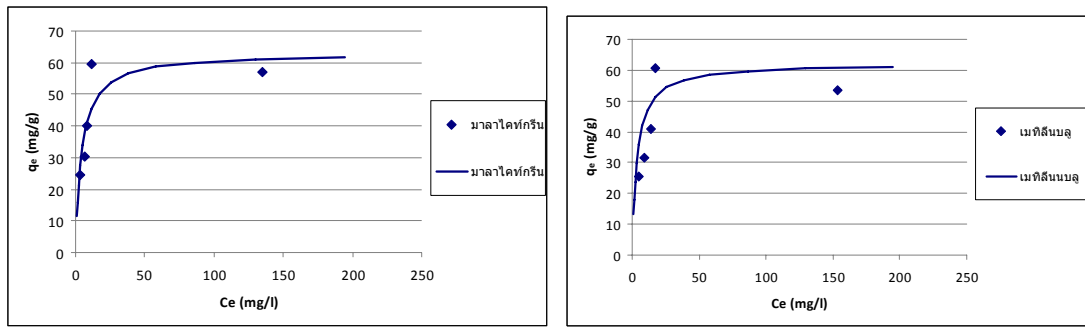
แลงเมียร์



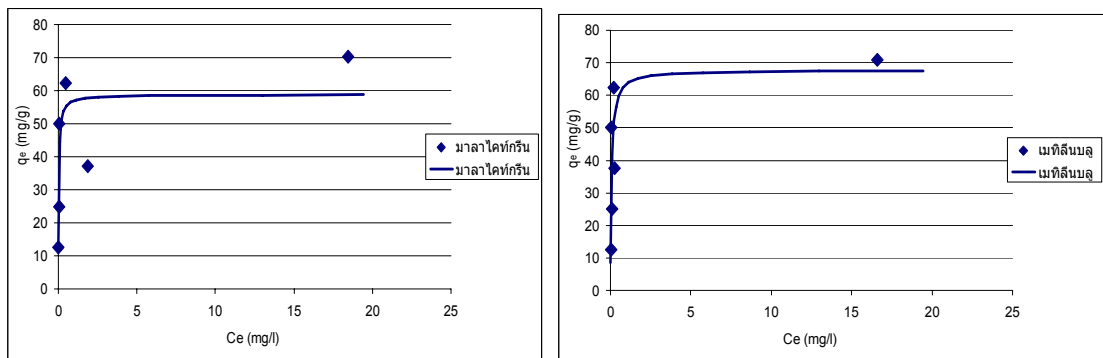
ฟรอนดลิช



รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรอนดริชในการดูดซับสีเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ



รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับสีมาลาไคท์กรีนและเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ



รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการดูดซับสีมาลาไคท์กรีนและเมทิลีนบลู โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้น

ตารางที่ 4.7 ผลของการทดลองหาไอโซเทอมของเส้นใยปาล์มที่รับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

ชนิดสีย้อม	แปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้น			แปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ		
	$R^2$		ความสามารถ การดูดซับสี สูงสุด, $q_m$ (มก./ก.)	$R^2$		ความสามารถ การดูดซับสี สูงสุด, $q_m$ (มก./ก.)
	แลงเมียร์	ฟรุนดลิช		แลงเมียร์	ฟรุนดลิช	
มาลาไคท์กรีน	0.9388	0.5920	58.84	0.8760	0.5539	63.11
เมทิลีนบลู	0.7019	0.4376	67.83	0.8667	0.5237	62.33

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (b) จากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

ชนิดสีย้อม	สัมประสิทธิ์การดูดซับ (b) (ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อมิลลิกรัม)	
	เมื่อแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้น	เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ
มาลาโคท์กรีน	31.36	0.23
เมทิลีนบลู	14.67	0.27

#### 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพกับงานวิจัยอื่น ๆ

จากการศึกษาข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ได้มีการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาทำการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ เพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย หรือบางงานวิจัยก็นำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนัก แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการนำเอามาใช้ในการกำจัดสีย้อม ซึ่งจากการศึกษาถึงการนำเอาเส้นใยปาล์มมาใช้ในการกำจัดสีย้อมนั้น ก็มีวิธีการปรับสภาพเส้นใยอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การทำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์เซลลูโลสที่ทำจากเส้นใยปาล์มในงานวิจัยของจิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ (2542) ที่ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีไคเร็กซ์ พบว่า ควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์เส้นใยปาล์มมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงร้อยละ 95–99 ซึ่งก็มีผู้วิจัยท่านอื่นที่ได้ศึกษาถึงการปรับสภาพเส้นใยปาล์มแบบควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์เซลลูโลสในการกำจัดน้ำเสียประเภทต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาผลการทดลองพบว่า ควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์เส้นใยปาล์มมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ในการกำจัดน้ำเสียได้ดี ส่วนในงานวิจัยของสิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์ (2549) ได้นำเอาเส้นใยปาล์มมาปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อกำจัดโลหะหนัก ซึ่งผู้วิจัยได้นำผลการวิจัยนี้มาศึกษาต่อ เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนัก ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดว่าจะสามารถบำบัดสีย้อมได้มีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งจากการศึกษาก็พบว่า เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้น เหมาะที่จะนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักมากกว่า

สำหรับในงานวิจัยของต่างประเทศ ก็ได้มีการศึกษาถึงการนำเอาเศษวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ในการดูดซับ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง คือ Garg และคณะ (2003) ได้ใช้ขี้เลื่อยมาปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกและปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์เพื่อใช้ในการกำจัดสีมาลาโคท์กรีนซึ่งพบว่า สามารถกำจัดสีมาลาโคท์กรีนได้ดี และในงานวิจัยนี้ได้นำเอาวิธีการปรับสภาพที่ใช้กับขี้เลื่อยมาใช้กับเส้นใยปาล์มซึ่งผลก็พบว่า การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถกำจัดสีมาลาโคท์กรีนได้สูงถึงร้อยละ 99 ในขณะที่ขี้เลื่อยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ



95 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีมาลาโคท์กรีนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเป็นการศึกษาที่ สภาวะเดียวกัน Tan และคณะ (2006) ได้นำเอาเส้นใยปาล์มมาทำเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการ ดูดซับสีเบสิก 2 ชนิด คือ สีมาลาโคท์กรีนและเมทิลีนบลู ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 99

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด ซัลฟิวริกกับงานวิจัยอื่นๆ ที่มีการนำเส้นใยปาล์มมาปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ หรือไม่ว่าจะเป็น การนำเอาเศษวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ มาปรับสภาพด้วยวิธีการที่เหมือนกับในงานวิจัยนี้ จะเห็นได้ว่า เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพนั้น หรือเศษวัสดุทางธรรมชาติชนิดอื่นๆ ล้วนมีประสิทธิภาพในการกำจัด น้ำเสียได้สูง ดังนั้น จึงเห็นว่าเส้นใยปาล์มก็จัดเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติที่สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมได้ดีชนิดหนึ่ง ที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดน้ำเสีย

ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย กรดซัลฟิวริกและเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ และกับวัสดุธรรมชาติอื่นๆ

ชนิดวัสดุดูดซับ	ชนิดสีที่กำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม	
		ร้อยละการกำจัด	ความสามารถในการกำจัดสูงสุด (มก./ก.)
เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก	สีมาลาโคท์กรีน	99.50	63.11
	และสีเมทิลีนบลู	98.20	67.83
ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย	สีกากน้ำตาล	97.4	-
ควอร์เทอร์ไนซ์โครอสลิ่งก์เซลลูโลส จาก - ขานอ้อย - ผักตบชวา - เส้นใยปาล์ม	สีรีแอกทีฟและสีไดเร็กต์	95-99	-
ควอร์เทอร์ไนซ์โครอสลิ่งก์เซลลูโลส จากเส้นใยปาล์ม	สีย้อมในน้ำเสียที่บำบัดแล้วจากโรงงานฟอกย้อม	74.30	286.00
ซีล้อยที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์	สีเบสิก	43.1	-
ซีล้อยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก	สีเบสิก	95.1	-
ถ่านกัมมันต์จากเส้นใยปาล์ม	สีเบสิก	-	277.78

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาวิธีการปรับสภาพเส้นใยปาล์มเพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมเบสิกออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยในการวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยปาล์มที่นำมาปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นำมาทำการทดลองแบบที่ละเท และสีย้อมเบสิกที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มี 2 ประเภท คือ สีมัลลาโคท์กรีน และสีเมทิลีนบลู ได้ผลสรุปการวิจัยดังนี้คือ

#### 1. การศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

1.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่า ความถ่วงจำเพาะของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุด รองมาคือ เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

1.2 การบวมน้ำ เส้นใยปาล์มที่มีการบวมน้ำมากที่สุด คือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ รองลงมา คือ เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และที่ไม่มีการบวมน้ำ คือ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

1.3 พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพ พบว่าการใช้สารเคมีในการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยวิธีต่างๆ นั้น ทำให้พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

1.4 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ และมีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมาก

1.5 เส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีโครงสร้างหลักที่เหมือนกันคือ หมู่อัลคิล หมู่อัลคีน หมูไฮดรอกซิล หมูคาร์บอนิล และหมู่อัลฟอนิกเอซิด แต่จะพบว่าปริมาณของหมู่อัลคิลที่พบในเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกจะมีปริมาณมากกว่า

2. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ในการกำจัดสีย้อม พบว่า เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงสุด โดยกำจัดสีมาลาโคทีกรีนและสีเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 99.50 และ 98.20 ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.4 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 7 ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ใช้ความเร็วรอบในการเขย่า 160 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

### 3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อม

3.1 ผลของพีเอช ช่วงพีเอชที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมเบสิก คือ 6.0-9.0 ส่วนสภาวะพีเอชที่ระดับต่ำลงมาจะพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงเรื่อยๆ ตามระดับพีเอชที่ลดลง

3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส ระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเบสิกสูงสุด คือ 120 นาที และหากใช้ระยะเวลาที่นานกว่า ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้น การเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ จนถึงระดับที่เข้าสู่สมดุล คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด

3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นให้มากขึ้น ความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะลดลง แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นจะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการทำการทดลอง กล่าวคือ ถ้าเพิ่มระยะเวลาในการทดลองให้มากขึ้น เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกนั้น ก็จะสามารถดูดซับสีเบสิกได้มากขึ้นอีก ซึ่งค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถดูดซับได้ คือ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับ เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกจะเพิ่มมากขึ้น และยังพบว่าปริมาณตัวดูดซับมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาสัมผัสในการกำจัดสีย้อมเบสิก กล่าวคือ หากเพิ่มระยะเวลาสัมผัสให้เพียงพอจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มมากขึ้น

#### 4. การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับติดผิวของสารดูดซับ สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบ แลงเมียร์ โดยความสามารถในการดูดซับมาลาไคท์กรีนและเมทิลีนบลู เท่ากับ 63.11 และ 62.33 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ตามลำดับ เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับ และเมื่อแปรเปลี่ยน ความเข้มข้นเริ่มต้นจะได้ความสามารถในการดูดซับสีมาลาไคท์กรีนและสีเมทิลีนบลู เท่ากับ 58.84 และ 67.83 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ตามลำดับ

#### ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิธีการฟื้นฟูสภาพวัสดุดูดซับที่เตรียมจากเส้นใยปาล์มเพิ่มเติม แล้วทำการ เปรียบเทียบคุณสมบัติและความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับหลังทำการฟื้นฟู
2. นำวัสดุดูดซับมาทำการทดลองกับสีประเภทอื่นๆ แล้วมีการนำไปทดลองใช้ในการ บำบัดน้ำเสียฟอกย้อมจริงจากโรงงานฟอกย้อมที่มีการปนเปื้อนสีย้อมหลายๆ ประเภท
3. ควรศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซับเพิ่มเติม เช่น ขนาดของสารดูดซับ ความปั่นป่วน และอุณหภูมิ เป็นต้น
4. เส้นใยปาล์มที่เหลือทิ้งจากการทดลอง และที่ได้ถูกนำมาทดลองแล้วนั้น อาจนำไปใช้ เป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนได้ หรืออาจนำมาใช้เป็นส่วนผสมร่วมในกระบวนการผลิต ปูนซีเมนต์

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและ  
ผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จารุรัตน์ เศรษฐภักดี. 2528. อาหารสัตว์เศรษฐกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา: ภาควิชาสัตวศาสตร์  
คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- จิรภรณ์ อารยเมธาเลิศ. 2542. การกำจัดสีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอเทอร์นารีในโครมอล  
ลิงค์เซลลูโลสที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์  
สภาวะแวดล้อมบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชลดา ไกรวัตนุสรณ์ ลัดดา ยาวีร์ชน และศักดิ์จิตรา ต้นสมบุญ. 2538. การผลิตถ่านกัมมันต์จาก  
ชานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชัชฎาพร องอาจ. 2545. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยน  
ไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์  
สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า: รายงานวิจัยขั้นสมบูรณ.  
เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาลและสถาบันวิจัยและพัฒนา คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนากร จันทสุบรรณ. 2545. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจาก  
โรงงานฟอกย้อมของควอเทอร์นารีโครมอลลิงค์เซลลูโลสที่เตรียมจากเส้นใยลูกปาล์ม.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปศุสัตว์, กรม. กองอาหารสัตว์. กากปาล์มน้ำมัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

[http://www.dld.go.th/nutrition/exhibition/feed\\_stuff/oil\\_palm\\_meal.htm](http://www.dld.go.th/nutrition/exhibition/feed_stuff/oil_palm_meal.htm). [25 มีนาคม 2551].

ปัญญา ธรรมศาล นพวรรณ ชมชัย และประยูร ครอบงุมติ. 2535. การใช้กากปาล์มน้ำมันจากโรงงานขนาดเล็กของศูนย์ศึกษาการพัฒนาพิกุลทองเป็นอาหารสัตว์. ศูนย์วิจัยอาหารสัตว์ นราธิวาส จังหวัดนราธิวาส.

ปัญญา สุวรรณ. การนำของเหลือจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มใช้เป็นประโยชน์. [ออนไลน์].

แหล่งที่มา: [http://www2.diw.go.th/km\\_new/wboard/Head.asp?no=3](http://www2.diw.go.th/km_new/wboard/Head.asp?no=3). [25 มีนาคม 2551].

ป่าไม้, กรม. เส้นใยธรรมชาติ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

[http://www.forest.go.th/biocom/garbage\\_fiber.html](http://www.forest.go.th/biocom/garbage_fiber.html). [22 พฤศจิกายน 2548] อ้างถึงใน สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์. 2549. การกำจัดโลหะหนักโดยเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประมง, กรม. กองตรวจสอบรับรองมาตรฐานคุณภาพสัตว์น้ำและผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ. Malachite green. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www.fisheries.go.th/quality/knowledge/malachite.htm>. [23 มิถุนายน 2551].

พานิช ทินนิมิตร. 2527. โภชนศาสตร์ประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา: ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.

พิถี กระสินธุ์ศรี. 2539. การกำจัดโลหะหนักโดยการให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดลิกโนเซลลูโลสฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รัชนิย์ รุกษชาติ. 2544. การกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงค์เซลลูโลสจากต้นมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ลัดดา ยาวีร์ชน. 2544. การกำจัดสีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงค์เซลลูโลสที่ทำจากขาน้อย ผักตบชวา และเส้นใยลูกปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชาการเกษตร, กรม. ปาล์มน้ำมัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www.doae.go.th/plant/palm.htm>. [25 มีนาคม 2551].

ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. มาลาไคท์กรีน. [ออนไลน์].

แหล่งที่มา: [http://www.fisheries.go.th/cf-kung\\_krabaen/malachite.htm](http://www.fisheries.go.th/cf-kung_krabaen/malachite.htm). [23 มิถุนายน 2551].

สมพงษ์ เทศประสิทธิ์. 2526. การใช้กากปาล์มน้ำมันในอาหารโครูน. วารสารสงขลานครินทร์ 5(3) : 227 – 229.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2544. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนาพันธุ์. 2549. การกำจัดโลหะหนักโดยเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพ.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน.

2550. คู่มือเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมกับน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ทีซีจี พรินติ้ง.

อัจฉราพร ไสละสูต. 2527. คู่มือการย้อมสี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เทคนิค19การพิมพ์.

### ภาษาอังกฤษ

- Cheremisinoff P. N. and Ellerbusch F. 1978. Carbon Adsorption Handbook. Michigan: Ann Arbor Science Publishers..
- Garg, V.K., Gupta, R., Kumar, R. and Gupta, R.K. 2004. Adsorption of chromium from aqueous solution on treated sawdust. Bioresource Technology 92: 79–81.
- Garg, V.K., Gupta, R., Yadav, A. B. and Kumar, R. 2003. Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust. Bioresource Technology 89: 121–124.
- Isa, M. H., Ibrahim, N., Aziz, H. A., Adian, M. N., Sabiani, N. H. M., Zinatizadeh, A. A. L. and Kutty, S. R. M. 2008. Removal of chromium (VI) from aqueous solution using treated oil palm fiber. Journal of Hazardous Materials 152: 662-668.
- Metcalf and Eddy. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Use. 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill: New York.
- Shukla, S. R., Pai, R.S., and Shendarkar, A.D. 2005. Adsorption of Ni(II), Zn(II) and Fe(II) on modified coir fibres. Separation and Purification Technology 47, 3: 141-147.
- Smiciklas, I.D., Milonhic, S.K., Pfenndt, P. and Raicevic, S. 2000. The point of zero charge sorption of cadmium(II) and strontium (II) ion on synthetic hydroxyapatite. Separation and Purification Technology 18: 185–194.
- Tan, I. A.W., Hameed, B. H. and Ahmad, A. L. 2007. Equilibrium and kinetic studies on basic dye adsorption by oil palm fiber activated carbon. Chemical Engineering Journal 127: 111-119.
- Wikipedia. Methylene blue. [online]. Available from [http://en.wikipedia.org/wiki/Methylene\\_blue](http://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_blue). 30 July 2008.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
การศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุ

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักของเส้นใยปาล์มที่หายไปหลังการตากแดด

เส้นใยปาล์ม	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
น้ำหนักก่อนตากแดด	8.0
น้ำหนักหลังตากแดด	7.2
น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง	0.8
น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (%)	10.0

ตารางที่ ก.2 ปริมาณเส้นใยปาล์มแยกตามขนาดของตะแกรงเบอร์ต่างๆ (สิริกุลกันยา พิพิธวัฒนา พันธุ์, 2549)

ขนาดตะแกรง		เส้นใยปาล์ม		เศษเมล็ดปาล์ม		รวม	
เบอร์ตะแกรง	มม.	กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ
1/2 นิ้ว	12.70	51.80	8.16	25.30	3.98	77.10	12.14
3/8 นิ้ว	9.52	40.20	6.33	34.10	5.37	74.30	11.70
เบอร์ 4	4.76	83.19	13.10	62.60	9.86	145.79	22.96
เบอร์ 10	2.00	129.33	20.37	0	0.00	129.33	20.37
เบอร์ 20	0.85	98.53	15.52	0	0.00	98.53	15.52
เบอร์ 40	0.42	47.83	7.53	0	0.00	47.83	7.53
เบอร์ 80	0.18	33.55	5.28	0	0.00	33.55	5.28
Pan ผ่านเบอร์ 80	0	28.52	4.49	0	0.00	28.52	4.49

ภาคผนวก ข  
การศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุ

ตาราง ข.1 ค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพทั้ง 4 วิธี

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย	น้ำหนัก (กรัม)				ค่าความถ่วงจำเพาะ
	ขวด	ขวด+ น้ำ	ขวด+เส้นใย ปาล์ม	ขวด+เส้นใยปาล์ม+ น้ำ	
ไม่ปรับสภาพ	44.97	143.95	45.10	143.85	1.3
กรดซัลฟิวริก	44.97	143.95	92.25	115.85	1.7
ฟอร์มัลดีไฮด์	44.95	143.94	45.11	143.82	1.3
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	44.99	143.95	45.11	143.81	0.9

ตารางที่ ข.2 การบวมน้ำของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างๆ

เส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วย	ไม่ปรับสภาพ	กรดซัลฟิวริก	ฟอร์มัลดีไฮด์	ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์
ปริมาตรเริ่มต้น (มล.)	11.00	11.00	11.00	11.00
ปริมาตรหลัง 24 ชั่วโมง (มล.)	11.98	11.00	11.35	16.10
ค่าการบวมน้ำ	1.09	1.00	1.03	1.46

Date: 11/02/2008

Page 1

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Palm Fiber				
Description	RN 012/52				
Comments					
Sample Weight	0.1611 g	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	JC
Absorbate	NITROGEN	Outgas Time	12.0 hrs	Analysis Time	140.9 mi
Mass-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molecule	P/Po Toler	2	End of Run	11/02/20
Non-Ideality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS8B0202
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	6.546E+00	m <sup>2</sup> /g
Single Point BET.....	3.543E+00	m <sup>2</sup> /g
Langmuir Surface Area.....	4.683E+02	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	8.005E+00	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	9.433E+00	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	8.229E+00	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.003E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	6.546E+00	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	5.936E+00	m <sup>2</sup> /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 1846.0 Å at P/Po = 0.98949.....	9.200E-03	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.278E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.317E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.278E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.317E-02	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.261E-02	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.317E-02	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	2.110E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	8.924E-04	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	9.735E-04	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	5.622E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.480E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.802E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.480E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.802E+01	Å
DR Method Micro Pore Width .....	2.429E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.552E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.925E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON  
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å  
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm  
Last Po Acquired 778.35 mm Hg  
Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 1

รูปที่ ข.1 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

Date: 11/22/2008

Page 1

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Palm Fiber - H2SO4				
Description	RN 022/52				
Comments					
Sample Weight	0.4788 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	JC
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molecule	Outgas Time	18.0 hrs	Analysis Time	165.6 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	2	End of Run	11/22/2008 (
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS8B2201.RAI
Station #	1	Bath Temp.	77.35		

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	3.135E+00	m <sup>2</sup> /g
Single Point BET.....	1.305E+00	m <sup>2</sup> /g
Langmuir Surface Area.....	-8.534E+00	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	3.116E+00	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.697E+00	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	3.230E+00	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.933E+00	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	3.135E+00	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.923E+00	m <sup>2</sup> /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 2104.8 Å at P/Po = 0.99080.....	2.639E-03	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.810E-03	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.932E-03	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.659E-03	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.710E-03	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.797E-03	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.959E-03	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	6.832E-04	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	2.957E-04	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.274E-04	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	3.367E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.086E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.304E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.086E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.304E+01	Å
DR Method Micro Pore Width .....	2.433E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.558E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	3.866E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON  
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å  
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm  
Last Po Acquired 773.33 mm Hg  
Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 1

รูปที่ ข.2 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ไปปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

Date: 11/03/2008

Page 1

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Palm Fiber - CH20				
Description	RN 012/52				
Comments					
Sample Weight	0.1678 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	JC
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molecule	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	146.5 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	2	End of Run	11/03/2008
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	AS8B0301.R
Station #	1	Bath Temp.	77.35		

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	6.859E+00	m <sup>2</sup> /g
Single Point BET.....	4.156E+00	m <sup>2</sup> /g
Langmuir Surface Area.....	3.817E+01	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	9.414E+00	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.135E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	9.638E+00	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.207E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	6.859E+00	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	6.641E+00	m <sup>2</sup> /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 2690.3 Å at P/Po = 0.99282.....	1.232E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.617E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.671E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.617E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.671E-02	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.592E-02	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.667E-02	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	2.360E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	1.127E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	1.223E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	7.188E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.207E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.807E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.207E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.807E+01	Å
DR Method Micro Pore Width .....	2.261E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.598E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	3.017E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON  
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å  
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm  
Last Po Acquired 774.58 mm Hg  
MaxiDose : ON  
Initial Fill : OFF  
DoseWizard : OFF

รูปที่ ข.3 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยฟอर्मัลดีไฮด์



Date: 11/06/2008

Page 1

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	Palm Fiber-H2O2				
Description	RN 012/52				
Comments					
Sample Weight	0.1522 g	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	JC
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	19.0 hrs	Analysis Time	152.4 min
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molecule	P/Po Toler	2	End of Run	11/06/2008 11
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS8B0601.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	8.772E+00	m <sup>2</sup> /g
Single Point BET.....	4.510E+00	m <sup>2</sup> /g
Langmuir Surface Area.....	-3.013E+02	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.023E+01	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.146E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.056E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.217E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	8.772E+00	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	6.326E+00	m <sup>2</sup> /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 1904.7 Å at P/Po = 0.98982.....	1.082E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.512E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.535E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.512E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.535E-02	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.497E-02	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.536E-02	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	2.248E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	1.113E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	1.226E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	4.932E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.081E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.782E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.081E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.782E+01	Å
DR Method Micro Pore Width .....	2.258E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.933E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	3.866E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

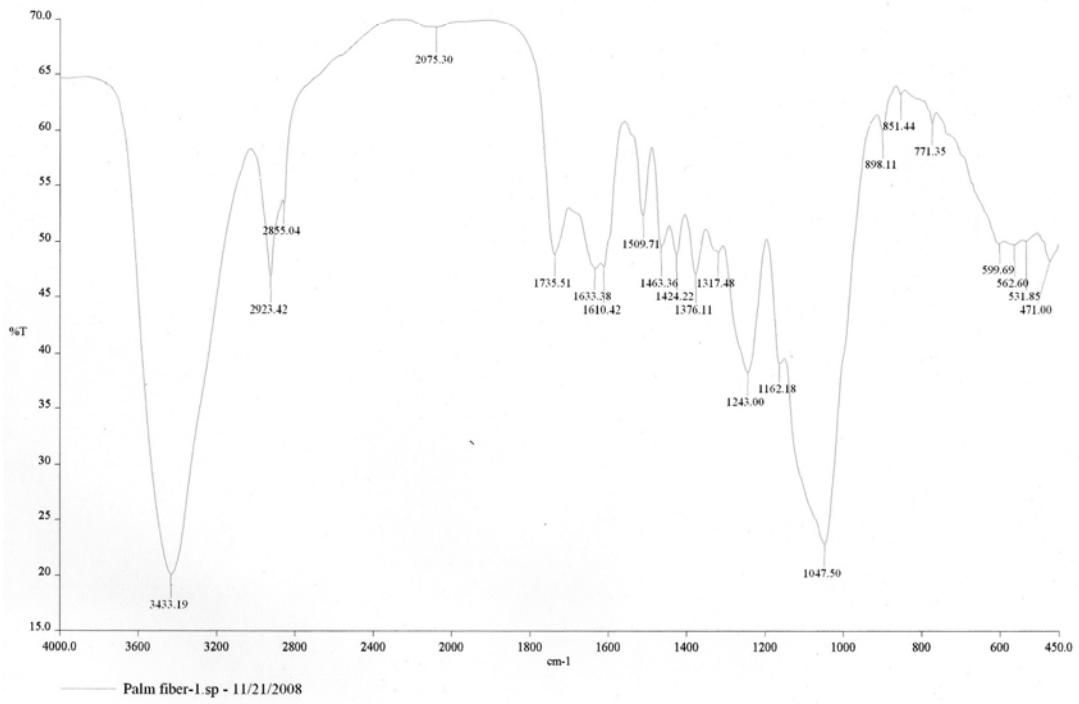
Thermal Transpiration : ON  
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å  
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm  
Last Po Acquired 771.06 mm Hg  
Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 1

รูปที่ ข.4 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Scientific and Technological Research Equipment Centre  
Chulalongkorn University

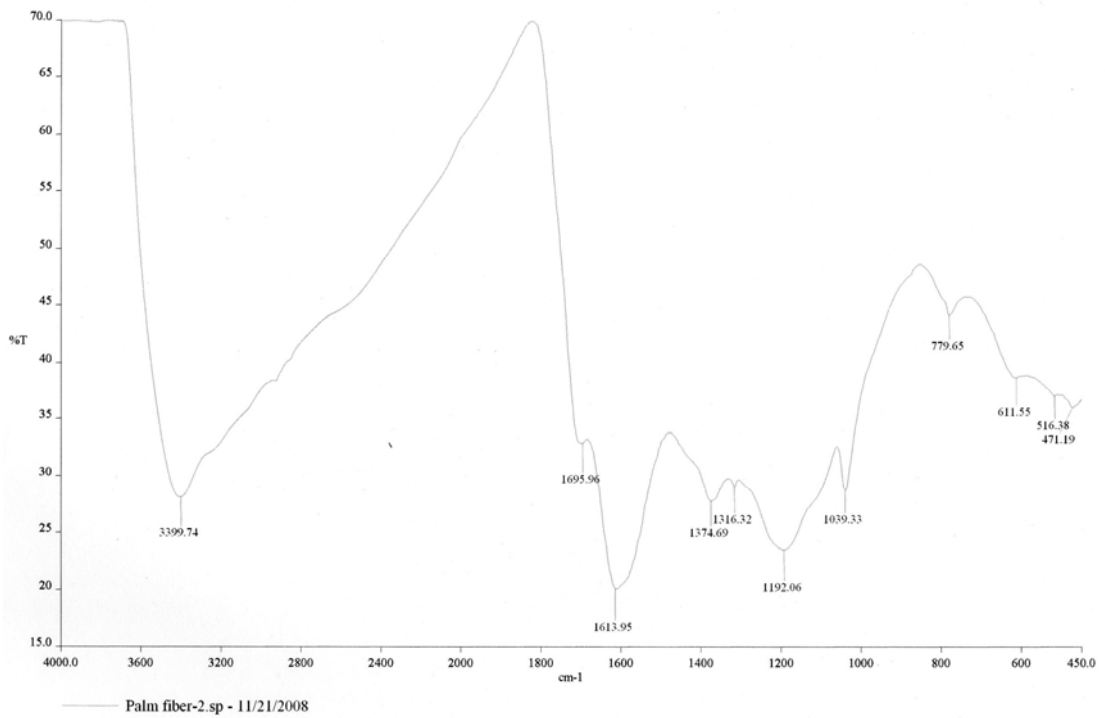
Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)



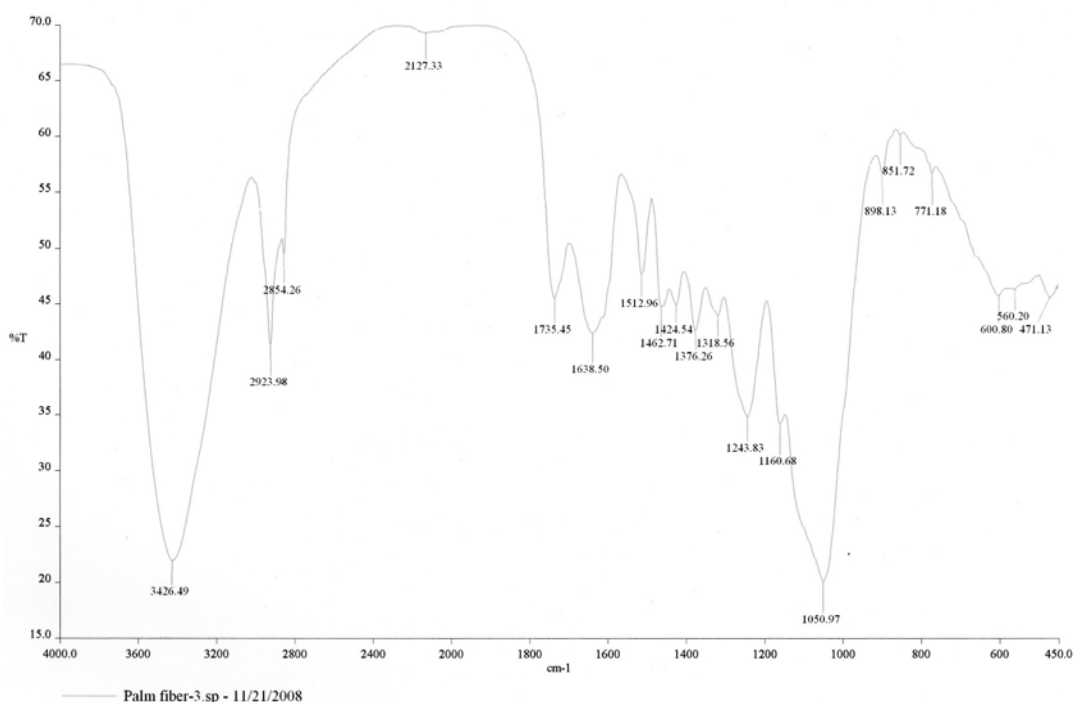
รูปที่ ข.5 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพ

Scientific and Technological Research Equipment Centre  
Chulalongkorn University

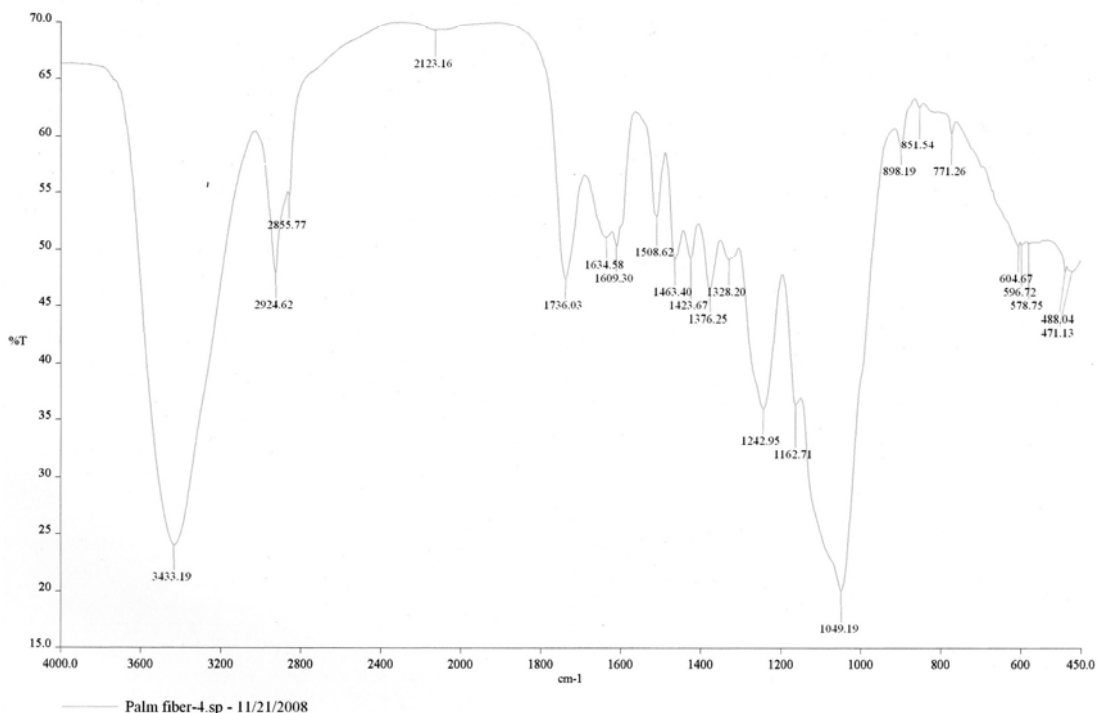
Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)



รูปที่ ข.6 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก



รูปที่ ข.7 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์



รูปที่ ข.8 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ภาคผนวก ค

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาน้ำฟลูออไรด์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีข้อมเบสิก

ชนิดสีข้อม	พีเอช		ความเข้มข้นสีข้อม (มก./ล.)			ร้อยละการกำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	คงเหลือ	สีที่ถูกกำจัด	
มาลาไคท์ กรีน	2.00	2.04	240.15	42.75	197.4	82.2±0.305
	3.00	3.02	240.15	16.57	223.58	93.1±0.425
	4.00	4.10	240.15	13.93	226.22	94.2±0.442
	5.00	5.06	240.15	6.24	233.91	97.4±0.465
	6.00	6.11	240.15	0.96	239.19	99.6±0.044
	7.00	7.01	240.15	0.72	239.43	99.7±0.116
	8.00	8.03	240.15	0.48	239.67	99.8±0.060
	9.00	9.09	240.15	0.48	239.67	99.8±0.026
เมทิลีนบลู	2.00	2.11	240.15	50.67	189.48	78.9±2.381
	3.00	3.15	240.15	26.90	213.25	88.8±2.787
	4.00	4.05	240.15	22.33	217.82	90.7±0.211
	5.00	5.04	240.15	20.41	219.74	91.5±1.012
	6.00	6.08	240.15	13.93	226.22	94.2±0.348
	7.00	6.98	240.15	6.24	233.91	97.4±1.130
	8.00	8.01	240.15	5.04	235.11	97.9±1.750
	9.00	9.00	240.15	4.32	235.83	98.2±0.179

หมายเหตุ: น้ำหนักวัสดุดูดซับ 0.4 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนด้วย

ความเร็ว 160 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ค.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมเบสิก

ชนิดสีย้อม	พีเอช		ระยะเวลา สัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นสีย้อม(มก./ล.)			ร้อยละการกำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย		เริ่มต้น	คงเหลือ	สีที่ถูก กำจัด	
มาลาไคท์ กรีน	7.04	7.00	20	245.15	67.91	177.24	72.3±1.547
	7.04	6.98	40	245.15	61.04	184.11	75.1±1.786
	7.04	7.04	60	245.15	54.67	190.48	77.7±1.000
	7.04	7.04	90	245.15	35.79	209.36	85.4±0.554
	7.04	7.12	120	245.15	1.23	243.92	99.5±0.065
	7.04	7.09	150	245.15	0.98	244.17	99.6±0.113
	7.04	7.05	180	245.15	1.23	243.92	99.5±0.146
เมทิลีนบลู	7.04	7.03	20	245.15	106.15	139.00	56.7±1.478
	7.04	7.01	40	245.15	80.65	164.50	67.1±2.548
	7.04	7.02	60	245.15	71.34	173.81	70.9±1.514
	7.04	7.03	90	245.15	27.21	217.94	88.9±1.151
	7.04	7.00	120	245.15	5.15	240.00	97.9±2.137
	7.04	7.04	150	245.15	3.68	241.47	98.5±0.875
	7.04	7.05	180	245.15	4.17	240.98	98.3±0.903

หมายเหตุ: น้ำหนักวัสดุดูดซับ 0.4 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ค.3 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมเบสิก

ชนิดสีย้อม	พีเอช		ความเข้มข้นสีย้อม(มก./ล.)			ร้อยละการกำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	คงเหลือ	สีที่ถูกกำจัด	
มาลาไคท์ กรีน	7.03	7.08	48.68	0.10	48.58	99.8±0.090
	7.03	7.10	116.98	0.58	116.40	99.5±0.096
	7.03	7.05	161.47	1.61	159.86	99.0±0.122
	7.03	7.02	188.87	5.48	183.39	97.1±1.571
	7.03	7.05	255.34	11.75	243.59	95.4±0.556
	7.03	7.08	345.88	25.25	320.63	92.7±1.046
เมทิลีนบลู	7.03	7.12	57.89	0.69	57.20	98.8±0.788
	7.03	7.04	110.45	4.09	106.36	96.3±3.887
	7.03	7.05	150.50	6.02	144.48	96.0±1.240
	7.03	7.04	221.00	9.94	211.06	95.5±1.979
	7.03	7.08	258.47	16.28	242.19	93.7±1.022
	7.03	6.98	305.56	30.56	275.00	90.0±1.615

ตารางที่ ค.4 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการกำจัดสีย้อมเบสิก

ชนิดสีย้อม	พีเอช		ปริมาณ ตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสีย้อม (มก./ล.)			ร้อยละการ กำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย		เริ่มต้น	คงเหลือ	สีที่ถูก กำจัด	
มาลาไคท์ กรีน	7.01	7.01	0.20	248.75	99.50	149.25	60.0±0.255
	7.01	7.02	0.40	248.75	0.75	248.00	99.7±1.412
	7.01	7.03	0.60	248.75	0.50	248.25	99.8±0.095
	7.01	7.03	0.80	248.75	0.50	248.25	99.8±0.061
	7.01	7.05	1.00	248.75	0.25	248.50	99.9±0.020
เมทิลีนบลู	7.01	7.08	0.20	248.75	95.27	153.48	61.7±1.344
	7.01	7.05	0.40	248.75	22.64	226.11	90.9±3.183
	7.01	7.04	0.60	248.75	11.94	236.81	95.2±1.634
	7.01	7.07	0.80	248.75	8.96	239.80	96.4±1.745
	7.01	7.00	1.00	248.75	4.73	244.02	98.1±1.138



ภาคผนวก ง  
การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

ตารางที่ ง. 1 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ

ปริมาณวัสดุ ดูดซับ ,M (กรัม)	ความเข้มข้นสี เริ่มต้น, Co (มก./ล.)	ความเข้มข้นสีที่ จุดสมดุล, Ce (มก./ล.)	สีที่ถูก กำจัด ,q (มก./ก)	1/Ce	1/q	log Ce	log q
0.20	249.10	135.12	56.99	0.0074	0.0175	2.1307	1.7558
0.40	249.10	11.45	59.41	0.0873	0.0168	1.0588	1.7739
0.60	249.10	8.24	40.14	0.1214	0.0249	0.9159	1.6036
0.80	249.10	6.23	30.36	0.1605	0.0329	0.7945	1.4823
1.00	249.10	3.49	24.56	0.2865	0.0407	0.5428	1.3902

ตารางที่ ง. 2 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีมาลาโคท์กรีน โดยแปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้น

ปริมาณวัสดุ ดูดซับ , M (กรัม)	ความเข้มข้นสี เริ่มต้น, Co (มก./ล.)	ความเข้มข้นสี ที่จุดสมดุล, Ce (มก./ล.)	สีที่ถูก กำจัด, q (มก./ก.)	1/Ce	1/q	log Ce	log q
0.40	60.17	0.01	12.50	100.0000	0.0800	-2.0000	1.0969
0.40	118.69	0.04	24.99	25.0000	0.0400	-1.3979	1.3978
0.40	157.00	1.88	37.03	0.5319	0.0270	0.2742	1.5686
0.40	195.83	0.07	49.98	14.2857	0.0200	-1.1549	1.6988
0.40	260.02	0.45	62.39	2.2222	0.0160	-0.3468	1.7951
0.40	307.21	18.44	70.39	0.0542	0.0142	1.2658	1.8475

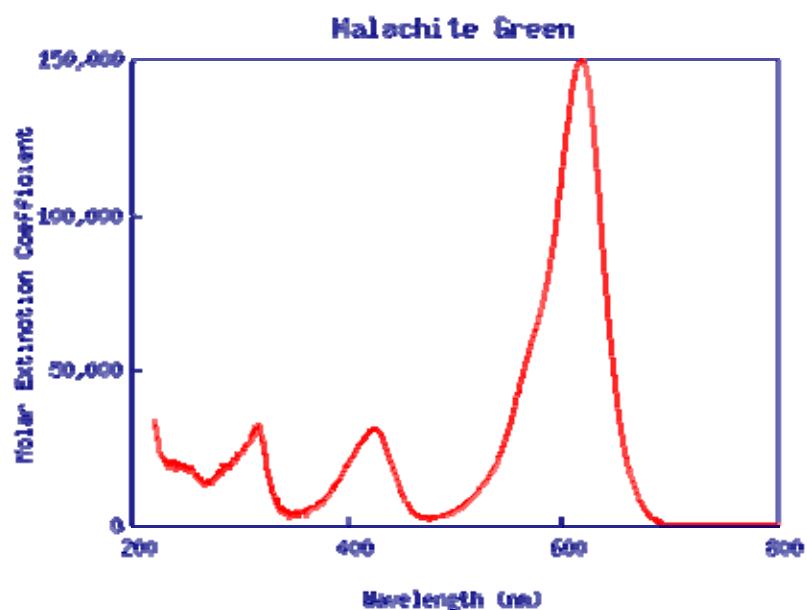
ตารางที่ ง. 3 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีเมทิลีนบลูโดย  
แปรเปลี่ยนปริมาณวัสดุดูดซับ

ปริมาณ วัสดุดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นสี เริ่มต้น, Co (มก./ล.)	ความเข้มข้นสี ที่จุดสมดุล, Ce (มก./ล.)	สีที่ถูก กำจัด, q (มก./ก.)	1/Ce	1/q	log Ce	log q
0.20	260.30	153.22	53.54	0.0065	0.0187	2.1853	1.7287
0.40	260.30	17.56	60.69	0.0569	0.0165	1.2445	1.7831
0.60	260.30	14.23	41.01	0.0703	0.0244	1.1532	1.6129
0.80	260.30	8.77	31.44	0.1140	0.0318	0.9430	1.4975
1.00	260.30	4.97	25.53	0.2012	0.0392	0.6964	1.4071

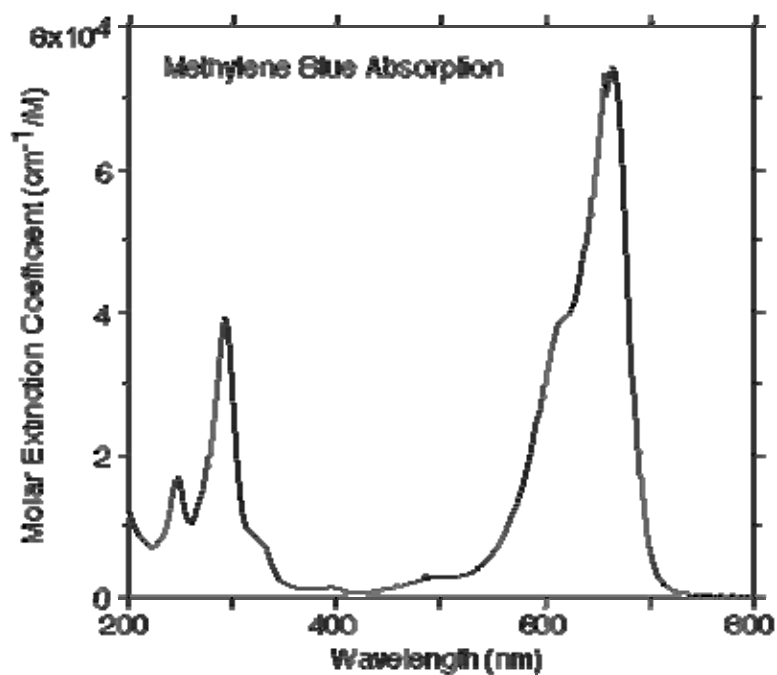
ตารางที่ ง. 4 การวิเคราะห์ค่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชในการดูดซับสีเมทิลีนบลูโดย  
แปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้น

ปริมาณวัสดุ ดูดซับ , M (กรัม)	ความเข้มข้นสี เริ่มต้น, Co (มก./ล.)	ความเข้มข้นสี ที่จุดสมดุล, Ce (มก./ล.)	สีที่ถูก กำจัด, q (มก./ก.)	1/Ce	1/q	log Ce	log q
0.40	60.17	0.03	12.49	33.3333	0.0801	-1.5229	1.0966
0.40	118.69	0.08	24.98	12.5000	0.0400	-1.0969	1.3976
0.40	157.00	0.24	37.44	4.1667	0.0267	-0.6198	1.5733
0.40	195.83	0.05	49.99	20.0000	0.0200	-1.3010	1.6989
0.40	260.02	0.21	62.45	4.7619	0.0160	-0.6778	1.7955
0.40	307.21	16.59	70.85	0.0603	0.0141	1.2198	1.8503

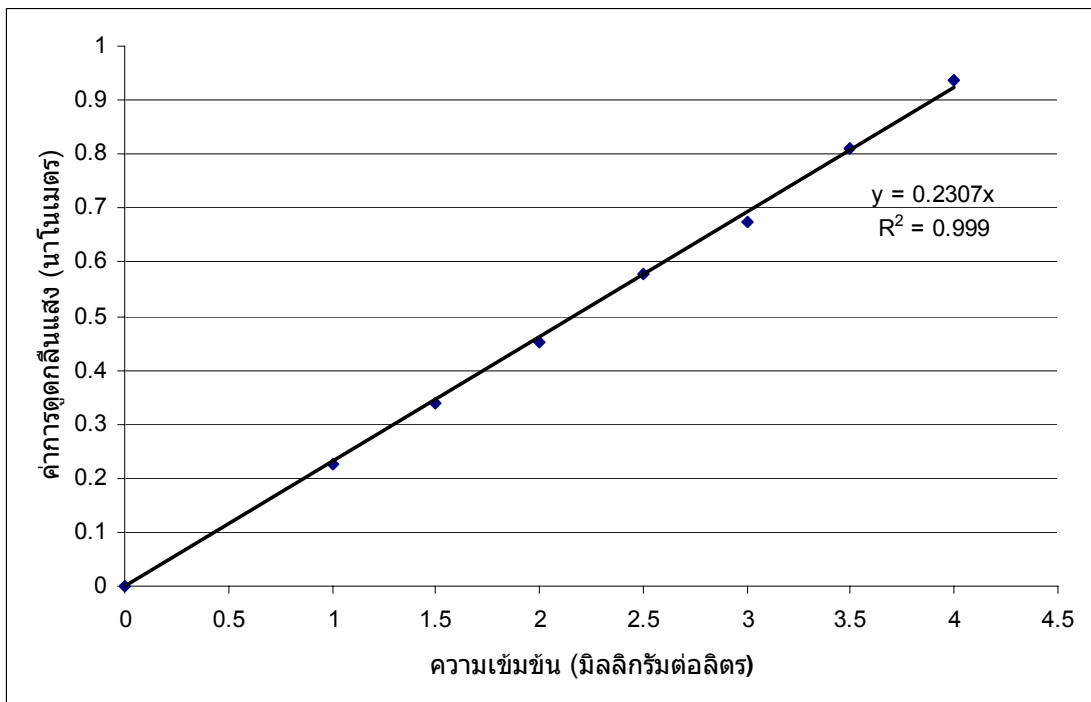
ภาคผนวก จ  
ค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสง  
และกราฟมาตรฐานของสีย้อมเบสิกที่ใช้



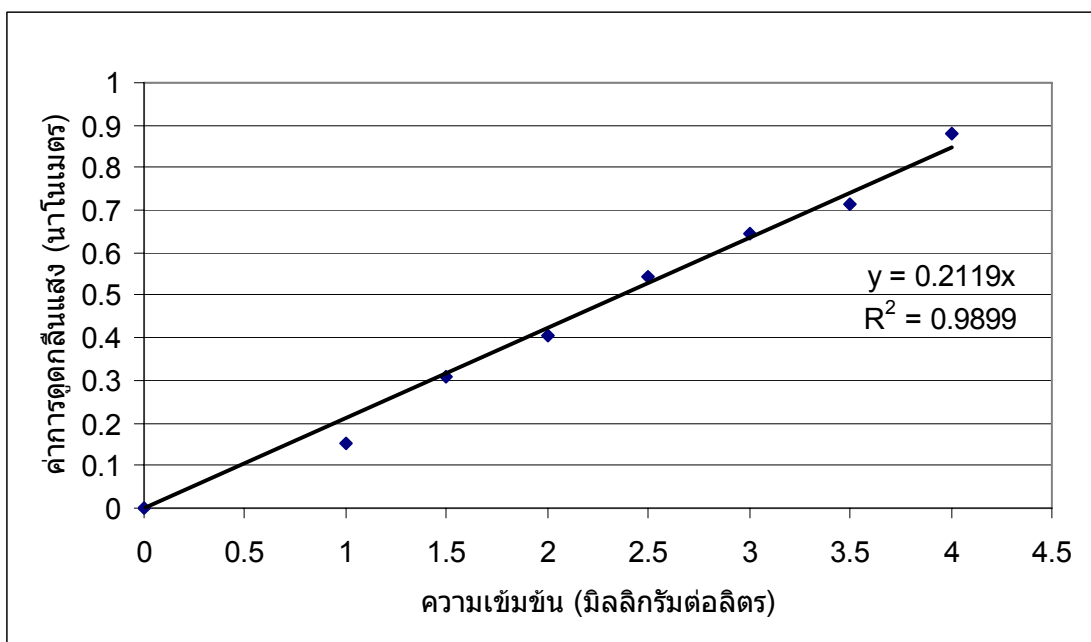
รูปที่ ๑.1 ความยาวคลื่นแสง ( $\lambda_{max}$ ) ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีมาลาไคท์กรีน



รูปที่ ๑.2 ความยาวคลื่นแสง ( $\lambda_{max}$ ) ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีเมทิลีนบลู



รูปที่ ๑.3 กราฟมาตรฐานของสีมาลาโคทิกรีน



รูปที่ ๑.4 กราฟมาตรฐานสีเมทิลินบลู

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชาริณี ม่วงคลองใหม่ เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสามพรานวิทยา จังหวัดนครปฐม เมื่อปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550