



การกำจัดสีย้อมธรรมชาติด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส

นายจรพงศ์ จุ่มัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COLORS REMOVAL FROM NATURAL DYES BY ADSORPTION PROCESS USING ACTIVATED  
CARBON PRODUCED FROM EUCALYPTUS

Mr.Khajornpong Chooman

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

ขจรพงศ์ จุมนัน : การกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส. (COLORS REMOVAL FROM NATURAL DYES BY ADSORPTION PROCESS USING ACTIVATED CARBON PRODUCED FROM EUCALYPTUS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ชเรศ ศรีสถิตย์, 140 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดติดสี จากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเปลือกกาแฟและสีแดงจากเปลือกไม้ฝาง โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายซิงค์คลอไรด์ ในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์พบว่า อุณหภูมิในการเผากระตุ้นที่เหมาะสมคือ 800 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านไม้ต่อโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ต่อ 2 จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 625 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 405 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรง 0.284 มิลลิลิตรต่อกรัม และขนาดโพรงเฉลี่ย 13.58 อังสตรอม ที่อัตราส่วนของถ่านไม้ต่อซิงค์คลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 1 ต่อ 2 จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 754 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 453 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรง 0.315 มิลลิลิตรต่อกรัม และขนาดโพรงเฉลี่ย 13.92 อังสตรอม จากนั้นได้ทำการทดลองแบบเบบเบทซ์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดสี พบว่าที่พีเอช 11 เวลาสัมผัส 90 นาที สามารถลดค่าแอบซอเบแนนซ์ได้ 33.10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดติดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียว และ 31.81 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดติดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีแดง ผลการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่อัตรา 0.6 ลบ.ม.ต่อตารางเมตรชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างที่ชั้นความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร การบำบัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 56.09, 32.05, 24.05 และ 24.04 ปริมาตรเบด ตามลำดับ การบำบัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีแดงของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 56.09, 32.05, 24.05 และ 24.04 ปริมาตรเบด ตามลำดับ ผลการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์โดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่า การฟื้นฟูสภาพครั้งแรกเท่ากับ 89.64 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่สองเท่ากับ 72.20 เปอร์เซ็นต์ และครั้งที่สามเท่ากับ 49.32 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2551	

# # 4770616921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: ACTIVATED / NATURAL DYES / EUCALYPTUS / COLORS

KHAJORN PONG CHOOMAN : COLORS REMOVAL FROM NATURAL DYES BY ADSORPTION PROCESS USING ACTIVATED CARBON PRODUCED FROM EUCALYPTUS.  
 THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.THARES SRISATIT, Ph.D., 140 pp.

The purpose of this research is to study the color removal from natural dyes using activated carbon made from eucalyptus. They were made by chemical activated process by using sodium chloride and zinc chloride. In the activated carbon preparation process, the result that the suitable temperature was 800 degree Celsius and the appropriate ratio by weight of raw eucalyptus per sodium chloride was 1:2. Which gave the Iodine number at 625 mg/g. Surface area equaled to 405 sq.m./g. And the appropriate ratio by weight of raw eucalyptus per zinc chloride was 1:2. Which gave the Iodine number at 754 mg/g. Surface area equaled to 453 sq.m./g. In the batch experiment, the factor effect of natural dyes adsorption efficiency was studied by eucalyptus activated carbon, the results shown that best colors removal efficiency of both type were at pH 11 and contact time at 90 minutes for equilibrium was 31.10 percent of green color from natural dyes and 31.81 percent of red color from natural dyes. In continuous studies, activated carbon from eucalyptus was used for packing in the column. Natural dyes was fed continuously down flow and collected at the height level of 30, 60, 90 and 120 centimeters can treat the green color of natural dyes 56.09, 32.05, 24.05 and 24.04 Bed Volume respectively, can treat the red of natural dyes 56.09, 32.05, 24.05 and 24.04 Bed Volume respectively. From efficiency in eucalyptus activated carbon regeneration test, which washed by 5 percent hydrochloric acid had efficiency in regenerate in the first time was 89.64 percent, the second time was 72.20 percent and the third time was 49.32 percent.

Department Environmental Engineering Student's signature.....

Field of study Environmental Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2008

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณต่ออาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้  
ประสิทธิ์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมแก่ข้าพเจ้าทั้งในห้องเรียน และนอกเวลาราชการ

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ที่ให้ความรู้ แนวความคิด มุมมองชีวิตบางด้านที่ข้าพเจ้าขาดหายไป และที่  
สำคัญให้โอกาสข้าพเจ้าได้ต่อสู้ทำงานในแนวทางที่ถูกต้อง ชี้แนะและแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาโดย  
ตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียร ประธานกรรมการสอบ  
วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญา  
เมธีกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ไปด้วยดี

ขอขอบคุณพีศรีสวัสดิ์ ประธานกลุ่มอาชีพสตรีทอผ้า บ้านทุ่งสุน อำเภอทุ่งช้าง  
จังหวัดน่าน ที่ให้ความรู้และเตรียมน้ำเสียจากสี่จอมธรรมชาติให้เพื่อใช้ในงานวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการมูลฝอย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชา  
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและ  
อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณน้องๆ ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ช่วยเหลือและให้  
กำลังใจ เป็นที่ปรึกษาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณต่อครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้กำลังใจข้าพเจ้ามาโดยตลอด  
สอนให้ข้าพเจ้ารู้ถึงคุณค่าของการศึกษา รู้ถึงคุณค่าของการใช้ชีวิต ขอขอบคุณคุณปู่ของข้าพเจ้า แม้  
ท่านจะล่วงลับไปแล้วแต่คำสอนทุกคำของท่านข้าพเจ้ายังคงจดจำตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 เทคโนโลยีการผลิตของอุตสาหกรรมทอและย้อมผ้าของไทย .....	4
2.1.1 เทคโนโลยีการทอผ้าแบบพื้นบ้าน .....	4
2.1.2 เส้นฝ้าย .....	4
2.1.3 การย้อมสี .....	6
2.2 สีย้อม (Dye) .....	8
2.2.1 สีย้อมธรรมชาติ .....	8
2.2.1 สีย้อมสังเคราะห์ .....	10
2.3 การเตรียมน้ำสีย้อม .....	10
2.4 การบำบัดสีในน้ำทิ้ง .....	10
2.5 การดูดติดผิว (Adsorption) .....	13
2.5.1 หลักการดูดติดผิว .....	14
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว .....	16
2.5.3 สมดุลไอโซเทอมการดูดติดผิว .....	18
2.6 ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (The Adsorption Column) .....	23
2.7 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) .....	26

2.7.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์ .....	26
2.7.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์ .....	29
2.7.3 วัตถุประสงค์สำหรับใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ .....	31
2.7.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ .....	32
2.7.5 โครงสร้างถ่านกัมมันต์ .....	39
2.7.6 การประเมินและการเลือกใช้ถ่าน .....	41
2.7.7 การปรับคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ .....	42
2.8 สีและการเห็น .....	44
2.8.1 แสงและวัตถุสี .....	44
2.8.2 ทฤษฎีแม่สี .....	44
2.8.3 การบรรยายสี .....	45
2.8.4 การวัดค่าสี .....	45
2.9 ไม้ยูคาลิปตัส .....	46
2.10 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; NaCl) .....	47
2.11 ซิงค์คลอไรด์ (Zinc Chloride; ZnCl <sub>2</sub> ) .....	47
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	48
2.12.1 งานวิจัยในประเทศ .....	48
2.12.2 งานวิจัยต่างประเทศ .....	50
บทที่ 3 แผนการทดลองและวิธีดำเนินการวิจัย .....	53
3.1 รูปแบบการศึกษา .....	53
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	53
3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ .....	53
3.2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ .....	53
3.2.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ .....	54
3.2.4 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นสีข้อม .....	54
3.2.5 อุปกรณ์ในการทดลองแบบต่อเนื่อง .....	54
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	54
3.4 วัตถุประสงค์ที่ใช้สำหรับศึกษา .....	55
3.4.1 ไม้ยูคาลิปตัส .....	55
3.4.2 น้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติ .....	55



3.5	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง .....	57
3.5.1	วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัส .....	57
3.5.2	วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติ .....	57
3.5.3	ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ .....	57
3.5.4	ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีจากสีย้อมธรรมชาติ โดยการทดลองแบบเบทซ์.....	57
3.5.5	ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ โดยการทดลอง ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ ซึ่งทำการป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง .....	57
3.5.6	ทำการปรับคืนสภาพถ่านกัมมันต์ โดยการล้างด้วยกรด .....	58
3.6	วิธีการดำเนินการวิจัย .....	59
3.6.1	เตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการกระตุ้นด้วย โซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์.....	59
3.6.2	ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ .....	62
3.6.3	ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีโดยการทดสอบไอโซเทอม การดูดซับแบบฟรุนดลิช .....	63
3.6.4	ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ .....	68
3.6.5	ศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพของถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติ .....	70
3.6.6	การวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ .....	73
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	74
4.1	การเตรียมถ่านกัมมันต์ การศึกษาสมบัติและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต .....	74
4.1.1	สมบัติเบื้องต้น.....	74
4.1.2	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อร้อยละผลผลิต และสมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส .....	74
4.2	ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผา ต่อค่าไอไดนามิกเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส .....	76
4.3	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ .....	80
4.4	การวัดสี .....	82
4.5	ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส .....	82

4.5.1 ผลของพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับน้ำเสียจากสีข้อมธรรมชาติ .....	84
4.5.2 ผลของเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับน้ำเสียจากสีข้อมธรรมชาติ .....	86
4.5.3 ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ .....	88
4.5.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดซับแบบคอลัมน์ .....	93
4.5.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการกำจัดสีจากสีข้อมธรรมชาติ.....	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	101
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	101
5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัส.....	101
5.1.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ .....	101
5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการทดลองแบบต่อเนื่องแบบคอลัมน์.....	102
5.1.4 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการกำจัดสีจากสีข้อมธรรมชาติ .....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	103
รายการอ้างอิง .....	104
ภาคผนวก .....	108
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส.....	109
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์ค่าเถ้าของถ่านกัมมันต์ .....	111
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ .....	112
ภาคผนวก ง ความรู้เกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด .....	116
ภาคผนวก จ ความยาวคลื่นและค่าแอมซอบแบนท์ของตัวอย่างจากสีข้อมธรรมชาติ .....	118
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สาร ด้วยอินฟราเรด (FTIR) .....	120
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง พื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์ .....	122
ภาคผนวก ซ ผลการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดซับแบบคอลัมน์ .....	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	140

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างสีเชื่อมจากธรรมชาติ .....	8
ตารางที่ 2.2	การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ .....	30
ตารางที่ 2.3	เปรียบเทียบคุณสมบัติของการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยผู้วิจัยต่างๆ .....	32
ตารางที่ 3.1	การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ .....	60
ตารางที่ 4.1	สมบัติเบื้องต้นของไม้ยูคาลิปตัสจากแหล่งสิงห์บุรี .....	74
ตารางที่ 4.2	แสดงค่าประมาณของถ่านไม้ยูคาลิปตัส จากการคาร์บอนไนซ์ที่ภาวะต่างๆ .....	75
ตารางที่ 4.3	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ .....	77
ตารางที่ 4.4	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ .....	78
ตารางที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตร โพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย ของถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส.....	80
ตารางที่ 4.6	ค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียจากสีเชื่อมธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย .....	83
ตารางที่ 4.7	พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีเชื่อมธรรมชาติ (สีเขียวจากเปลือกไม้เพกา) .....	84
ตารางที่ 4.8	พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีเชื่อมธรรมชาติ (สีแดงจากเปลือกไม้ฝาง) .....	85
ตารางที่ 4.9	พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีเชื่อมธรรมชาติ (สีเขียวจากเปลือกไม้เพกา) จากการเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ปริมาณ 1 กรัมต่อ 100 ลิตร.....	85
ตารางที่ 4.10	พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีเชื่อมธรรมชาติ (สีแดงจากเปลือกไม้ฝาง) จากการเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ปริมาณ 1 กรัมต่อ 100 ลิตร.....	85
ตารางที่ 4.11	ผลของเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสีเขียวจากเพกา ด้วยถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ 1 กรัมต่อ 100 ลิตร.....	87
ตารางที่ 4.12	ผลของเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสีแดงจากไม้ฝาง ด้วยถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ 1 กรัมต่อ 100 ลิตร .....	87
ตารางที่ 4.13	การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรอนดิชการดูดซับน้ำเสียสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วย โซเดียมคลอไรด์.....	89
ตารางที่ 4.14	การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรอนดิชการดูดซับน้ำเสียสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์.....	90

ตารางที่ 4.15	การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชการดูดซับน้ำเสียสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วย โซเดียมคลอไรด์ .....	91
ตารางที่ 4.16	การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชการดูดซับน้ำเสียสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์ .....	92
ตารางที่ 4.17	น้ำหนักและปริมาตรของถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสในถังดูดติดผิวแบบแท่ง .....	93
ตารางที่ 4.18	ประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา หลังฟื้นฟูสภาพและประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ .....	97
ตารางที่ 4.19	ประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง หลังฟื้นฟูสภาพและประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ .....	98

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส .....5
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการเชื่อมด้วยลิทธิรมชาติ .....7
รูปที่ 2.3	ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์และการดูดซับ .....15
รูปที่ 2.4	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิว .....15
รูปที่ 2.5	การดูดติดผิวของ โมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง .....16
รูปที่ 2.6	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน .....19
รูปที่ 2.7	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ .....20
รูปที่ 2.8	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท .....22
รูปที่ 2.9	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช .....23
รูปที่ 2.10	เขตการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Zone) .....24
รูปที่ 2.11	ระบบดูดติดผิวแบบไหลต่อเนื่อง .....26
รูปที่ 2.12	ลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon) .....28
รูปที่ 2.13	ลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) .....29
รูปที่ 2.14	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ .....33
รูปที่ 2.15	กลุ่มฟังก์ชันนัลบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ .....41
รูปที่ 2.16	ลักษณะลำต้นไม้ยูคาลิปตัสอายุประมาณ 4 ถึง 5 ปี .....46
รูปที่ 3.1	ลักษณะวัตถุดิบก่อนไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการศึกษา .....55
รูปที่ 3.2	ลักษณะของเปลือกไม้เพกาก่อนนำมาแยกสีเชื่อมธรรมชาติ .....56
รูปที่ 3.3	ลักษณะของเปลือกไม้ฝางก่อนนำมาแยกสีเชื่อมธรรมชาติ .....56
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....58
รูปที่ 3.5	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการกระตุ้นด้วย โซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์.....61
รูปที่ 3.6	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว .....65
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว .....66
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนการศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ (ไอโซเทอมการดูดติดผิว) .....67
รูปที่ 3.9	ระบบถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง .....69
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพถ่าน โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....70
รูปที่ 3.11	ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีเชื่อมธรรมชาติ .....72

รูปที่ 4.1	ลักษณะของถ่านไม้ยูคาลิปตัสจากการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที .....	76
รูปที่ 4.2	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ .....	78
รูปที่ 4.3	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ .....	79
รูปที่ 4.4	เปรียบเทียบค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ ที่ผ่านการกระตุ้น ด้วยโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ ที่อุณหภูมิเผา 800 องศาเซลเซียส .....	79
รูปที่ 4.5	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของถ่านกัมมันต์ กำลังขยาย 1,000 เท่า .....	80
รูปที่ 4.6	ลักษณะของสีย้อมธรรมชาติที่นำมาใช้ในการทดลอง .....	83
รูปที่ 4.7	แนวโน้มน้ำไอโซเทอมการดูดติดผิวสีเขียวจากเปลือกไม้เพกา โดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11 .....	89
รูปที่ 4.8	แนวโน้มน้ำไอโซเทอมการดูดติดผิวสีเขียวจากเปลือกไม้เพกา โดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11 .....	90
รูปที่ 4.9	แนวโน้มน้ำไอโซเทอมการดูดติดผิวสีแดงจากเปลือกไม้ฝาง โดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11 .....	91
รูปที่ 4.10	แนวโน้มน้ำไอโซเทอมการดูดติดผิวสีแดงจากเปลือกไม้ฝาง โดยใช้ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11 .....	92
รูปที่ 4.11	ระบบดูดติดผิวสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา แบบไหลต่อเนื่อง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ .....	94
รูปที่ 4.12	ระบบดูดติดผิวสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง แบบไหลต่อเนื่อง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ .....	94

รูปที่ 4.13	ระบบดูดติดผิวสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา แบบไหลต่อเนื่อง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ .....	95
รูปที่ 4.14	ระบบดูดติดผิวสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง แบบไหลต่อเนื่อง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ .....	95
รูปที่ 4.15	แนวโน้มของประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ จากการดูดติดสีจากสีย้อมธรรมชาติ สีเขียวจากเพกา .....	99
รูปที่ 4.16	แนวโน้มของประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ จากการดูดติดสีจากสีย้อมธรรมชาติ สีแดงจากฝาง .....	99

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันหน่วยงานต่างๆ สนับสนุนสินค้าจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดการรวมตัวของประชากรตามหมู่บ้านต่างๆ เป็นกลุ่มหัตถกรรมหรืออุตสาหกรรมขนาดย่อม ผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดตามแหล่งทรัพยากรของแต่ละพื้นที่ส่งขายนำมาซึ่งรายได้จากภายในและภายนอกประเทศกระจายอยู่ทั่วประเทศ

กลุ่มทอผ้าบ้านทุ่งสูง ในเขตอำเภอทุ่งช้าง ทางเหนือของจังหวัดน่าน เป็นกลุ่มหัตถกรรม การทอและการย้อมด้วยสีธรรมชาติ เกิดจากการรวมตัวของกลุ่มแม่บ้านทำการย้อมผ้าด้วยสีย้อมธรรมชาติซึ่งสกัดจากส่วนต่างๆ ของพืช แล้วนำมาทอเป็นลวดลายส่งขายเป็นสินค้าที่มีชื่อเสียงของจังหวัดน่านในปัจจุบัน

องค์ประกอบหลักของสีย้อมจากธรรมชาติและน้ำที่มาจากกระบวนการย้อม เป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ที่ได้มาจากพืชแต่ละชนิด หากน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติถูกทิ้งลงสู่แหล่งน้ำอาจทำให้แหล่งน้ำนั้นเน่าเสียได้ง่าย ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีก จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดให้ได้มาตรฐานน้ำใช้ก่อน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

ปัญหาหลักของน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมธรรมชาติคือ สีที่ชัดเจนการเดินทางของแสงในน้ำ ภาพไม่สวยงามและระบบนิเวศในน้ำโดยตรง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาคูการดูดติดสีจากสีย้อมธรรมชาติ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส พิจารณาถึงการปรับปรุงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นด้วยการกระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์ (NaCl) และซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดติดสีมากขึ้น

ไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) เป็นวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในปริมาณสูง ราคาถูกและสามารถหาได้ง่ายในพื้นที่ทั่วไป นิยมนำมาปลูกเป็นป่าอนุรักษ์ เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อกระดาษ เนื่องจากปลูกง่ายและโตเร็วและทนต่อสภาพสิ่งแวดล้อมได้หลากหลาย ซึ่งอาจจะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับชุมชนที่มีปัญหาเรื่องการปนเปื้อนในแหล่งน้ำของสีย้อมธรรมชาติ ด้วยการนำถ่านกัมมันต์กรองน้ำก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีคุณสมบัติใช้เป็นสารดูดติดสีหรือสารดูดซับ แต่มักพิจารณาวัตถุดิบจากอินทรีย์วัตถุ ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอน



และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เช่น ไม้ชนิดต่างๆ หรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรืออุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวสีย้อมในน้ำเสีย จากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) เป็นสารกระตุ้นในการผลิต
- 1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมธรรมชาติ ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ )

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาการกำจัดสีย้อม โดยเน้นที่สีย้อมธรรมชาติในน้ำเสียย้อมผ้า โดยเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่เป็นไปได้ทางวิศวกรรม มาศึกษาทดลอง ขอบเขตที่ศึกษาประกอบไปด้วย

- 1.3.1 จัดเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระตุ้น และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสต่อสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น
- 1.3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง ขนาดโพรงเฉลี่ย ขนาดประสิทธิผล และสัมประสิทธิ์ความคงตัว
- 1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวสีย้อมธรรมชาติ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ pH ความเข้มข้นที่เหมาะสม และทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (Batch Process)

- 1.3.4 ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติ โดยเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติ ด้วยกรดไนตริก และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติให้อยู่ในช่วงพีเอช 2 ถึง 9
- 1.3.5 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดสีย้อมธรรมชาติ ในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดซับแบบแท่ง (Adsorption Column) ด้วยอัตราไหลของน้ำเสียคงที่ หรือ 3 ลิตรต่อชั่วโมง
- 1.3.6 ในการวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเสียจริง จากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติของกลุ่มแม่บ้านทุ่งสูง อำเภอทุ่งช้าง จังหวัดน่าน 2 โทเนล คือ
- สีเขียว จากไม้เพกา *Oroxylum indicum (L.) Kurz*
  - สีแดง จากเปลือกไม้ฝาง (หางนกยูงฝรั่ง) *Caesalpinia sappan L.*
- 1.3.7 ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำถ่านที่กรองได้มาล้างด้วยกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วล้างตามด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง แล้วนำมาอบแห้ง
- 1.3.8 ในการวิเคราะห์สี ใช้วิธีหาเปอร์เซ็นต์แอบซอเบแนนซ์ ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร โดยเลือกจากความยาวคลื่นตัวแทน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทราบข้อมูลพื้นฐานและประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีในการดูดติดสีในน้ำเสีย จากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ระดับอุตสาหกรรมหัตถกรรมท้องถิ่น รวมทั้งวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคโนโลยีการผลิตของอุตสาหกรรมการทอและย้อมผ้าพื้นบ้านของไทย

##### 2.1.1 เทคโนโลยีการทอผ้าแบบพื้นบ้าน

หัตถกรรมผ้าทอมือมีกรรมวิธีการผลิตหลากหลาย และใช้ระยะเวลายาวนานในการผลิตผ้าแต่ละผืน ตั้งแต่การนำปุยฝ้าย รังไหมมาทำเป็นเส้นใยหรือเส้นฝ้าย การย้อมสีเส้นฝ้ายหรือเส้นใยด้วยสีธรรมชาติ ก่อนนำมาทอเป็นผ้าผืน ลวดลายต่างๆ ของผ้าเกิดขึ้นตั้งแต่การย้อมโดยการมัดเส้นฝ้ายเป็นลวดลาย แล้วจึงนำมาทอเป็นผ้ามัดหมี่ หรือลวดลายที่เกิดจากการยกดอก การขิด การจก ซึ่งเกิดจากการทอผ้าตามกรรมวิธีต่างๆ

หลักการทอผ้า คือ การทำให้เส้นด้ายสองพวกขั้ดกัน โดยให้ทั้งสองพวกตั้งฉากกัน เส้นด้ายพวกหนึ่งเรียกว่าด้ายยืน และอีกพวกหนึ่งเรียกว่าด้ายพุ่ง ทำนองเดียวกับการสานด้วยไม้ไผ่หรือการสานด้วยกระดาษ ลักษณะการขั้ดกันของด้ายพุ่งและด้ายยืนจะขั้ดกันแบบธรรมดาแบบที่เรียกว่า “ลายขั้ด” หรือจะกำหนดให้เป็นลายอื่นๆ ก็ได้

##### 2.1.2 เส้นฝ้าย

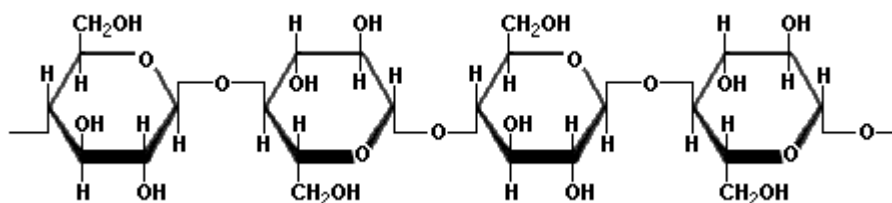
ฝ้ายเป็นพืชที่เติบโตได้ดีในดินเกือบทุกชนิด ตั้งแต่ดินทรายจนถึงดินเหนียวความ เป็นกรด-ด่างปานกลาง ความชื้นในดินสูงเป็นสิ่งจำเป็นโดยเฉพาะช่วงที่ออกดอกเป็นสมอ ดังนั้น ดินที่อุ้มน้ำได้ดีจึงเหมาะสมมากกว่า นอกจากนี้ฝ้ายยังต้องการแสงแดดจัด ต้องการอุณหภูมิ ประมาณ 25 องศาเซลเซียส นานกว่า 150 วัน แหล่งปลูกฝ้ายจึงสำหรับเขตร้อน ฝ้ายให้ประโยชน์ หลายอย่าง เช่น เส้นใยของเมล็ดทำเครื่องนุ่งห่ม น้ำมันจากเมล็ดฝ้ายใช้บริโภคได้ ส่วนกากเมล็ด เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ที่มีกระเพาะหมัก เช่น วัว ควาย แพะ เป็นต้น

การปลูกฝ้าย โดยทั่วไปจะเริ่มปลูกฝ้ายในช่วงฤดูฝน เมื่อผลของฝ้ายหรือสมอฝ้าย แก่จัด เปลือกสมอแตกออกเห็นปุยฝ้ายจึงเก็บเกี่ยว การเตรียมแปลงปลูกต้องทำความสะอาด แปลงโดยเก็บเศษไม้และฟางดินให้แห้ง ถ้าแปลงปลูกอยู่ในบริเวณที่มีความชื้นสูง ควรปลูกฝ้ายบน สันร่อง ถ้าความชื้นต่ำควรปลูกฝ้ายบนพื้นราบหรือท้องร่อง โดยวิธีหยอดเมล็ดให้ลึก 3 ถึง 5 เซนติเมตร ระยะแถวห่างกัน 100 เซนติเมตร ระยะต้นฝ้ายในแถวห่างกัน 30 เซนติเมตร ใช้เวลา ประมาณ 7 เดือน จึงเก็บปุยฝ้ายได้

เมื่อสมอฝ้ายแก่จัดและแตก ให้เก็บปุยฝ้ายทันที โดยเลือกเก็บเฉพาะปุยฝ้ายที่มี เมล็ดติดอยู่ เมื่อเก็บมาแล้วต้องแยกสิ่งปนเปื้อนและปั่นแยกเมล็ดให้เร็วที่สุด แล้วอัดปุยฝ้ายให้ แน่นก่อนเก็บไว้ใช้งานต่อไป

ปุยฝ้าย คือ กลุ่มของใยฝ้ายซึ่งเป็นขนของเมล็ดฝ้าย มีความยาวเฉลี่ย 1.75 ถึง 3.75 เซนติเมตร แล้วแต่พันธุ์ องค์ประกอบทางเคมีของใยฝ้ายเป็นสารเซลลูโลส ร้อยละ 90 ถึง 95 ของน้ำหนักแห้ง นอกนั้นเป็นโปรตีน เพคติน ไซ แถ้าและอื่นๆ โดยสารเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์แบบโซ่ของ  $\beta$ -D-glucose จำนวน 10,000 ถึง 14,000 หน่วย แต่ละหน่วยยึดจับกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ที่มีชื่อเฉพาะว่า  $\beta$ -1,4-glycosidic bond

ใยฝ้ายทนต่อด่างและตัวทำละลายอินทรีย์ได้ แต่ไม่ทนกรดเข้มข้นและแสงแดด ยิ่งมีความชื้นอยู่ด้วยยิ่งทำให้ฝ้ายสลายตัวได้ง่ายในแสงแดดจัด จึงไม่ควรตากผ้าฝ้ายเปียกหรือผ้าฝ้ายขึ้นกลางแดด ฝ้ายทนความร้อน 120 องศาเซลเซียส ได้นานหลายชั่วโมง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ในภาวะอากาศแห้ง ฝ้ายจะเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนได้ง่าย และเนื่องจากภายในโครงสร้างของเซลลูโลสมีหมู่ -OH หลายหมู่ทำให้ฝ้ายชอบน้ำทำให้เปียกได้ง่าย และย้อมติดสีต่างๆ ได้ดี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

(Available from: <http://dic.moohin.com/c/cellulose.shtml>)

ใยของปุยฝ้ายแต่ละพันธุ์จะมีขนาดและความยาวแตกต่างกัน ซึ่งใยฝ้ายเนื้อละเอียดจะติดสีย้อมได้เร็วกว่า ฝ้ายต่างสายพันธุ์จึงมีคุณภาพต่างกัน อย่างไรก็ตามใยฝ้ายมีความยาวเฉลี่ย 1.75 ถึง 3.3 เซนติเมตรเท่านั้น ก่อนนำมาถักทอเป็นผืนผ้าต้องนำใยฝ้ายมาปั่นเป็นเกลียวเส้นฝ้าย ตามความยาวที่ต้องการก่อน โดยคัดเอาปุยฝ้ายที่มีเมล็ดติดผืนแดดจนแห้ง แล้วนำมาหีบหรืออ้าวเพื่อแยกเมล็ด เมื่อได้ปุยฝ้ายปราศจากเมล็ดจำนวนมากแล้ว จึงบรรจุในกะเพียดติดปุยฝ้ายให้แตกและพองตัว แบ่งมาแผ่เป็นแผ่นแล้วม้วนเป็นดิวด้วยไม้ล้อฝ้าย จากนั้นนำเข้าเครื่องปั่นเส้นฝ้าย คือหลาหรือไ้ เพื่อดึงใยฝ้ายออกจากดิวฝ้ายให้เป็นเส้นฝ้าย ภาษาท้องถิ่นเรียกการปั่นเส้นฝ้ายนี้ว่า การเข็นฝ้าย เมื่อเส้นฝ้ายมีจำนวนมากพอจะนำมารวมกันเป็นกลุ่มเส้นฝ้าย เรียกว่า การทำไ้ฝ้าย ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่าเปียนำไ้ฝ้ายชุบน้ำให้เปียกและแช่น้ำข้าวเจ้าสุก ทูบไ้ฝ้ายที่เปียกน้ำข้าวด้วยท่อนไม้ ให้น้ำข้าวซึมเข้าเส้นฝ้ายทุกเส้น เรียกวิธีทำอย่างนี้ว่า ฆ่าฝ้าย

เมื่อฆ่าฝ้ายและย้อมสีเสร็จนำเส้นฝ้ายเข้ากงและอ๊ก เก็บเส้นฝ้ายไว้ในอ๊กเพื่อใช้เป็นฝ้ายเส้นยืน และเส้นพุ่งในการทอต่อไป

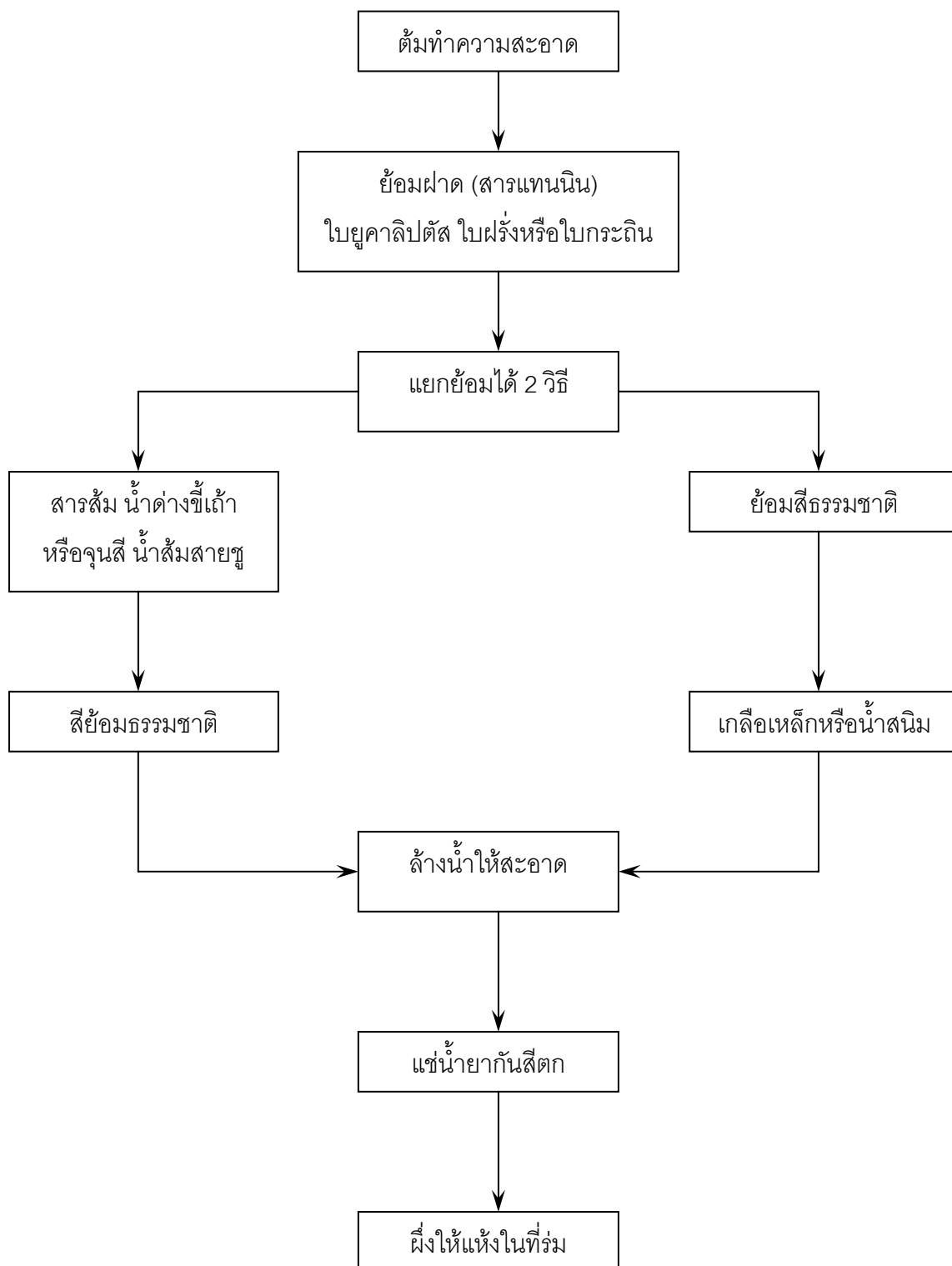
### 2.1.3 การย้อมสี

ปัจจุบันความนิยมฝ้ายย้อมสีธรรมชาติมีมาก ฝ้ายส่วนใหญ่จึงถูกย้อมด้วยสีธรรมชาติจากเปลือกไม้ แก่นไม้ และใบไม้ หรือแม้แต่สีแดงจากดินลูกรัง หรือสี เทา-ดำ จากโคลน ก็ใช้ย้อมผ้าได้ ผ้าที่ย้อมด้วยสีธรรมชาติให้สีอ่อนละมุน ดูแล้วเย็นอารมณ์และมั่นใจว่าปลอดภัยจากสารเคมี แต่ฝ้ายย้อมสีธรรมชาติมีจุดอ่อนคือ สีไม่ทนต่อแสงและอากาศ เมื่อใช้ผ่านานไปเนื้อผ้าฝ้ายนุ่มเบาสบายแต่สีซีดลงเรื่อยๆ แต่ผู้นิยมฝ้ายส่วนใหญ่ชอบผ้าฝ้ายมากกว่าสี ปัญหาสีซีดจะหมดไปสำหรับเส้นไหมที่ทำยากและราคาแพงกว่าฝ้ายมาก การย้อมสีธรรมชาติให้สม่ำเสมอก็ยาก คงจะไม่คุ้มค่าถ้าใช้ผ้าไม่กี่ครั้งแล้วสีซีดจางไป จึงไม่นิยมย้อมไหมด้วยสีธรรมชาติ

การย้อมสีแบ่งเป็น สีสังเคราะห์ และสีธรรมชาติ การย้อมด้วยสีสังเคราะห์จะติดได้นาน ทนต่อการซักและแสงแดด สะดวก รวดเร็ว แต่มีข้อเสีย คือ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีโลหะหนักจำพวก โครเมียม ดีบุก และตะกั่ว ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ผลิตและผู้ใกล้ชิด จากการสัมผัสและสูดดมสารที่ตกค้างในเนื้อผ้า ในขณะที่เดียวกันการย้อมด้วยสีธรรมชาติ กำลังได้รับความนิยมจากผู้บริโภคและองค์กรต่างๆ เพราะเป็นการสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสีสังเคราะห์ ทั้งยังมีวิธีย้อมที่ทำให้สีติดทน ทนการซักล้างด้วยตัวแปรสีหรือตัวติดสียังดำเนินการต่อไป ดังเช่นข้อมูลมากมายจากนักทดลองต่างๆ ในห้องปฏิบัติการที่ทันสมัย และชีวิตจิตใจที่มุ่งมั่นของช่างย้อมในหมู่บ้าน ช่วยส่งเสริมให้ชาวบ้านมีงานทำและมีรายได้เพิ่มขึ้น วิธีการย้อมสีแบ่งได้เป็น 2 วิธีได้แก่

- 1) การย้อมด้วยมือหรือการย้อมแบบถังเปิด เป็นวิธีดั้งเดิมสามารถย้อมได้ที่ละน้อยๆ เงินลงทุนค่าอุปกรณ์ค่อนข้างต่ำ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมครอบครัวหรือในโรงงานทอผ้าขนาดย่อมถึงขนาดกลาง การย้อมด้วยมือนี้สามารถพลิกแพลงหรือเปลี่ยนแปลงการย้อมตามความเหมาะสมไปได้เรื่อยๆ แต่ข้อเสียคือไม่สามารถย้อมได้คราวละมากๆ
- 2) การย้อมด้วยเครื่องจักร เป็นวิธีการย้อมที่ต้องลงทุนค่าเครื่องจักรสูง และสามารถย้อมได้คราวละมากๆ จึงใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงขนาดใหญ่

ปัจจุบันผ้าทอแบบพื้นบ้านกำลังได้รับความนิยมจากผู้บริโภค จึงมีการสนับสนุนให้ย้อมผ้าด้วยสีย้อมธรรมชาติ ซึ่งขั้นตอนการย้อมด้วยสีธรรมชาติแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการย้อมด้วยสีธรรมชาติ

## 2.2 สีย้อม (Dye)

สีย้อมที่อยู่ในอุณหภูมิพอเหมาะและความเข้มข้นมากพอ จะละลายหรือกระจายได้ในตัวกลาง ทำให้ตัวกลางมีสีเกิดขึ้น ตัวกลางที่ใช้อาจเป็นกระดาษ ผืนผ้า อาหาร ขี้ผึ้ง สิ่งทอ หนั เป็นต้น สีย้อมแบ่งจากแหล่งที่มาได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ สีย้อมธรรมชาติ และสีย้อมสังเคราะห์

### 2.2.1 สีย้อมธรรมชาติ

การย้อมผ้า นั้นมีมานานแล้ว กรรมวิธีทำให้สีย้อมติดกับเนื้อเส้นใยในผ้ามีหลายวิธีตามความชำนาญของผู้ผลิตตั้งแต่การย้อมด้วยวิธีอย่างง่าย ไปจนถึงกระบวนการที่มีความซับซ้อน แต่เดิมนั้นสีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ เช่น สีย้อมอินดิโก (Indigo Dye) ซึ่งให้สีคราม สีย้อมเฮนนะ (Henna Dye) ที่ให้สีแดงจากต้นเทียน สีย้อมอะลิซาริน (Alizarin Dye) สีย้อมไทรินเพอร์เพิล (Tyripurple Dye) โดยใช้ออกไซด์ของโลหะเป็นสารช่วยในการติดสี ซึ่งเรียกรวมกันว่า สารมอร์แดนท์ (Mordant) เช่น สารส้ม (Aluminium Sulphate) จุลสี (Copper Sulphate) หรือสนิมเหล็ก (Ferrous Sulphate) เป็นต้น โดยทั่วไปสีย้อมธรรมชาติจะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่ให้สี สามารถละลายน้ำและถูกดูดซับได้ แล้วแต่ลักษณะเฉพาะตามชนิดที่มา ซึ่งลักษณะหรือส่วนประกอบของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติก็จะมีส่วนผสมของสารอินทรีย์ที่ให้สี และสารช่วยในการติดสีเป็นองค์ประกอบหลัก

ในการสกัดสีและการเลือกตัวทำละลาย อาศัยแนวทางจากตัวทำละลายที่ใช้กันมากทางด้านไมโครเทคนิค (Micro Technique) ซึ่งเลือกใช้ 2 ชนิดคือ น้ำ และ 45 เปอร์เซ็นต์ กรดกลacialอะซีติก (Glacial Acetic Acid) การสกัดใช้วิธีต้มและกรอง มอร์แดนท์ (Mordant) เลือกใช้ 1 เปอร์เซ็นต์ เฟอริก อะลูมิเนียม (Ferric Alum) ซึ่งเป็นมอร์แดนท์สำหรับการย้อมนิวเคลียส 1 เปอร์เซ็นต์ สแตนเนสคลอไรด์ (Stannous Chloride) มอร์แดนท์ที่ให้สีช่วยในการย้อมเส้นใย และ 1 เปอร์เซ็นต์ สารส้ม (Potash Alum) อะลูมิเนียมที่ราคาถูกที่สุด

สีย้อมที่ได้จากพืชจัดเป็นกลุ่มสารสีหลักของสีย้อมธรรมชาติ โดยเป็นสีย้อมที่ได้จากทุกส่วนของพืชทั้ง ราก เปลือก ลำต้น เนื้อไม้ ใบ ดอก และเมล็ด ซึ่งสีย้อมกลุ่มนี้มีความหลากหลายตามชนิดของพืช สีย้อมที่อยู่ในอุณหภูมิพอเหมาะและความเข้มข้นมากพอ จะละลายหรือกระจายได้ในตัวกลาง ทำให้ตัวกลางมีสีเกิดขึ้น ตัวอย่างของสีย้อมธรรมชาติจากส่วนต่างๆ ของพืชแสดงตามตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสีย้อมจากธรรมชาติ

ลำดับที่	ชื่อทางราชการ	ชื่อพฤกษศาสตร์	ส่วนที่ให้สี	สี
1	กรรณิการิ	<i>Nyctanthes arbor-tristis</i> Linn.	หลอดดอก	เหลืองทอง
2	ก่อ	<i>Quercus</i> Spp.	เปลือก	เหลืองเข้ม
3	แกแล	<i>Maclura cochinchinensis</i> Corner.	แก่น	เหลือง
4	โกงางใบใหญ่	<i>Rhizophora mucronata</i> Poir.	เปลือก	น้ำตาล
5	โกงางใบเล็ก	<i>Rhizophora apiculata</i> Bl.	เปลือก	น้ำตาล
6	ขนุน	<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lamk.	แก่น, ราก	น้ำตาลแกม เหลือง
7	ขนุนป่า	<i>Artocarpus lanceifolius</i> Roxb.	แก่น	เหลือง
8	คนทา	<i>Harrison perforata</i> Merr.	ผล	ดำ
9	คราม	<i>Indigotura tinctoria</i> Linn.	ต้น	น้ำเงิน
10	คาง	<i>Albizia odoratissima</i> Benth.	เปลือก	น้ำตาล
11	เคี่ยม	<i>Cotylelobium melanoxyton</i> Pierre.	เปลือก	น้ำตาลดำ
12	คำป่า	<i>Mallotus philippinensis</i> Muell Arg.	ราก, เมล็ด	แดง
13	คำฝอย	<i>Carthamus tinctorius</i> Linn.	ดอก	แดง
14	คำแสด	<i>Bixa Orellana</i> Linn.	เยื่อเมล็ด	แสด
15	แฉลบแดง	<i>Acacia leucophloea</i> Willd.	เนื้อไม้	น้ำตาล
16	ตะขบไทย	<i>Flacaurtia cataphracta</i> Roxb.	ใบ	ซีม้
17	ตับเต่าต้น	<i>Diospyros ehretioides</i> Wall. Ex.	ผล	ดำ
18	ติวชน	<i>Cratoxylum formosum</i> (Jack) Byer.	เปลือก	น้ำตาลเข้ม
19	ทองกวาว	<i>Butea monosperma</i> O. Ktze.	ดอก	เหลือง
20	เทียนกิ่ง	<i>Lawsonia inermis</i> Linn.	ใบ	ส้มแดง
21	นนทรี	<i>Peltophorum pterocarpum</i> (DC.) K.Heyne	เปลือก	น้ำตาล
22	ประดู่	<i>Pterocarpus macrocarpus</i> Kurz.	แก่น	แดงคล้ำ
23	ประสัก	<i>Bruguiera gymnorrhiza</i> Lamk.	เปลือก	น้ำตาลแกม แดง
24	ฝาง	<i>Caesalpinia sappan</i> Linn.	เปลือก	แดง
25	ฝาดแดง	<i>Lemnizera littorea</i> (Jack) Voigt.	เปลือก	สีอิฐ
26	เพกา	<i>Orexyllum indicum</i> Vent.	เปลือก	เขียว

(ที่มา: ของป่าในประเทศไทย สำนักวิชาการป่าไม้, 2539)



## 2.2.2 สีย้อมสังเคราะห์

เป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัด จะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีนไซลีนแอนทราซีนโทลูอินแนพทาลีน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมา มีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของเส้นใยและกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป

การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ เราสามารถจะทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง

## 2.3 การเตรียมน้ำสีย้อม

การเตรียมน้ำสีย้อมจากวัสดุจากธรรมชาติจะคล้ายคลึงกัน เนื่องจากเป็นกระบวนการสกัดสีโดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย ในที่นี้จะกล่าวถึงลักษณะการเตรียมน้ำสีย้อมจากเปลือกไม้ ดังนี้

- 1) สับเปลือกไม้ให้เป็นชิ้นเล็กๆ ลงแช่น้ำนาน 2 ชั่วโมง ขึ้นต้มที่จุดเดือดอ่อนๆ นาน 2 ชั่วโมง
- 2) ใช้ผ้าขาวบางกรองแยกน้ำสีธรรมชาติ และเศษเปลือกไม้ ออกจากกันลงไปภาชนะที่เหมาะสม ถ้าน้ำสีเย็นก่อนย้อม ให้อุ่นสีธรรมชาติที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าสู่กระบวนการย้อมสี

## 2.4 การบำบัดสีในน้ำทิ้ง

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในอุตสาหกรรมหัตถกรรมฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลืตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำทิ้ง ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้

### 1) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้มจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอสิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

### 2) กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ

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

- ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ดัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกันเพียงบ่อนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดี ลดลงประมาณ 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

### 3) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่ถูกดูดซับต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 แต่โดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสี จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบน

ถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วย ปูนขาว ปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 11 ส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูงต้องมีการปรับ พีเอชให้เป็นกลางอีกครั้งก่อนปล่อยน้ำทิ้ง การกำจัดดีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็น กระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะ เพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้ โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูง มาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกาก และการปรับพีเอชก่อนปล่อยอีกด้วย

#### 4) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่คลอโมฟอร์มที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ เป็นพวก วงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโม โฟอร์มที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการ กำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่มากนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการ ปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนเนชั่น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของ หมู่โครโมฟอร์มของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำ ปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมผ้า ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบไปด้วยไนโตรเจนคลอรีน หรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

#### 5) เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอา สารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

- ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็น คอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภท สีดิสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีซัลเฟอร์ สีแควด และสีอะซิติก ที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

- ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เหมาะสำหรับใช้กำจัดอิมัลชันสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่น ออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำ

ทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามสีที่ย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

- ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane) ใช้กำจัดสีที่ย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous Zirconium (IV) Oxide และกรดโพลีอะคลีลิกส์ (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ หรือมากกว่า

## 6) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

ใช้กำจัดสีที่ย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโทรไลต์เหล่านี้ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

## 7) เทคโนโลยีใหม่ๆ (New Technology)

เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น

- ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงาน ประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกัน ดังนั้นเทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

- ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กโทรไลซิสที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีนและไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ เซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันน้ำตาลกลีโคสหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

## 2.5 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้เกาะจับและติดอยู่บนผิวของมัน ปฏิกิริยาการนี้จัดว่าเป็น

การเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลของ คอลลอยด์จะเรียกว่าเป็น “Adsorbate” ส่วนของแข็งที่ผิวเป็นที่เกาะจับของ “Adsorbate” เรียกว่า “Adsorbent” พื้นที่ผิวที่กล่าวไปนั้น ไม่ได้หมายความว่าเฉพาะแค่พื้นที่ผิวรอบๆ รูปทรงของสารดูดติดผิวเท่านั้น แต่ยังหมายรวมถึงพื้นที่ภายในโพรงหรือรูที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวทั้งหมดที่มีความสามารถในการเป็นที่ยึดเกาะของสารดูดติดผิว (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2539)

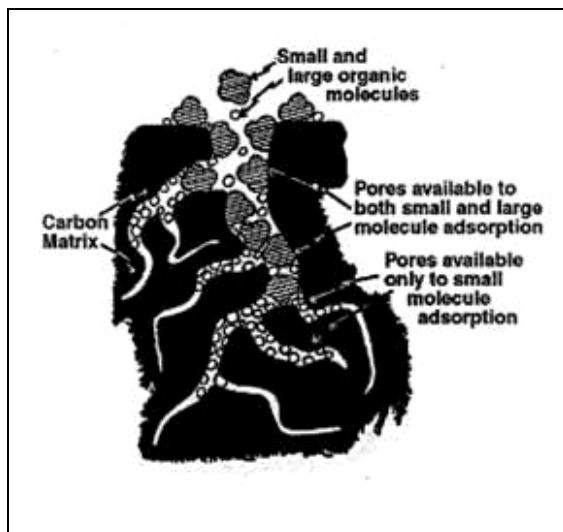
การประยุกต์ใช้งานโดยใช้กระบวนการดูดติดผิวมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง ในการป้องกันและปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้น รวมทั้งมีการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นอย่างมาก จึงได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาสารดูดติดผิว เช่น ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น เพื่อให้คุณภาพใช้งานดียิ่งขึ้น

### 2.5.1 หลักการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของแข็งกับของเหลว ของแข็งกับก๊าซ มีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ มากมาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม และทางด้านสิ่งแวดล้อม การดูดติดผิวจะเกี่ยวข้องกับการ สะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัส อนุภาคของสารที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดติดผิว เรียกว่า (Adsorbent) ทฤษฎีการดูดติดผิวสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ การดูดติดผิวแบบทางกายภาพ (Physical Adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยแรงระหว่างโมเลกุลที่อ่อน และการดูดติดผิวแบบทางเคมี (Chemical Adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดและพื้นที่ผิวของของแข็งที่เป็นวัสดุดูดติดผิว ซึ่งความแตกต่างระหว่งการดูดติดผิวแบบทางกายภาพและแบบทางเคมี สรุปได้ดังนี้ (Faust และ Aly, 1978)

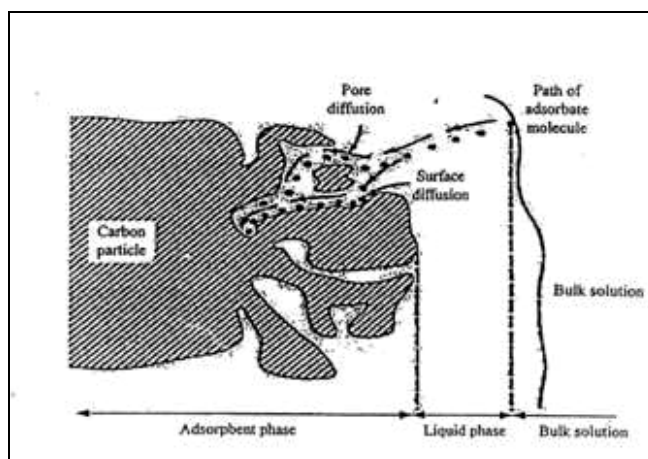
- 1) การดูดติดผิวทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการใช้หรือว่าถ่าย อิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูด กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ง่ายและเกิดขึ้นช้า เนื่องจากอาศัยการแพร่ของตัวถูกดูด โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นแล้วจะแปรผันกลับได้ยากกว่า
- 2) การดูดติดผิวทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบไม่จำเพาะเจาะจงเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนพื้นผิวของตัวดูดติดผิว แต่เกิดไปทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดติดผิว โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วถึงทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดติดผิวได้ ในขณะที่การดูดติดผิวแบบทาง

เคมีเป็นกระบวนการที่เกิดเฉพาะเจาะจงกับพื้นที่ หรือบริเวณเฉพาะ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง



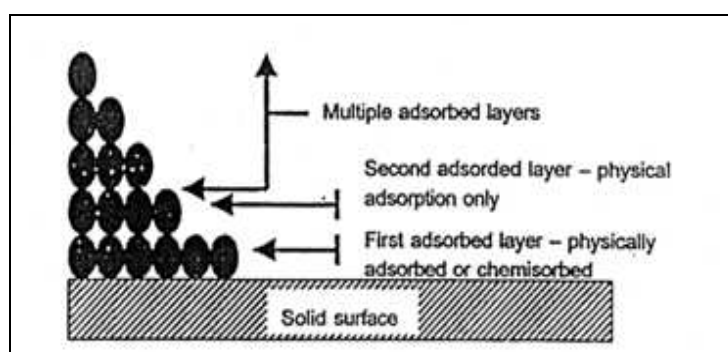
รูปที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์และการดูดซับ

(Available from: <http://www.chemvironcarbon.com/carbon/tar.htm>)



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิว (Montgomery, 1985)

กระบวนการดูดติดผิว โมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดเข้ามาในชั้นแรกจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดติดผิวได้ จึงเกิดการดูดติดผิวทั้งแบบกายภาพและทางเคมี ส่วนการดูดติดผิวของโมเลกุลในชั้นต่อไป จะเกิดการดูดติดผิวแบบกายภาพเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งรูปแบบของจำนวนชั้นของโมเลกุลที่ดูดติดผิวแบบกายภาพ จะมีความสำคัญต่อการเลือกใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการดูดติดผิว หรือคำนวณไอโซเทอมการดูดติดผิว

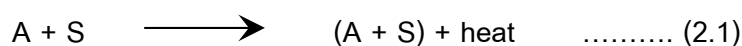


รูปที่ 2.5 การดูดติดผิวของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง (Myer, 1999)

## 2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

- 1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์ โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดติดผิว ที่เป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว โดยกลไกการดูดติดผิวที่ผิวภายนอกของสารที่ไม่มีโพรง จะมีอัตราการดูดติดผิวที่เป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว สำหรับสารดูดติดผิวที่มีโพรงอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรง ถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film Diffusion ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว

- 2) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวถูกละลาย โดยการดูดซับในสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูง
- 3) ลักษณะของสารดูดซับ เนื่องจากความสามารถในการละลายน้ำของสารละลายและของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลงเนื่องจากตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้คือ น้ำ เมื่อตัวถูกละลายมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดี และมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง ก็ยากที่จะดูดซับได้ดี นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ หากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นกลไก การควบคุมการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ จะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลตัวถูกละลาย
- 4) อุณหภูมิ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic Reaction) ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังสมการ



เมื่อ

A	=	สารถูกละลาย
S	=	พื้นที่ผิว

- 5) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นกับการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำรอบตัวถูกละลายจะมีความหนาแน่น และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของสารดูดซับ ดังนั้นการแพร่ภายนอกก็จะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ในกรณีนี้ดูดซับแบบคอลัมน์ ความปั่นป่วนในถังก็คือความเร็วของสารละลายที่



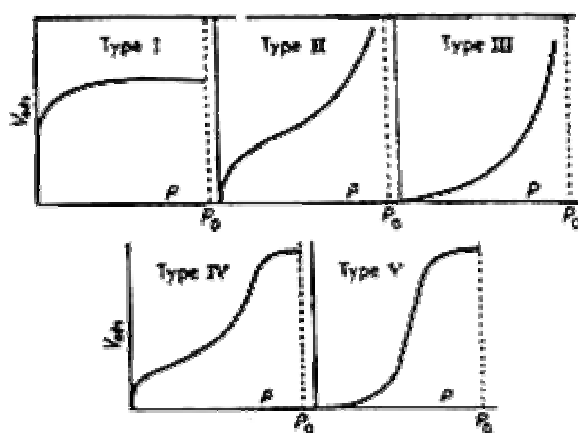
ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของถัง ซึ่งจะทำให้อัตราในกาดูดติดผิวสูงขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

- 6) พีเอช มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดติดผิวได้ค่อนข้างแข็งแรง การดูดติดผิวไอออนอื่นๆ จึงมีผลกระทบเนื่องจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ด้วย
- 7) เวลาสัมผัส ในกรณีของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ เวลาสัมผัสจะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถัง ถ้าเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของตัวถูกดูดลดลง อายุการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จะนานขึ้น อย่างไรก็ตามเวลาที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าช่วงเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเลยช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแล้วแทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

### 2.5.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว

สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium) จะเกิดขึ้นในกระบวนการดูดติดผิว เมื่อสารที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะละลายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดติดผิวของสารที่ถูกดูดติดผิวมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดติดผิวออกสู่สารละลาย จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ เรียกจุดนี้ว่า สมดุลของการดูดติดผิว ที่จุดสมดุลนี้จะเป็นสมดุลของระบบทั้งหมด ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิว บนพื้นผิวของสารดูดติดผิว หรือในของเหลวได้ ไม่ว่าจะเป็นสารถูกดูดติดผิว สารดูดติดผิว ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ ปริมาณการดูดติดผิวที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณของสารดูดติดผิว ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ที่จุดสมดุล เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 รูปร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิวจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดติดผิว ลักษณะการดูดติดผิวของพื้นที่ตัวดูดติดผิวในขณะที่เกิดกระบวนการดูดติดผิว



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน (Faust และ Aly, 1978)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวมีหลายรูปแบบ มีผลมาจากการพัฒนาความรู้และการสังเกต แต่โดยทั่วไปที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายทางทฤษฎีของการดูดติดผิว จะกล่าวอ้างถึงไอโซเทอม 3 แบบ ดังต่อไปนี้

### 1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานแบบจำลองไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ คือ

- โมเลกุลถูกดูดติดผิวอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว
- มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดติด
- พื้นที่ของบริเวณดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
- พลังงานการดูดติดผิวมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

การดูดติดผิวจากสารละลายโดยสารดูดติดผิว แสดงดังสมการที่ 2.2

$$X = (X_m bC) / (1 + bC) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว

มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว

ที่ภาวะสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม

C = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวในสารละลาย

มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือโมลต่อลิตร

b = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

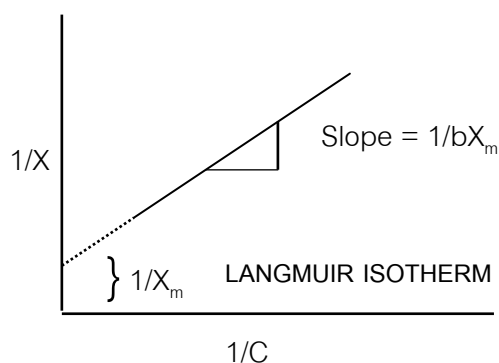
เมื่อ X เข้าสู่อัน  $X_m$  และ C เข้าใกล้ค่าอนันต์ (Infinity,  $\infty$ ) จะเขียนสมการได้เป็น

$$C/X = (1/bX_m) + (C/X_m) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C/X$  กับ C ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน  $1/X_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/bX_m$  และเมื่อหารด้วย C จะได้สมการเส้นตรงคือ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C)(1/bX_m) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C$  จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ  $1/bX_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/X_m$  จากสมการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Valencia และ Gloyna, 1972)

2) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (BET : Brunauer-Emmett-Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท พัฒนามาจากสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ที่คิดจากการดูดติดแบบชั้นเดียว (Monolayer) เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งแต่ละโมเลกุลในการดูดติดผิวชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งมีโมเลกุลชั้นที่สอง ดูดติด เช่นเดียวกับชั้นอื่นๆ ต่อไป โดยแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

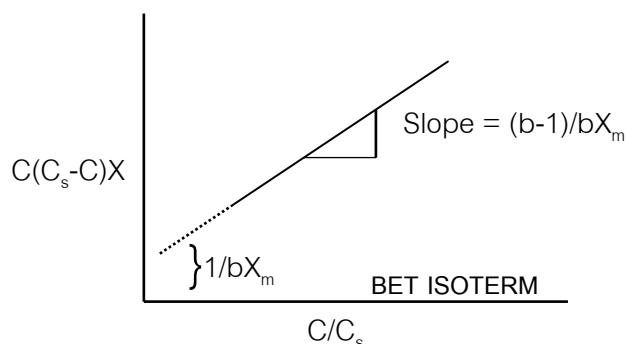
$$X = (X_m b C) / (C_s - C)(1 + (b-1)C/C_s) \dots\dots\dots(2.5)$$

- เมื่อ X = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว  
มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม
- X<sub>m</sub> = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว  
ที่ภาวะสมดุลมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม
- C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลาย  
มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือโมลต่อลิตร
- C<sub>s</sub> = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิว ณ ทุกๆ ชั้น  
มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือโมลต่อลิตร
- b = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.5 สามารถเขียนได้เป็น

$$C/X(C_s - C) = (1/X_m b) + ((b-1)/X_m b)(C/C_s) \dots\dots\dots(2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C/X(C<sub>s</sub>-C) กับ C/C<sub>s</sub> จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ (b-1)/bX<sub>m</sub> และจุดตัดแกน y เท่ากับ 1/bX<sub>m</sub> จากสมการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (Valencia และ Gloyna, 1972)

### 3) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้คือ

$$X/m = KC^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ

มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม

$m$  = น้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม

$C$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย ที่ภาวะสมดุลย์  
มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร หรือโมลต่อลิตร

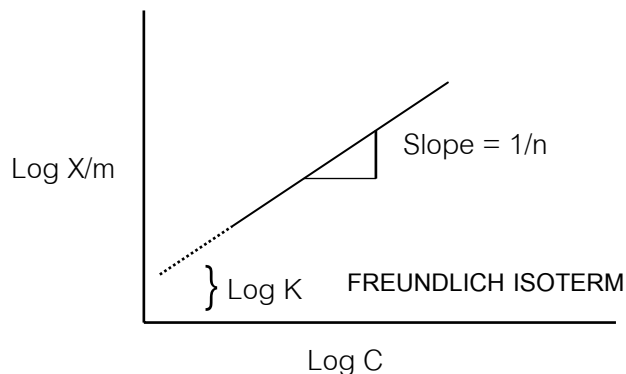
$K, 1/n$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ

จากสมการที่ 2.7 สามารถเขียนสมการในรูป Logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\text{Log } (X/m) = \text{Log } K + 1/n \text{ Log } C \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\text{Log } (X/m)$  กับ  $\text{Log } C$  จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\text{Log } K$  ของ  $\text{Log } (X/m)$  ที่  $\text{Log } C = 0$

( $C = 1$ ) จากสมการที่ 2.8 แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 จากสมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดติดผิว โดยถ้าค่า  $1/n < 1$  แสดงถึงความสามารถในการดูดติดผิวที่ดี และถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมที่มีความชันมาก แสดงว่าการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ และเกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ



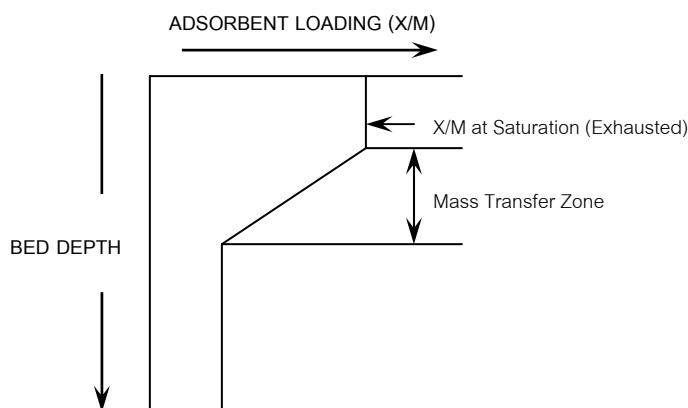
รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Valencia และ Gloyna, 1972)

## 2.6 ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (The Adsorption Column)

ในกระบวนการทดลองแบบแบทช์ (Batch) ปริมาณของตัวดูดติดผิวที่รู้แน่นอนและเพียงพอจะถูกผสมลงในสารละลายที่มีตัวถูกดูดติดผิว เมื่อให้เวลาการสัมผัสที่เหมาะสมจนกระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้นสมบูรณ์ ตัวดูดติดผิวและตัวถูกดูดติดผิวก็จะแยกออกจากสารละลาย ก็เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการกำจัดสารที่ไม่ต้องการในสารละลาย ในการประยุกต์ใช้งานกระบวนการดูดติดผิวซึ่งเป็นกระบวนการที่มีของเหลวหรือของไหลไหลอย่างต่อเนื่อง มักจะใช้กระบวนการดูดติดผิวในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ซึ่งจะมีตัวดูดติดผิวบรรจุอยู่ภายในถังและให้ของเหลวหรือของไหลผ่านและเกิดกระบวนการดูดติดผิวเอาสารที่ไม่ต้องการออกจากของไหล กระบวนการดูดติดผิวโดยอาศัยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการแบบแบทช์ (Faust และ Aly, 1978) จุดเริ่มต้นกระบวนการดูดติดผิวในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ สารดูดติดผิวจะสัมผัสกับสารละลายที่มีตัวถูกดูดติดผิวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตัวดูดติดผิวจะทำตัวเหมือนเป็นชุดของชั้นดูดติดผิว ซึ่งแต่ละชั้นจะสัมผัสกับสารละลายใหม่ที่ไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นการใช้ตัวกลางให้สามารถดูดติดผิวได้เต็มความสามารถของตัวกลาง โดยพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายที่คงที่ (ตัวกลางสัมผัสกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดตลอดเวลา) ซึ่งตรงข้ามกับกระบวนการแบบแบทช์ที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดในสารละลายจะลดลงเรื่อยๆ (เนื่องจากถูกดูดติดผิวออกจากสารละลายอยู่เรื่อยๆ )

เมื่อสารละลายไหลผ่านชั้นของตัวกลางที่อยู่ในถังดูดซับแบบคอลัมน์หน้าคลื่น (Wave Front) หรือเขตถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Zone) จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการดูดซับตัวสารละลายในชั้น แสดงดังรูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับตามความลึกของชั้นตัวดูดซับ

เมื่อสารละลายไหลผ่านเข้าไปในชั้นตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับที่ชั้นบนของชั้นกลางจนกระทั่งถึงจุดสมดุลของตัวถูกดูดซับ ณ ขณะนี้ตัวดูดซับได้ดูดซับตัวสารละลายไว้จนเต็มความสามารถในการดูดซับแล้ว ที่ชั้นถัดลงไปเป็นชั้นที่กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นและตัวถูกดูดซับกำลังถูกดูดด้วยตัวดูดซับ บริเวณที่เกิดการดูดซับอยู่เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวลสาร ความหนาของเขตการถ่ายเทมวลสารนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสารละลาย ลักษณะของตัวดูดซับ และปัจจัยทางชลศาสตร์ (Hydraulic Factor) ของถังดูดซับตัวเอง และเมื่อเขตถ่ายเทมวลสารเคลื่อนที่ลงไปจนกระทั่งจุดล่างสุดของถังดูดซับ ที่จุดนี้เรียกว่า จุดยุติ (Breakthrough) ซึ่งหมายถึงจุดที่ตัวถูกดูดซับในสารละลายหลุดออกจากถังดูดซับแบบคอลัมน์



รูปที่ 2.10 เขตการถ่ายเทมวล (Faust และ Aly, 1978)

เวลาหรือปริมาตรของน้ำที่ผ่านถังดูดซับแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดยุติ ซึ่งเป็นจุดที่บอกว่างถังดูดซับแบบคอลัมน์หมดความสามารถในการบำบัด จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- 1) ขนาดของตัวกลางที่อยู่ในถังดูดซับ เมื่อขนาดของตัวกลางเพิ่มขึ้นเวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดซับแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดยุติจะลดลง

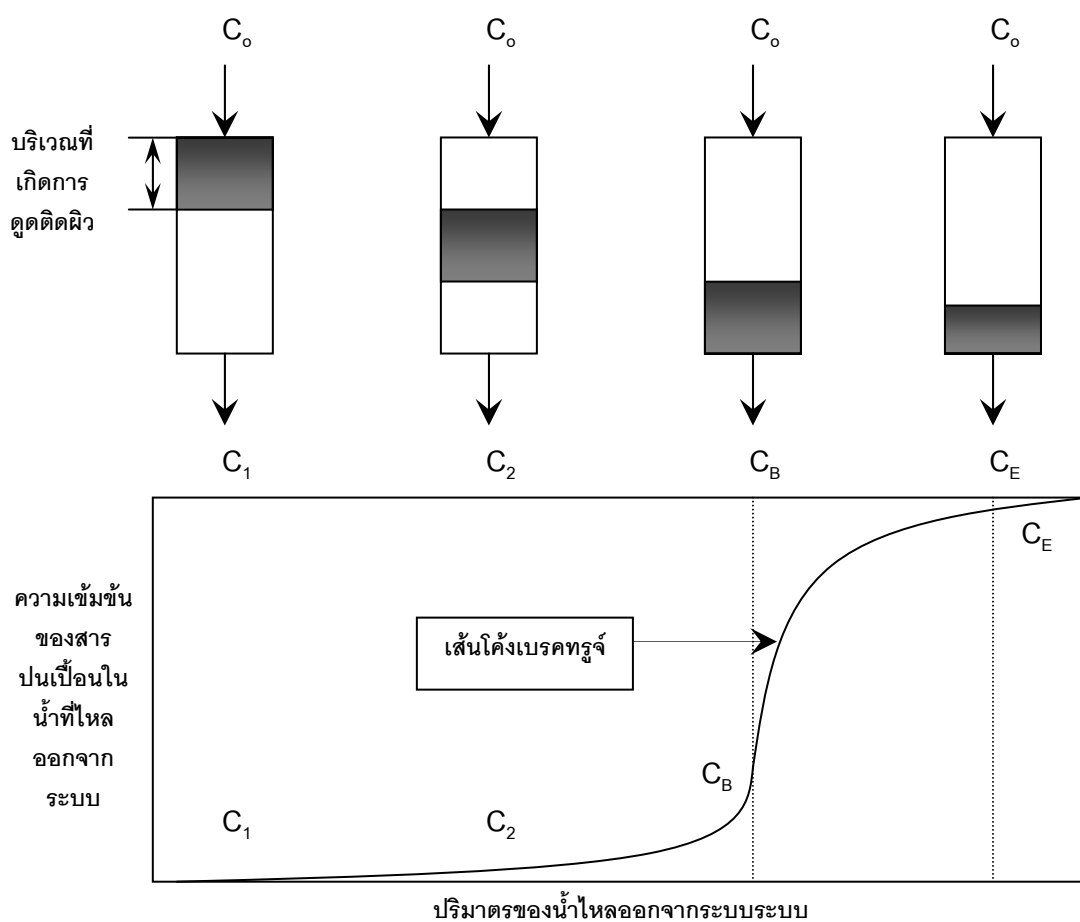
- 2) ความเข้มข้นของตัวดูดติดผิวที่ไหลผ่านถึงดูดติดผิว เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถึงดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดยุติจะลดลง
- 3) พีเอชของสารละลายที่ไหลผ่าน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถึงดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดยุติจะลดลง เมื่อตัวถูกดูดติดผิวเป็นสารที่มีการแตกตัวในน้ำได้น้อย
- 4) อัตราการไหลของสารในถึงดูดติดผิว (Hydraulic Load, Volume/Area/Time) เมื่ออัตราการไหลมากขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถึงดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุดยุติจะลดลง

ปัจจัยดังกล่าวเป็นเงื่อนไขในกรณีจุดยุติ เป็นรูปตัวเอส (S) แต่ในสารละลายที่มีไอออนหรือตัวถูกดูดติดผิวมากกว่าหนึ่งตัว หรือกรณีของการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง จะมีปัจจัยอื่นร่วมกำหนดลักษณะของจุดยุติ เช่น การแข่งขันการดูดติดผิว การแทนที่ตัวถูกดูดติดผิวได้ไม่ดีด้วยตัวถูกดูดติดผิวได้ดี ซึ่งทำให้ลักษณะของจุดยุติไม่เป็นรูปตัวเอส

รูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ในน้ำทิ้งที่ผ่านชั้นกัมมันต์แล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เทียบกับปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นกัมมันต์ (Breakthrough Curve) ณ จุดที่การดูดติดผิวของกัมมันต์ที่เริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ เรียกว่าจุดเริ่มหมดสภาพ และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นตรงที่มีความชันเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการดูดติดผิวน้อยลง จนกัมมันต์หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อีก เส้นโค้งเบรคทรูจ์แสดงในรูปที่ 2.11 ที่จุด  $C_c$  เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Breakthrough Point) ระยะเวลานับจากเริ่มต้นการดูดติดผิวจนถึงจุดเริ่มหมดสภาพ จะมีค่าลดลงเมื่อ

- ความสูงของชั้นกัมมันต์ลดลง
- เม็ดกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้น
- อัตราการไหลของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น
- ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดติดเพิ่มขึ้น





รูปที่ 2.11 ระบบดูดติดผิวแบบไหลต่อเนื่อง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

## 2.7 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

### 2.7.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาโดยการกระตุ้น (Activated) ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (Internal Surface Area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสำหรับดูดซับจำนวนมาก ซึ่งจะเกี่ยวพันโดยตรงกับขนาดและปริมาตรของรูพรุนที่มีอยู่

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หมายถึง ถ่านที่มีลักษณะรูปร่างอสัณฐานที่มีความเหนือชั้นกว่าถ่านทั่วไป ด้วยมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนภายในมากเป็นพิเศษ และมีคุณสมบัติในการดูดติดผิวซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้หลากหลายใส่วนของเหลวและก๊าซ

ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้งานได้กว้างขวางเป็นพิเศษ เพราะมีขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในขนาดต่างๆ ที่สามารถทำการควบคุมตามความต้องการของตลาดได้

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หมายถึง ถ่านคาร์บอนที่มีลักษณะรูปร่างอสัณฐานซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสูง (High Adsorptive) สามารถดูดซับก๊าซหลายชนิด กอลลิน และอนุภาคต่างๆ (Colloidal Solids) ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากไม้ เปลือกถั่ว กระจุกสัตว์ หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างด้วยการให้ความร้อนหรือกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส ด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะได้โครงสร้างที่มีรูพรุนภายในมากมาย (Honeycomb-Like) พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์โดยเฉลี่ยประมาณ 10,000 ตารางฟุตต่อกรัม มีความหนาแน่น 0.08 ถึง 0.5 (Lewis , 1997)

นอกจากนี้ Derbyshire, Jagtoyen และ Thwaites (1995) กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือวัสดุที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวได้ในปริมาณสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์นั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน โดยอาจใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์ หรือในกระบวนการนำสารเคมีนำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพงของถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ใช้กันมาก

ตาม มอก. 900-2532 กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีที่ถ่านกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำนีมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

## 2.7.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

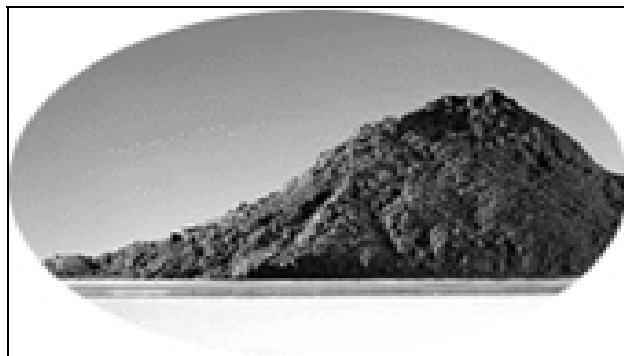
ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered Activated Carbon) โดยทั่วไปผลิตจากขี้เถ้าที่ได้จากไม้ ซึ่งมีขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคในช่วง 15 ถึง 25 ไมโครเมตร โดยอาจมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของลักษณะทางเลขนิตประมาณ 0.15 ถึง 0.266 โดยในการออกแบบระบบการดูดซับจะคำนึงถึง

- การเลือกลักษณะของหอดูดซับ
- ลักษณะการผสมเม็ดถ่านผงกับของเหลว
- ลักษณะการแยกของถ่านกัมมันต์ผงหลังจากที่ดูดซับแล้ว

### - วิธีการนำกลับมาใช้ใหม่

ในทางอุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ผงโดยส่วนใหญ่ จะนำไปใช้ในการกำจัดสีในกระบวนการผลิตอาหาร เช่น ใช้ในการผลิตน้ำตาล ผลิตน้ำมัน ผลิตไซเดียมกลูตาเมท และผลิตไวน์

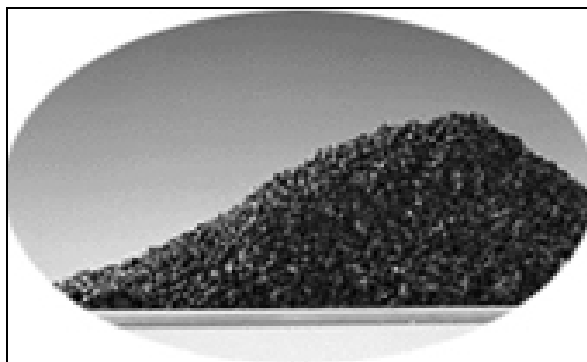


รูปที่ 2.12 ลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon)

(Available from: <http://www.chemvironcarbon.com/carbon/definition/whatis.htm>)

ในภาวะปัจจุบันมีการนำถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาใช้กันอย่างมาก ทั้งในการผลิตน้ำดื่มและการบำบัดน้ำเสีย การใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในระบบของเหลวที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ จะพิจารณาถึงประจุที่ผิวของถ่านกัมมันต์ผงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากประจุที่ผิวจะมีผลต่อขั้นตอนการตกตะกอน ขั้นตอนการกรอง ในการแยกถ่านกัมมันต์ผงออกจากของเหลว หลังจากที่ได้ทำการดูดซับแล้ว โดยขั้นตอนที่นำถ่านกัมมันต์ผงกลับมาใช้ใหม่นั้นค่อนข้างทำได้ยาก จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ทั้งถ่านกัมมันต์ผงมากกว่าที่จะผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) โดยทั่วไปมีหลายขนาด ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ในการดูดซับในระบบที่เป็นก๊าซมักใช้ถ่านกัมมันต์รูปทรงกระบอกขนาด 4 ถึง 6 มิลลิเมตร โดยการนำตัวทำละลายมาใช้ใหม่ (Solvent Recovery) การทำอากาศให้บริสุทธิ์ การทำก๊าซให้บริสุทธิ์ การกำจัดกำมะถันออกจากก๊าซ และใช้ในระบบการแยกอื่นๆ



รูปที่ 2.13 ลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon)

(Available from: <http://www.chemvironcarbon.com/carbon/definition/whatis.htm>)

ในระบบที่เป็นของเหลวมีการใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดมากเช่นกัน เนื่องจาก

- จัดการระบบได้ง่าย
- ในเครื่องปฏิกรณ์มีความดันลดต่ำ
- ทำการล้างเม็ดถ่านได้ง่าย

ซึ่งในภาวะของเหลวนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดในการกำจัดสี การผลิตน้ำตาล การกำจัดสารอินทรีย์ กำจัดกลิ่นและสิ่งเจือปนในระบบการผลิตน้ำดื่ม และใช้กันมากที่สุดในระบบบำบัดน้ำเสีย ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีการใช้งานมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง เนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการทางความร้อนหรือกระบวนการนำกลับมาใหม่แบบอื่นๆ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง

มีการผลิตถ่านกัมมันต์ทุกแบบทั่วโลกประมาณปีละ สามแสนถึงสี่แสนตัน มีถ่านกัมมันต์ชนิดผงประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เหลือจะเป็นถ่านกัมมันต์ในรูปแบบอื่น ซึ่ง 80 เปอร์เซ็นต์ ของถ่านกัมมันต์ทั้งหมดใช้กับระบบที่เป็นของเหลว และอีก 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้กับระบบที่เป็นก๊าซ ซึ่งประเทศที่มีการใช้มากที่สุดคือ ญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา โดยมีอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ (Byrne และ Marsh, 1995)

ปัจจุบันพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์มากที่สุดในระบบการทำอากาศให้บริสุทธิ์ การทำตัวทำละลายให้บริสุทธิ์ และกระบวนการบำบัดน้ำ และมีการใช้ในระบบใหม่ๆ ซึ่งเกี่ยวกับการป้องกันมลภาวะจากสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ (Derbyshire, Jagtoyen และ Thwaites, 1995)

ระบบที่เป็นของเหลว	ประเภท
Decolorization	Industrial Water Treatment
Potable Water Treatment	Metals Recovery (Gold)
Groundwater Treatment	Chemicals and Pharmaceutical Purification
ระบบที่เป็นก๊าซ	ประเภท
Solvent Recovery	Military : Respiratory and Suiting
Dechlorination	Gas Purification
General Air Conditioning	Cigarette Filters
Air Purification	Cataysis

ถ่านกัมมันต์เมื่อไม่นานมานี้ ได้ถูกนำมาใช้แทนสำหรับการกรอง (Granular Filter Medium) หรือ การนำมาใส่ในกระบวนการบำบัดโดยทั่วไปในการกำจัดสารประกอบที่มีองค์ประกอบอินทรีย์ รวมทั้งจากการฆ่าเชื้อโรคจากผลิตภัณฑ์ จะถูกกำจัดทางด้านรสชาติ กลิ่น ยาฆ่าแมลง และสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์

ชั้นกรองถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่คล้ายการกรองทั่วไปคือ การกำจัดพวกอนุภาคแขวนลอยต่างๆ แต่ก็ยังสามารถที่จะกำจัดพวกสารประกอบอินทรีย์ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามทางฝั่งของทวีปยุโรป ได้มีการนำชั้นของถ่านกัมมันต์มาใช้ในการกำจัดรสชาติและกลิ่นรวมทั้งสารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบจำพวกคาร์บอนเพียงเล็กน้อย โดยการติดตั้งถ่านกัมมันต์ ติดตรงด้านล่างของตัวกรองที่สำคัญของกระบวนการ

เมื่อหลายปีที่ผ่านมานั้น ถ่านกัมมันต์ได้รับอนุญาตจาก The United States as The Result of The 1996 Amendment to The Safe Drinking Water Act ทางด้านข้อกำหนด ได้ตั้งค่าระดับของสิ่งเจือปนมากที่สุด (MCL) สำหรับไม่เกิน 50 สารประกอบอินทรีย์ ซึ่งมี 26 ชนิดจากการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ ทางด้านของโรงงานอุตสาหกรรมในการบำบัดน้ำเสียในสหรัฐอเมริกา ได้มีการเริ่มขั้นตอนเพื่อพิสูจน์ให้ถูกหลักคุณภาพของน้ำดื่ม โดยการลงสีรสชาติ และกลิ่น

### 2.7.3 วัตถุดิบสำหรับใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้นจะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยวัตถุดิบนั้นอาจเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือได้จากการสังเคราะห์ขึ้น วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านหินลิกไนท์ ไม้ กะลามะพร้าว เนื่องจากสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง ซึ่งวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง
- มีราคาถูกและหาง่าย
- มีคุณสมบัติคงที่

ในปัจจุบันของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตร สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์จำนวนมาก เนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาถูก เช่น ชานอ้อย แกลบ กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง ฯลฯ อย่างไรก็ตามปัญหาในการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ วัตถุดิบมีคุณสมบัติไม่คงที่แม้ว่าเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ทำให้ยากในการควบคุมการกระจายขนาดของรูพรุนในขั้นตอนการผลิต

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนอน (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าสารดูดติดผิวอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) จึงทำให้ดูดติดผิวสารได้มากกว่า (เพียรพรรค ทศคร, 2535)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเพื่อให้พื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุน หรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะมากได้ การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิวได้ ดังนั้นพื้นที่ผิวสูงจึงมีความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption Capacity) สูงตามไปด้วย การวัดพื้นที่ผิวของคาร์บอนกระทำได้โดยการหาไนโตรเจนที่ถูกคาร์บอนดูดเก็บไว้ วิธีวัดสมรรถนะของคาร์บอนอาจกระทำได้โดยการวัดไอโอดีน นัมเบอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของคาร์บอน และในงานวิจัยเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์ ผู้วิจัยมักวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพื่อหาความสามารถในการดูดติดโมเลกุล ดังเช่นในตารางที่ 2.3

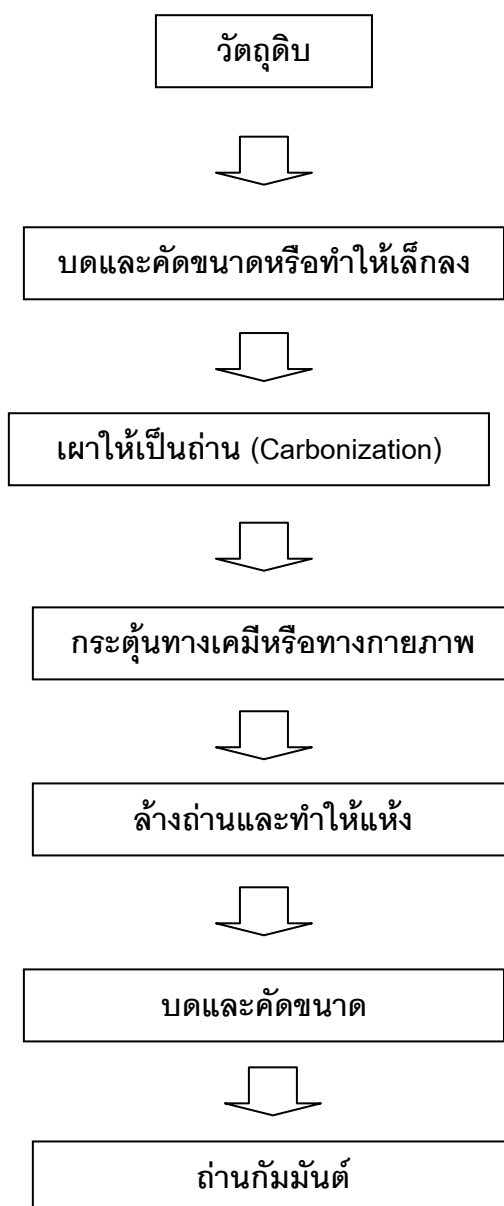
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยผู้วิจัยต่างๆ

ปี	ผู้วิจัย	วัตถุดิบ	การกระตุ้น			คุณสมบัติ	
			สารกระตุ้น	อุณหภูมิ ( <sup>o</sup> ซ)	เวลา (ชม.)	ไอโอดีนนัมเบอร์ (มก./ก.)	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)
2532	มอก.900-2532	ถ่านกัมมันต์	-	-	-	600	-
2537	บุญชัย ตระกูลมหชัย	กะลาตาล	60%ZnCl <sub>2</sub> (3:2)	500	1	1100-1200	1600-1700
2538	พงศธร โค้วคชาภรณ์	ซังข้าวโพด	ZnCl <sub>2</sub> (1:4)	600	3	960-1075	1140-1300
2543	ชนิดา เสมรัตน์	กะลามะพร้าว	NaCl	550	0.5	-	228.74
		ชานอ้อย	NaCl	550	0.5	-	3.51
2544	สุนีย์ คุยเสงี่ยม	กะลามะพร้าว	NaCl (1:3)	800	1	532.29	492.42
		กะลาปาล์ม	NaCl (1:3)	800	1	486.45	385.91
2544	ลลิตา นิตศนจากรกุล	เปลือกทุเรียน	NaCl (sat.sol_n)	800	1	567	387
		เปลือกเมล็ด มะม่วงหิม พานต์	NaCl (sat.sol_n)	800	1	532	489
2545	มานพ ตีระรัตนสมโภช	ซีเลื่อย	NaCl (1:1)	800	1	519.4	593.79
			ZnCl <sub>2</sub> (1:2)	700	1	1021.3	1572.51
2545	ปนัดดา คำรัตน์	กากขี้แป้ง	NaCl (sat.sol_n)	500	2	510.24	566.39

(ที่มา : เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ, 2547)

#### 2.7.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปการผลิตถ่านกัมมันต์จะประกอบไปด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ การเผาให้เป็นถ่านหรือคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) และการกระตุ้นหรือแอคติเวชัน (Activation) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

#### 2.7.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การผลิตถ่านกัมมันต์ ผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไป คาร์บอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอน หลังจากนั้นทำการตากหรืออบวัตถุดิบให้แห้ง หากวัตถุดิบที่มีความแข็งและเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไป คาร์บอนก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาด และหากวัตถุดิบมีลักษณะเป็นผงอาจนำมาทำให้เป็น



เม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน แล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่คาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป ในการผลิตเพื่อการค้าสมบัติบางประการของวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ ควรพิจารณาดังนี้

- 1) มีคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) สูง
- 2) มีปริมาณความชื้น (Moisture) ต่ำ
- 3) มีสารที่ระเหยได้ (Volatile Matter) ต่ำ
- 4) มีปริมาณเถ้า (Ash) ต่ำ
- 5) ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- 6) สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

#### 2.7.4.2 การคาร์บอนไนเซชัน

การคาร์บอนไนเซชันเป็นการไพโรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและก๊าซออกมาด้วย โดยวงแหวนโครงสร้างอะโรมาติกหลักที่เหลือนกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างของโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และก๊าซต่างๆ

ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน จัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากในการคาร์บอนไนซ์จะเริ่มสร้างโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอนไนซ์ธาตุและองค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน รวมทั้งสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปก๊าซและน้ำมันทาร์ จากนั้นก็จะได้ถ่านชาร์ที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ มีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยจะมีสารอินทรีย์ไปอุดช่องว่างเหล่านั้น ในส่วนประกอบของถ่านชาร์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน และคาร์บอนต่อออกซิเจนเพิ่มมากขึ้นจากวัตถุดิบในตอนแรกด้วย ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบ่งได้ชัดเจนเป็น 3 ขั้นตอน คือ (วิเชียร ตรงจิตรธรรม, 2532)

- 1) จะมีการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 197 องศาเซลเซียส
- 2) เข้าสู่ขั้นตอนการไพโรไลซิส โดยเกิดก๊าซและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197 ถึง 497 องศาเซลเซียส

- 3) เป็นช่วงที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัสดุดิบจะลดลงไปมากที่ช่วงอุณหภูมิ 497 ถึง 847 องศาเซลเซียส

การคาร์บอนไนท์ให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรคือ (บุญชัย ตระกูลมหชัย, 2537)

- **อุณหภูมิ** จะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และก๊าซที่ได้จะเพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัสดุดิบนั้น
- **อัตราการให้ความร้อน** จะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์ และสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยา สูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนท์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อทำการกระตุ้นทำให้สารกระตุ้นเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย
- **ตัวกลางและปฏิกิริยา (Medium of Reaction)** จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาถ้าก๊าซและไอ ที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยก๊าซที่เป็นตัวกลาง เช่น ก๊าซไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และก๊าซจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นก๊าซจากไนโตรเจน แต่จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า
- **ธรรมชาติของวัสดุดิบ** จะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอนไนท์ โดยถ่านกัมมันต์จากวัสดุดิบที่ต่างกันอาจใช้วิธีกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อที่จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งจะเหมาะสมกับการนำไปใช้ในระบอบที่เหมาะสมต่อไป

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ก็เพื่อผลิตให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัสดุดิบ

### 2.7.4.3 การกระตุ้น

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น โดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่นๆ ของถ่านกัมมันต์ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี และประสิทธิภาพการกระตุ้นขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย

โดยทั่วไปแล้วการกระตุ้นมี 2 วิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์ (Jankowska, Swiatkowski และ Choma, 1991) คือ

- 1) นำวัตถุดิบหรือวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้วมากระตุ้น โดยใช้สารกระตุ้น เช่น ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ), แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ ) หรือ กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) วิธีนี้โดยทั่วไปเรียกว่า “การกระตุ้นทางเคมี”
- 2) นำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้ว มาทำปฏิกิริยากับก๊าซที่ใช้ในการออกซิไดซ์ ซึ่งอาจเป็นไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน วิธีนี้โดยทั่วไปเรียกว่า “การกระตุ้นทางกายภาพ”

- **การกระตุ้นทางเคมี** (Chemical Activation: Baker, Miller และ Repik, 1997)

เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันมาก ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยปกติแล้ววิธีการกระตุ้นแบบนี้มักใช้กับวัตถุดิบที่เป็นไม้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส สารกระตุ้นที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม คือ ซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริก การกระตุ้นทางเคมีจะช่วยลดการเกิดทาร์และสารอื่นๆ ที่เกิดในกระบวนการ ดังนั้นร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงค่อนข้างมีปริมาณสูง

การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ ซึ่งทำการผลิตถ่านกัมมันต์โดยจะเริ่มต้นด้วยการนำไม้ที่เลื่อยผสมกับกรดเข้มข้นและป้อนสู่เตาเผาแบบหมุน เป็นกระบวนการทำให้แห้ง จากนั้นจะเป็นการคาร์บอนไนซ์และทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งก๊าซที่ออกมาจากกระบวนการกระตุ้นจะผ่านการบำบัดก่อนปล่อยออก เพื่อไม่ให้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดกรดออกจากเนื้อถ่าน และทำการแยกถ่านที่ได้ออกมา และนำน้ำนั้นไปผ่านกระบวนการนำกรดกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในส่วนนี้บางโรงงานที่ทำการผลิตก็มิได้นำกรดมาใช้ใหม่ ส่วนการล้างถ่านที่ได้นั้นควรจะล้างจนกว่าน้ำล้างจะเป็นกลาง ( $pH = 7$ ) และนำ

ถ่านที่ได้ไปอบแห้ง จากนั้นนำถ่านไปแยกขนาดสำหรับการใช้งานแต่ละชนิดต่อไป ถ่านที่ได้จะมีร้อยละผลิตภัณท์สูงด้วยเมื่อเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น

ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยใช้วิธีกระตุ้นทางเคมี โดยทั่วไปจะใช้ซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริก โดยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ เป็นวิธีที่นิยมที่สุดวิธีหนึ่ง โดยใช้สารละลายซิงค์โครไรด์ผสมกับวัตถุดิบโดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิที่ต่ำในช่วงนี้มีผลอย่างมากต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ หลังจากนั้นจะนำไปคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 ถึง 850 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม จะคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์โครไรด์กลับมาใช้ใหม่เป็นอย่างมาก ด้วยประสิทธิภาพการนำซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ค่อนข้างจำกัด

การใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น จะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นค่อนข้างต่ำคือ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้กรดฟอสฟอริกนั้นสามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยยังได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง พบว่าวัตถุดิบที่เป็นไม้สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพดีโดยวิธีนี้

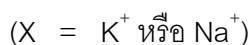
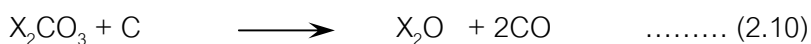
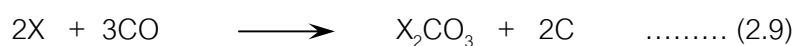
มีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น ซึ่งวัตถุดิบที่ได้ทำการศึกษาคือ เมล็ดถั่ว เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และไม้ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามกระบวนการกระตุ้นทางเคมีก็มีหลายกระบวนการที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ซึ่งพบว่าสารกระตุ้นชนิดอื่นๆ ก็สามารถทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงได้ เช่น โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ เพอริกคลอไรด์ ซึ่งเราพบว่าในปัจจุบันที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ

- 1) อัตราส่วนลิกนินต่อเซลลูโลสในวัตถุดิบ
- 2) อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ
- 3) อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น
- 4) อัตราการให้ความร้อน

จากการใช้ไม้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้นทางเคมี จะได้คุณสมบัติของถ่านที่มีปริมาตรรูพรุนสูง และความหนาแน่นปรากฏต่ำประมาณ ( 0.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) คุณสมบัติที่ดีของไม้และสารชีวะมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบคือ มีปริมาณเถ้าต่ำ ( 0.3 ถึง 1.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าในถ่านหินและลิกไนต์จะมีปริมาณสูงกว่า (2 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในไม้และชีวะมวล

จะมีปริมาณกำมะถันต่ำด้วย นอกจากนี้ยังมีการกระตุ้นด้วยสารประกอบของโพแทสเซียม (K) และ โซเดียม (Na)

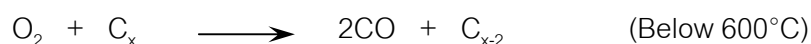
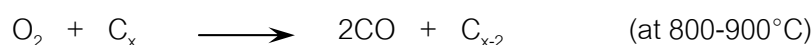
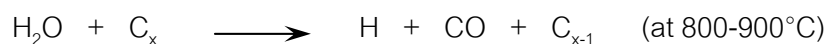
เมื่อนำวัสดุดิบหรือถ่านแชนท์ หรือผสมสารละลายที่มีโพแทสเซียม อีออน (K<sup>+</sup>) หรือโซเดียมอีออน (Na<sup>+</sup>) ซึ่งอีออนเหล่านี้ จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึก แกรไฟต์ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จะหลุดออกมาทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ถ่านกัมมันต์เป็นดังสมการ



#### - การกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical Activation)

เป็นวิธีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิว โดยปฏิบัติการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) ด้วยก๊าซออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ก๊าซที่ใช้ โดยทั่วไปคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือรวมก๊าซ ดังกล่าวก็ได้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ยังเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดี ต้องทำการกระตุ้นให้ได้ถ่านที่มีการดูดซับสูง โดยใช้การกระตุ้นให้ทำปฏิกริยากับก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ดังตัวอย่าง



ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุน ในการกระตุ้น คือ (Jankowska, Swiatkowski และ Choma, 1991)

- 1) โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น

- 2) สารอินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน
- 3) ชนิดของก๊าซออกซีไดซ์
- 4) อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- 5) ความดันของก๊าซ
- 6) เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
- 7) ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

ในกระบวนการกระตุ้น คาร์บอนทำปฏิกิริยากับสารออกซีไดซ์ เป็นคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดก๊าซซีพีเคขึ้นบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก เกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนและถูกขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน การกระตุ้นจึงเป็นทั้งการเปิดรูที่ถูกปิดและการสร้างรูใหม่ขึ้นด้วย

## 2.7.5 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

### 1) โครงสร้างรูพรุน (Pores)

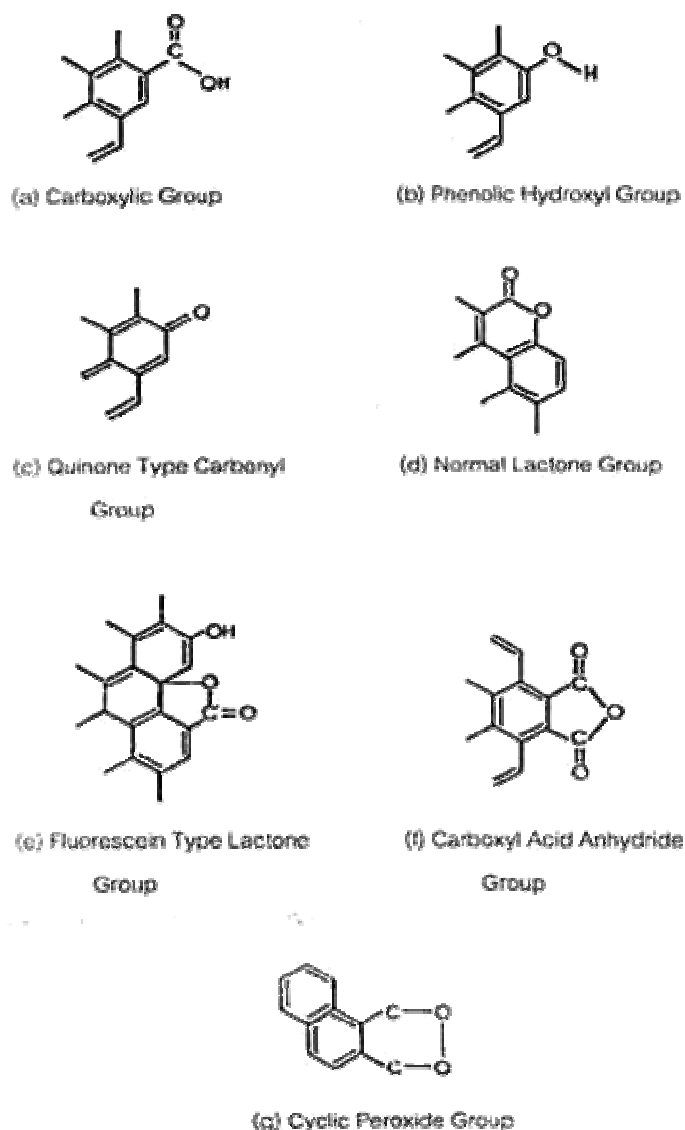
ผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary Tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ ดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาดคือ ขนาดเล็ก (Micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดรูพรุน (Pore Size Distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เพียงทางผ่านของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดติดผิว สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดติดผิวโมเลกุลของเหลวได้บ้าง และมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดติดผิวที่มีความดันสัมพัทธ์สูงๆ โดยทั่วไป ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 ถึง 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับจึงมีผลต่อความจุในการดูดติดผิว โดยเฉพาะการดูดติดผิวที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 ของพื้นที่ทั้งหมด นอกจากนี้ถ้าผิวของถ่านบริเวณนั้นเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (Basal Planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดติด

ผิวจะเกิดจากแรงวาลเดอวาล หรืออาจเกิดจากไพเอเล็กตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดติดผิวได้แต่มีโอกาสที่หลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันนัล การดูดติดผิว จะเกิดจากแรงที่แข็งแรงโอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันนัลบนผิวถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด และพวกออกไซด์ของด่าง

## 2) โครงสร้างทางเคมี

ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การคาร์บอนไนซ์เซชันในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกไปในรูปของก๊าซ อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic Ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างทาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญจากช่องว่าง หรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีด้วย ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกกราฟไฟท์ กล่าวคือ อะตอมของคาร์บอนจะวางตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือแรงวาลเดอวาล ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนัก แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมแต่ละตัวจะใช้ซิกมาอิเล็กตรอนสร้างพันธะเดียวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวเป็นไพเอเล็กตรอน ที่ใช้ในการสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัว คือ พันธะคู่ (Double Bond) แต่โดยทั่วไปถ่านหรือถ่านกัมมันต์จะมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่อะตอม คาร์บอนบางตัวจึงต้องรับอิเล็กตรอนดังกล่าวไว้ ทำให้มีความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวจะปล่อยอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้างเคียง (Resonance) เพื่อลดความหนาแน่นของประจุเพื่อให้โครงสร้างเสถียรขึ้น

กลุ่มฟังก์ชันนัลที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่พบบ่อยๆ ได้แก่ Carbonyl Groups, Phenolic Hydroxyl Groups, Quinone Type Carbonyl Groups, Normal Lactones Groups, Fluorescein Type Groups, Carboxylic Acid Anhydrides Groups และ Cyclic Peroxide Groups ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กลุ่มฟังก์ชันนัลบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Cookson, 1978)

## 2.7.6 การประเมินและการเลือกใช้ถ่าน

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องมีการเลือกถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่าน ลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบ ลักษณะสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่



- 1) พื้นที่ผิว (Surface Area) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดติดผิว โดยถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดติดผิวมาก
- 2) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปรับคืนสภาพของถ่าน
- 3) ความหนาแน่นก้อน (Bulk Density) เป็นตัวกำหนดปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน
- 4) ขนาดใช้งาน (Effective Size) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mean Particle Diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity Coefficient) เป็นตัวกำหนดภาวะทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conditions) ของถังดูดติดผิว (Adsorption Colum)
- 5) ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) เป็นตัวกำหนดการดูดติดผิวโมเลกุลของน้ำเสีย
- 6) การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) เป็นตัวตรวจสอบ Plant-Handling Effect ของถ่าน
- 7) แอบริชัน นัมเบอร์ (Abrasion Number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี
- 8) ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash) แสดงถึงกากของถ่าน
- 9) ความชื้น (Moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต
- 10) ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดติดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- 11) โมลาสนัมเบอร์ (Molass Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดติดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง
- 12) ขนาดของรูพรุน (Pore Size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดติดผิวโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

### 2.7.7 การปรับคืนสภาพของถ่านกัมมันต์

เมื่อถ่านกัมมันต์ผ่านการใช้งานเป็นเวลานานๆ บริเวณพื้นที่ผิวและรูพรุนของเม็ดถ่านจะดูดซับสารและสิ่งสกปรกต่างๆ จนกระทั่งถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อจะลดค่าใช้จ่ายจึงนำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพมาฟื้นฟูคุณภาพเพื่อนำกลับไปใช้งานอีก การฟื้นฟูคุณภาพทำได้โดยนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดอยู่ในรูของถ่านกัมมันต์อาจทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีทางกายภาพ และวิธีทางเคมี คือ

- 1) การใช้ความร้อนในการฟื้นฟูสภาพ (Thermal Regeneration) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ทำได้โดยนำถ่านกัมมันต์ทั้งหมดสภาพและแยกน้ำออกแล้วส่งเข้าเตาเผาแบบ Multiple Heat หรือ Rotary Kiln ทำการเผาที่อุณหภูมิ 870 ถึง 980 องศาเซลเซียส ในช่วงการเผาใหม่นี้โมเลกุลของสิ่งสกปรก ที่เป็นสารอินทรีย์ในรูปพูนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จะระเหยเป็นไอและถูกเผาไหม้สลายตัวไป ในขั้นตอนนี้จะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจน ให้พอเหมาะที่จะทำลายโมเลกุลของสารอินทรีย์แต่ไม่ทำลายเนื้อถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่กำลังร้อนอยู่นั้นไปทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว โดยการจุ่มลงในน้ำ (Quenching) นำไปล้างแยกเศษผงถ่านกัมมันต์ออกแล้วจึงนำไปใช้งาน
- 2) การใช้ไอน้ำในการฟื้นฟูสภาพ (Steam Regeneration) วิธีนี้มักนิยมใช้กับตัวดูดดูดติดผิวที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย
- 3) การใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ (Chemical Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวดูดดูดติดผิวที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ดังวิธีการดังนี้
  - a) ใช้สารละลายกรดในการฟื้นฟู (Acid Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวดูดดูดติดผิว หรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวเป็นต่าง
  - b) ใช้สารละลายด่างในการฟื้นฟู (Alkaline Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวดูดดูดติดผิวหรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวเป็นกรด
  - c) ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการฟื้นฟู (Organic Solvent Regeneration) วิธีนี้มักนิยมใช้กับตัวดูดดูดติดผิวที่เป็นสารอินทรีย์

## 2.8 สีและการเห็นสี

### 2.8.1 แสงและวัตถุสี

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ต้นกำเนิดแสงอาจมาจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นก็ได้ และช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถรับภาพได้อยู่ในช่วงประมาณ 400 ถึง 700 นาโนเมตร

วัตถุใดๆ สามารถสะท้อนแสงที่ตกกระทบออกมาได้ทุกความยาวคลื่นในแถบแสงสีขาวโดยไม่ถูกดูดกลืนแถบแสงในช่วงความยาวคลื่นใดไว้เลย วัตถุนั้นก็จะเห็นเป็นสีขาว ในทางตรงข้ามถ้าวัตถุไม่สะท้อนแถบแสงที่มีความยาวคลื่นใดออกมาเลย หรือดูดกลืนไว้ทั้งหมด วัตถุนั้นก็จะเห็นเป็นสีดำ ส่วนในกรณีที่วัตถุมีสีให้เห็นต่างกันไปในนั้นเพราะวัตถุเลือกดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วงหนึ่งๆ ได้ต่างกัน และสะท้อนแสงบางช่วงความยาวคลื่นออกมา เช่น วัตถุที่เห็นเป็นสีแดงเพราะวัตถุนั้นสะท้อนแสงช่วงความยาวคลื่นยาวๆ ออกมา และดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นที่เหลือไว้ ดังนั้นเมื่อวัตถุออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ ก็ได้ค่าสูงที่ความยาวคลื่นยาวๆ และให้ค่าแอบซอร์เบแนนท์ที่ความยาวคลื่นสั้นๆ ขึ้นกับสัดส่วนโทนสี วัตถุที่เห็นเป็นสีน้ำเงินจะสะท้อนแสงออกมาที่ความยาวคลื่นสั้นๆ เมื่อวัดในรูปแอบซอร์เบแนนท์จะให้ค่าสูงในช่วงความยาวคลื่นยาวๆ และให้เปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์สูงในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ เป็นต้น

### 2.8.2 ทฤษฎีแม่สี

สีใดๆ ที่ตาเรามองเห็นในโลกนี้สามารถสร้างเลียนแบบให้เหมือนได้ ด้วยการผสมแม่สีทั้งสามเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม การผสมสีนี้แบ่งคร่าวๆ ได้ 2 วิธี คือ

#### 1) การผสมแสงสีเชิงบวกของแสงสี (Additive Mixture of Lights)

เป็นหลักการผสมแสงสีเพื่อสร้างสี ซึ่งพบหลักการนี้โดยทั่วไปในโทรทัศน์สี กล่าวคือ ตาของมนุษย์จะไวเป็นพิเศษต่อแถบแสงสี 3 สี คือ แสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน ซึ่งเรียกว่า แม่สีเชิงบวก (Additive Primary Color)

#### 2) การผสมเชิงลบของสารสี (Subtractive Mixture of Pigments)

เป็นหลักการผสมสารสี (Pigments) หรือ แม่สีเชิงลบ (Subtractive Primary Color) อันประกอบไปด้วย 3 สี คือ สีแดง สีน้ำเงิน และสีเหลือง ซึ่งจะพบในกิจกรรมของศิลปิน การพ่นสีอุตสาหกรรมย้อมหรือพิมพ์ผ้า เป็นต้น โดยสารสีอาจอยู่ในสีย้อม (Dye) สารสี (Pigment) และอื่นๆ

### 2.8.3 การบรรยายสี

การบ่งบอกความรู้สึกเกี่ยวกับการเห็นสีเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อน เพราะสีเป็นรูปธรรมที่คลุมเคลือ เป็นทรงระนาบการเห็น (Visual Consciousness) การที่จะบรรยายว่ากำลังกล่าวถึงสีอะไรอย่างเด่นชัด จำเป็นต้องมีหน่วยวัดอย่างชัดเจน สามารถแบ่งออกมาเป็นกฎเกณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ด้วยเหตุนี้เราสามารถบรรยายลักษณะของสีได้ด้วย

- 1) โทนสี (Hue)
- 2) ความอิ่มสี (Color Saturation)
- 3) ความจ้าของสี (Brightness)
- 4) ความหนาแน่นทางสายตา (Visual Density)
- 5) ความยาวคลื่นเด่น

### 2.8.4 การวัดค่าสี

การวัดค่าสีแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ตามลักษณะการวัดคือ

#### 1) เทียบสีมาตรฐานที่ยอมให้เป็นสีอ้างอิง เช่น สีมาตรฐาน APHA

วิธีนี้กำหนดขึ้นโดย APHA (American Public Health Association) เป็นการวัดสีในน้ำ โดยเปรียบเทียบด้วยตารางระหว่างตัวอย่างน้ำกับสารละลายสีมาตรฐาน ซึ่งเตรียมได้โดยใช้  $K_2PtCl_6$  และ  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลาย สีมาตรฐานนี้มีสีค่อนข้างเหลืองคล้ายกับแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป แต่เมื่อพิจารณาสีของน้ำเสียจากสีย่อมธรรมชาติแล้ว การเทียบสีกับสารละลายมาตรฐานดังกล่าวแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย

#### 2) วัดค่าเปอร์เซ็นต์ของแสงที่ส่องผ่าน (% Transmittance)

เป็นการวัดค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร ด้วยหลักที่ว่าถ้าวัตถุใดสะท้อนแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นนั้นๆ ก็จะมองเห็นวัตถุนั้นเป็นโทนสีของแสงที่สะท้อนออกมา

#### 3) วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

ใช้หลักการเกี่ยวกับการวัดค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน แต่ให้วัดออกมาเป็นค่าการดูดกลืนแสง

#### 4) วัดโดยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี

จากหลักการผสมสีของแม่สี 3 สี ซึ่งมี 2 วิธี คือ ผสมแม่แสงสีแดง แสงสีน้ำเงิน แสงสีเขียว และผสมสารสีแดง สีเหลือง สีน้ำเงิน โดยใช้เครื่องทินโทมิเตอร์วัดสี โดยใช้การผสมแม่สี 2 ใน 3 สี ร่วมกับการปรับแสงสว่างในการมอง เพื่อเลียนแสงสีให้เหมือนกับตัวอย่างที่ต้องการวัด

#### 2.9 ไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัสเป็นไม้ต่างประเทศมีมากกว่า 700 ชนิด มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปออสเตรเลีย ประเทศไทยได้เริ่มนำยูคาลิปตัสชนิดต่างๆ มาทดลองปลูกประมาณปี พ.ศ. 2493 แต่ได้มีการทดลองกันจริงๆ เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2507 ปรากฏว่าไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส (*Eucalyptus camaldulensis*) สามารถเจริญเติบโตได้ในแทบทุกสภาพพื้นที่ และมีอัตราการเจริญเติบโตสูง จึงนิยมปลูกกันมากอย่างแพร่หลาย

ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส เป็นไม้ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่มีความสูง 24 ถึง 26 เมตร ความโตทางเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 2 เมตร รูปทรงสูง เปลาดตรง มีกิ่งก้านน้อย ใบเป็นคู่ตรงข้ามเรียงสลับกัน ลักษณะใบเป็นรูปหอก เบื้องมีลักษณะเรียบเป็นมัน มีสีเทาสดสีเขียวและน้ำตาลแดงเป็นบางแห่ง

ลักษณะเนื้อไม้มีแก่นสีน้ำตาล กระพี้สีน้ำตาลอ่อน กระพี้และแก่นสีแตกต่างกันได้ชัด ไม้ที่มีอายุมากขึ้นจะมีสีน้ำตาลแดงเข้มกว่าไม้อายุน้อย เนื้อไม้มีลักษณะค่อนข้างละเอียด เส้นสน (Interlocked Grain) บางครั้งบิดไปตามแนวลำต้น เนื้อไม้มีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.9 ในสภาพแห้งซึ่งขึ้นอยู่กับอายุของไม้ เนื้อไม้แตกง่ายหลังจากตัดฟันตามแนวยาวขนานลำต้น แต่ถ้าทำให้ถูกหลักวิธีก็สามารถนำมาเลื่อยทำเครื่องเรือนและก่อสร้างได้



รูปที่ 2.16 ลักษณะลำต้น ไม้ยูคาลิปตัสอายุประมาณ 4 ถึง 5 ปี

## 2.10 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; NaCl)

โซเดียมคลอไรด์เป็นชื่อเรียกทางเคมี แต่สำหรับบุคคลทั่วไปอาจคุ้นเคยกับคำเรียกว่า “เกลือ” มากกว่า เกลือเป็นสารประกอบของธาตุโซเดียม (Na) ขนาดรัศมีอะตอมเท่ากับ 1.25 อังสตรอม และธาตุคลอรีน (Cl) ขนาดรัศมีอะตอมเท่ากับ 1.00 อังสตรอม ในอัตราส่วนจำนวนโมลที่เท่ากันคือ 1 ต่อ 1 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 58.44 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 2.165 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 801 องศาเซลเซียส ลักษณะของเกลือเป็นผลึกสีขาว มีรสเค็ม ละลายน้ำได้ดี โดยมีความสามารถในการละลายที่ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 35.7 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร และความสามารถในการละลายที่ 100 องศาเซลเซียส เท่ากับ 39.8 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร เกลือถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย และใช้สำหรับในการปรุงอาหารในครัวเรือนทั่วไป

ปัจจุบัน เกลือ ที่ผลิตและวางขายกันอยู่ในท้องตลาด ร้านค้าสะดวกซื้อ และซูเปอร์มาร์เก็ตในห้างสรรพสินค้าทั่วไป สามารถผลิตให้มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ (เกลือปรุงทิพย์) ซึ่งนับว่ามีความบริสุทธิ์สูงมากพอที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ ในขณะที่ราคาซื้อขายไม่แพง

## 2.11 ซิงค์คลอไรด์ (Zinc Chloride; ZnCl<sub>2</sub>)

ซิงค์คลอไรด์ เป็นสารเคมีประเภทดูดน้ำ (Dehydrating Agent) ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยธาตุสังกะสี (Zn) ขนาดอะตอมเท่ากับ 1.34 อังสตรอม และธาตุคลอรีน (Cl) ในอัตราส่วนจำนวนโมลเท่ากับ 1 ต่อ 2 ตามลำดับ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 136.28 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 2.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 275 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดเท่ากับ 756 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ละลายน้ำได้ดี โดยมีความสามารถในการละลายที่ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 432 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร และความสามารถในการละลายที่ 100 องศาเซลเซียส เท่ากับ 614 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร สารละลายเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ จะมีความเป็นกรดสูง สามารถละลายแป้ง เซลลูโลส และสารอินทรีย์ต่างๆ ได้

ซิงค์คลอไรด์ เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงการค้าระดับอุตสาหกรรม เพราะถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จะมีค่าพื้นที่ผิวสูง ทำให้สมบัติในการดูดติดผิวสารดีด้วย ทั้งนี้เพราะสมบัติในการดูดติดผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวนั่นเอง

## 2.12 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.12.1 งานวิจัยในประเทศ

**ดำรง ขุนมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล (2533)** ได้ทำการวิจัย โดยใช้เกลือแกง (NaCl) เป็นตัวกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและขี้เลื่อย พบว่าการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงสุดโดยดูจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ คือ ควรใช้เวลากระตุ้นนาน 60 นาที ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นกะลามะพร้าวและขี้เลื่อย มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 640 และ 542 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมคลอไรด์ต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 3 และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ส่วนถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยนั้นประมาณว่าจะมีอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมคลอไรด์ต่อขี้เลื่อยเท่ากับ 5

**พงศธร ไคว์คชาภรณ์ (2538)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดและคุณสมบัติ รวมทั้งการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยใช้วิธีกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จากการทดลองพบว่า ซังข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้ คุณสมบัติของถ่านที่ทำการวิเคราะห์คือ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ค่าการฟอกสีเมธิลีนบลู ความชื้น ปริมาณร้อยละของผลผลิตพื้นที่ผิว จากการทดลองพบว่า ซังข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2

**สุจณีย์ ค่อยเสงี่ยม (2544)** ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีคุณสมบัติดีกว่าเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดโดยทั่วไป ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนดลิซพบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง ดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.83, 3.83, 3.75 และ 3.88 มิลลิกรัมต่อลิตร และดูดซับปรอทได้ 3.61, 3.83, 3.61 และ 3.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.853 และ 9.865 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

**ลลิตา นิตศานาจารย์กุล (2544)** ได้ทำการศึกษากำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้เกลือแกง (NaCl) การเตรียมถ่านกัมมันต์พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านพร้อมกับการกระตุ้นคือ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อเกลือแกงที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดคือ 1 ต่อ 0 โดยถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จะมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 567 และ 532 มิลลิกรัมของไอโอดีนนัมเบอร์ต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ตามลำดับ การดูดติดผิวตะกั่วจะเพิ่มขึ้นตั้งแต่พีเอช 2 ถึงพีเอช 9 และพีเอชของน้ำเสียเริ่มตั้งแต่ 4 ขึ้นไป พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนมีศักยภาพที่จะพัฒนาไปใช้งานได้ทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม

**มานพ ตีระรัตนสมโภช (2545)** ทำการศึกษากำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย กระตุ้นด้วยสารเคมี 2 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ พบว่าสภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยที่เหมาะสมคือ การกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขี้เลื่อยต่อโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 และเผากระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขี้เลื่อยต่อซิงค์คลอไรด์เท่ากับ 1 ต่อ 1 และเผากระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 6, 7, 8 และ 9 มีค่าเท่ากับร้อยละ 55.33, 84.64, 90.63 และ 99.91 สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ และมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.76, 99.91, 99.63 และ 99.91 สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ตามลำดับ

การทดลองประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ระดับความลึกของถ่านกัมมันต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่า ที่จุด Breakthrough สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 1.21, 14.17, 186.04 และ 209.17 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ และได้เท่ากับ 4.0, 21.5, 337.25 และ 829.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

**เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ (2547)** ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสี ย้อมออกจากน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เป้ง ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานน้ำตาลขี้ และใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้น เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดแบบต่อเนื่องโดย



ใช้คอลัมน์ ผลการทดลองการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากซีแ่งซึ่งใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้น พบว่าการเตรียมที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น 1 ต่อ 1 และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าถ่านซีแ่งสามารถดูดติดผิวสีไดเร็กซ์ สีรีเอกทีฟ สีดีสเพิร์ส และสีเอสซีได้ 14.40, 13.31, 2.42 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดมีประสิทธิภาพมากกว่า สามารถดูดติดผิวสีไดเร็กซ์ สีรีเอกทีฟ สีดีสเพิร์ส และสีเอสซีได้ 73.03, 16.19, 18.62 และ 2171.89 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

**วัชชัย สิงหศิริ (2548)** ศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม่กระถินเทพา กระตุ้นทางเคมีโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ การเตรียมถ่านพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสและไม่กระถินเทพา ทำการเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 59.01 และร้อยละ 60.91 ตามลำดับ แซ่สารกระตุ้นเกลือแกงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงที่อัตราส่วน 1:2 และเผากระตุ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านไม้ยูคาลิปตัสและไม่กระถินเทพา มีค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 612 และ 701 มิลลิกรัม มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 368.68 และ 408.64 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.27 และ 0.34 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดโพรงเฉลี่ยเท่ากับ 13.55 และ 18.04 อังสตรอมตามลำดับ การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้สารดูดซับแบบแห้ง เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพาบรรจุในคอลัมน์ที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดยสามารถกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ คิดเป็น 82.34, 52.94, 43.14 และ 41.18 BV ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็น 129.41, 70.59, 50.98 และ 50.00 BV ที่ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และได้นำถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพาไปผ่านการฟื้นฟูสภาพพบว่าค่าไอโอดีนัมเบอร์เท่ากับ 388 และ 421 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลตามลำดับ

## 2.12.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Rengaraj, Arabindoo และ Murugesen (1998) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดยางพาราและเปลือกของเมล็ดปาล์ม โดยกระบวนการต่างๆ ดังนี้ คือ กระบวนการใช้กรด กระบวนการกระตุ้นด้วยซัลเฟต กระบวนการกระตุ้นด้วยคาร์บอนเนต กระบวนการกระตุ้นด้วยคลอไรด์ กระบวนการโดโลไมต์ และนำผลจากการทดลองมาเปรียบเทียบ

กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายทั่วไป พบว่าทั้งเปลือกของเมล็ดยางพาราและเปลือกของเมล็ดปาล์มมีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และยังพบว่าค่าต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขายทั่วไป คือปริมาณคาร์บอนคงตัวจากเปลือกของเมล็ดยางพารามีค่า 98.45 เปอร์เซ็นต์ และถ่านกัมมันต์จากเปลือกของเมล็ดปาล์มมีค่า 98.43 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายมีค่า 97.09 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกของเมล็ดยางพารามีค่า 317 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จากเปลือกของเมล็ดปาล์มมีค่า 348 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 296 ตารางเมตรต่อกรัม

**Tam และ Michael (1999)** ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิที่จะทำการผลิตที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ใช้อากาศเป็นสารกระตุ้น และจะดูผลของถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งจะทำการผลิตโดยใช้วิธีขบวนการ 3 ขั้นตอน จะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง และจะให้ค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากสารชีวมวลในช่วงปานกลางของขั้นตอนแรกคือ ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงโดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่าก่อน แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อยๆ ในขั้นที่สอง ทำการออกซิไดซ์ด้วยอากาศโดยตั้งอัตราการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสไปจนถึงอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ขั้นที่สาม ทำการให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิสูง แต่ในเครื่องปฏิกรณ์นั้นจะเป็นระบบที่เฉื่อย ซึ่งอาจทำโดยให้มีการไหลผ่านของก๊าซไนโตรเจน ด้วยวิธีการดังกล่าวจะสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม และให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับวัตถุดิบเบื้องต้น)

**Mameri และคณะ (2000)** ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษมะกอกบดที่ได้จากประเทศแอลจีเรีย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ โดยการนำวัตถุดิบมาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยจะให้มีการไหลผ่านของก๊าซไนโตรเจนด้วยที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กันคือ 800 ถึง 950 องศาเซลเซียส และที่เวลาช่วง 30 ถึง 240 นาที จากการทดลองพบว่าไอน้ำมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกระตุ้น ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้นประมาณ 2 ชั่วโมง

**Tsai และคณะ (2000)** ทำการศึกษาการดูดติดผิวของสีย้อมเอไซด์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยและการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านขานอ้อยเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของซิงค์คลอไรด์ โดยมี

พื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 4.86 ถึง 790 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงอยู่ในช่วง 0.00334 ถึง 0.288 และขนาดโพรงเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 14.6 ถึง 27.5 อังสตรอม และผลการศึกษาจากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพหุนดลิตซ์ของสีย้อมเอไซด์ พบว่าประสิทธิภาพของการดูดติดผิวของถ่านชานอ้อยเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น และพบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถดูดติดผิวได้ดีกว่าที่ 20 องศาเซลเซียส

Kadirvelu, Thamaraiselvi และ Namasivayam (2001) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวโลหะหนัก จากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากมะพร้าวโดยใช้วิธีกระตุ้นทางเคมี พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นจากพีเอช 2 ถึง 6 และคงที่จนถึงพีเอช 10 และจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโลหะหนักและค่าพีเอช โดยสามารถกำจัดได้ดังนี้ Cu (II) ได้ 73 เปอร์เซ็นต์ Hg (II), Pb (II) และ Cd (II) ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และ Ni (II) ได้ 92 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก Cu (II), Hg (II), Pb (II), Cd (II) และ Ni (II) เท่ากับ 5.0, 4.0, 3.8, 4.0 และ 3.5 ตามลำดับ

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental Research) ในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ที่ห้องปฏิบัติการขยะมูลฝอย (Solid Waste Laboratory) หน่วยวิจัยของเสียอุตสาหกรรม (Research Unit of Industrial Waste Management) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย ดำเนินการที่ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติ ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ (Column Test) โดยอาจนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการผลิตหรือใช้ประโยชน์ในกรณีศึกษาต่อ และเป็นข้อมูลในระดับขยายสเกลต่อไป

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์

- เตาเผา : Valcan Box Furnace รุ่น 3 - 1750. USA
- ตู้อบความร้อน : WTB Binder. Germany
- ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิดขนาด 400 มิลลิลิตร
- ชุดกรองสูญญากาศ
- ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 8, 20, 30, 100 และ 325 เมช
- โถป้องกันความชื้น

##### 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง : AND HM-300. Japan
- เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ K รุ่น VRN-360
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง : Desktop pH Meter PHL-20. Japan
- กระดาษกรอง Whatman No.5, 40 และ 42
- บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

- ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ปีกเกอร์ขนาด 50, 100, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กรวยแก้ว
- ปีเปต ขนาด 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 25.0, 50.0 และ 100.0 มิลลิลิตร
- หลอดหยด
- แท่งแก้ว

### 3.2.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน : Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL, JSM 5410LV Scanning Microscope.Japan
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว : Micromeritics, ASAP2000. Germany.

### 3.2.4 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นสีข้ม

- เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ : Spectrophotometer

### 3.2.5 อุปกรณ์ในการทดลองแบบต่อเนื่อง

- ถังดูดซับแบบคอลัมน์ : ใช้ท่ออะครีริก (Acrylic) ใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.5 เซนติเมตร สูง 1.50 เมตร จำนวน 3 อัน
- ถังพลาสติกเก็บน้ำเสีย
- เครื่องสูบน้ำและสายยาง

## 3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
- 2) สารละลายน้ำแป้ง (Soluble Starch)
- 3) สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 0.10 N
- 4) สารละลายไอโอดีน  $0.1000 \pm 0.001$  N
- 5) สารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ ) 0.1000 N
- 6) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )  $0.10 \pm 0.01$  N
- 7) โปตัสเซียมไอโอไดน์ (KI)
- 8) ซิงค์คลอไรด์ ( $\text{ZnCl}_2$ )
- 9) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

### 3.4 วัสดุที่ใช้สำหรับการศึกษา

3.4.1 ไม้ยูคาลิปตัส ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะนำส่วนที่เป็นเนื้อไม้แห้งมาใช้ (ตัดจากต้นไม้สดสูงจากพื้นดินหรือโคนต้นประมาณ 1 เมตร ตากแดดทิ้งไว้ 7 วัน เพื่อให้เนื้อไม้แห้ง) ลักษณะของชิ้นวัสดุจะตัดเป็นท่อนสั้นหนาประมาณ 1 นิ้ว ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมหนาประมาณ 1 ถึง 2 นิ้ว



รูปที่ 3.1 ลักษณะวัสดุท่อนไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการศึกษา

### 3.4.2 น้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติ

1) **สีเขียวจากเพกา** โดยเอาเปลือกเพกาสดมาหั่น หรือสับให้เป็นชิ้นเล็กๆ นำไปต้ม 20 นาที ช้อนเอาเปลือกออก ต้มเอาแก้วแปบเอาแต่น้ำใส่เต็มลงไปใสน้ำมะเกลือเล็กน้อย ใส่ปูนขาวและใบส้มป่อยผสมลงไป ทิ้งไว้สักพัก แล้วกรองให้เหลือแต่น้ำสีพร้อมที่จะย้อม นำเอาน้ำย้อมตั้งไฟพออุ่น นำผ้าฝ้ายซึ่งชุบน้ำบิดพอหมาด จุ่มลงในอ่างย้อม ต้มต่อไปนาน 20 นาที จนได้สีที่ต้องการ ยกผ้าฝ้ายออก จะได้น้ำทิ้งจากการย้อมด้วยสีเขียวจากเปลือกต้นเพกา



รูปที่ 3.2 ลักษณะของเปลือกไม้เพาก่อนนำมาแยกสีย้อมธรรมชาติ

2) **สีแดงจากฝาง** เอาเปลือกไม้ฝางสดซึ่งผ่าเป็นชิ้นเล็ก ๆ ลงไปต้มในน้ำเดือดนาน 1 ชั่วโมง เติมน้ำต้มไปเรื่อยๆ 1 กำ ต้มต่อไปอีกเล็กน้อย ช้อนเอากากออกแล้วเติมน้ำต่างลงไป จะได้น้ำย้อมสีแดง จึงเอาผ้าฝ้ายที่ชุบน้ำบิดพอหมาดจุ่มลงไปอ่างย้อมตั้งไฟต้มนาน 30 นาที ยกขึ้นจากอ่างย้อม จะได้น้ำทิ้งจากการย้อมด้วยสีแดงจากเปลือกต้นฝาง



รูปที่ 3.3 ลักษณะของเปลือกไม้ฝางก่อนนำมาแยกสีย้อมธรรมชาติ

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

#### 3.5.1 วิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัส คือ

- ปริมาณสารระเหย (VM)
- ปริมาณเถ้า (Ash)
- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC)

ทำการวิเคราะห์ตาม ASTM D 1762-84 และ ASTM D 2866-94 ตามภาคผนวก ก และภาคผนวก ข ตามลำดับ

#### 3.5.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีธรรมชาติ

- อุณหภูมิ
- ค่าบีโอดี
- ค่าพีเอช
- หมู่ฟังก์ชันนัล
- ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสีย

#### 3.5.3 ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

- หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ตามวิธี ASTM D4607-86 ตามภาคผนวก ค แล้วเลือกถ่านกัมมันต์ที่ค่าไอโอดีนนัมเบอร์มากที่สุด ใช้ทดสอบสมบัติอื่นๆ ต่อไป
- พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย
- ถ่ายภาพพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยกล้อง SEM

#### 3.5.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ โดยการทดลองแบบแบทช์ (Batch Process)

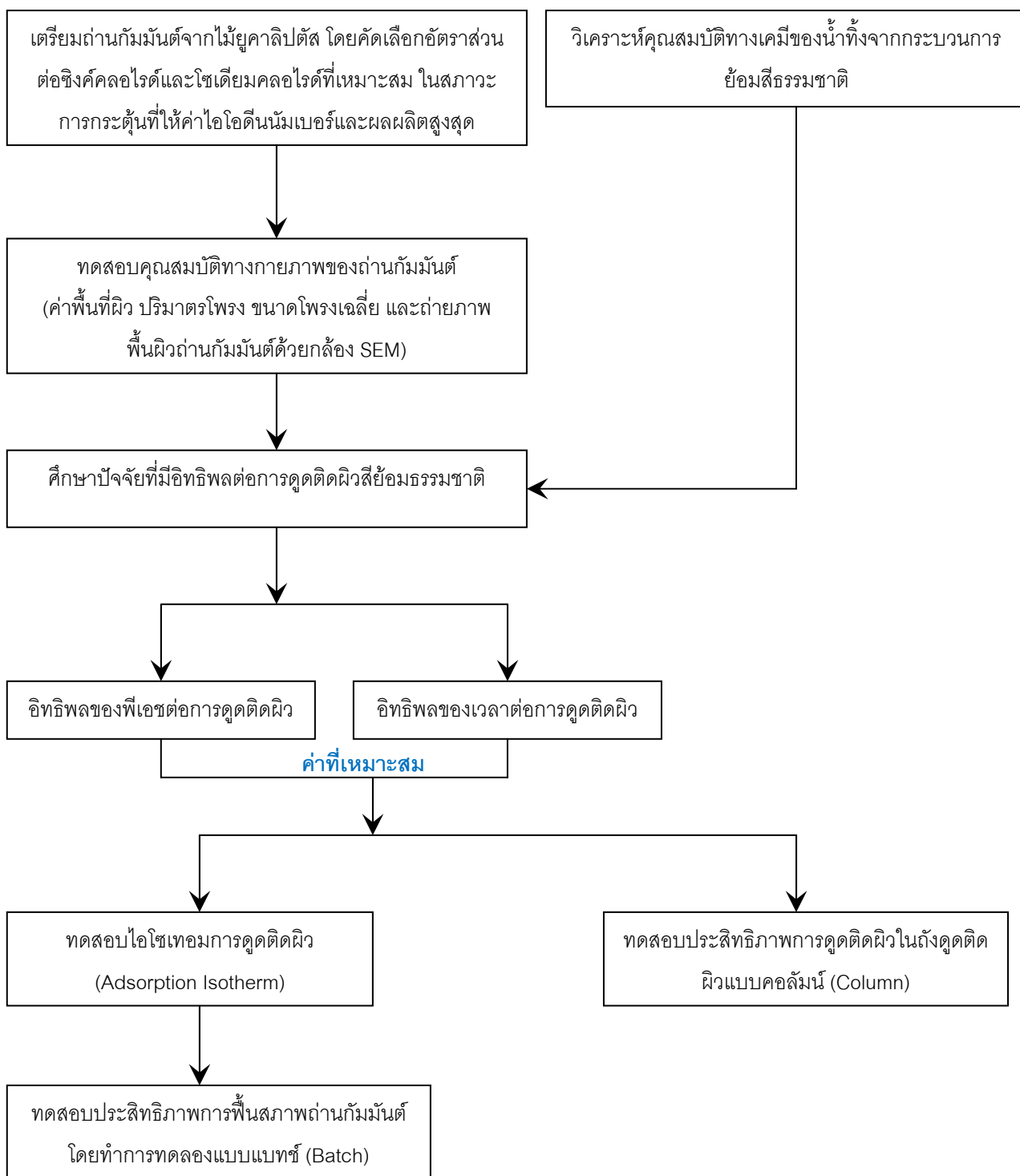
- ค่าพีเอชที่ภาวะสมดุล
- เวลาสัมผัส
- ทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนดลิช

#### 3.5.5 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorption Column) ซึ่งทำการป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง



### 3.5.6 ทำการปรับคืนสภาพถ่านกัมมันต์ โดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนการทดลองแสดงรายละเอียดตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.6 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.6.1 เตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์

1) นำชิ้นไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมไว้ล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของวัตถุดิบ แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง และเผาให้เป็นถ่านไม้ในที่ขาดอากาศที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที แล้วเลือกถ่านไม้ที่มีร้อยละผลผลิตมากที่สุดจากการเผาเป็นถ่านทั้งหมด (ไม่เหลือส่วนที่เป็นเนื้อไม้) ดำเนินการทดลองต่อไป

2) บดถ่านไม้ยูคาลิปตัสจากข้อ 1) จนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 เมช และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 20 เมช (ขนาดประมาณ 0.85 ถึง 2.36 มิลลิเมตร) มาแช่ในสารละลายอิ่มตัวของซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) และสารละลายอิ่มตัวของเกลือแกง (โซเดียมคลอไรด์,  $NaCl$ ) ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักของถ่านต่อซิงค์คลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) กรองถ่านไม้ยูคาลิปตัส จากข้อ 2) โดยใช้ตระแกรงกรอง แล้วนำไปผึ่งลมให้แห้ง

4) เผาในหม้อดินที่มีฝาปิดที่อุณหภูมิ 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้น

5) นำวัตถุดิบที่ได้จากข้อ 4) เข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้นโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการเผาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4

6) หลังจากการเผา นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำ และกรดไฮดรอลิกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามด้วยน้ำเดือด และน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง แช่น้ำล้างไว้ 1 คืน เพื่อล้างสารกระตุ้นที่เหลือจากการเผาและติดค้างอยู่บนวัตถุดิบจนหมด โดยสามารถดูได้จากค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำล้างถ่าน ซึ่งมีค่าคงที่จากการวัดในน้ำหลายๆ ครั้ง ผึ่งลมให้แห้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

7) นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช (0.045 มิลลิเมตร) แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ตาม ASTM D 4607-86 ตามรายละเอียดใน

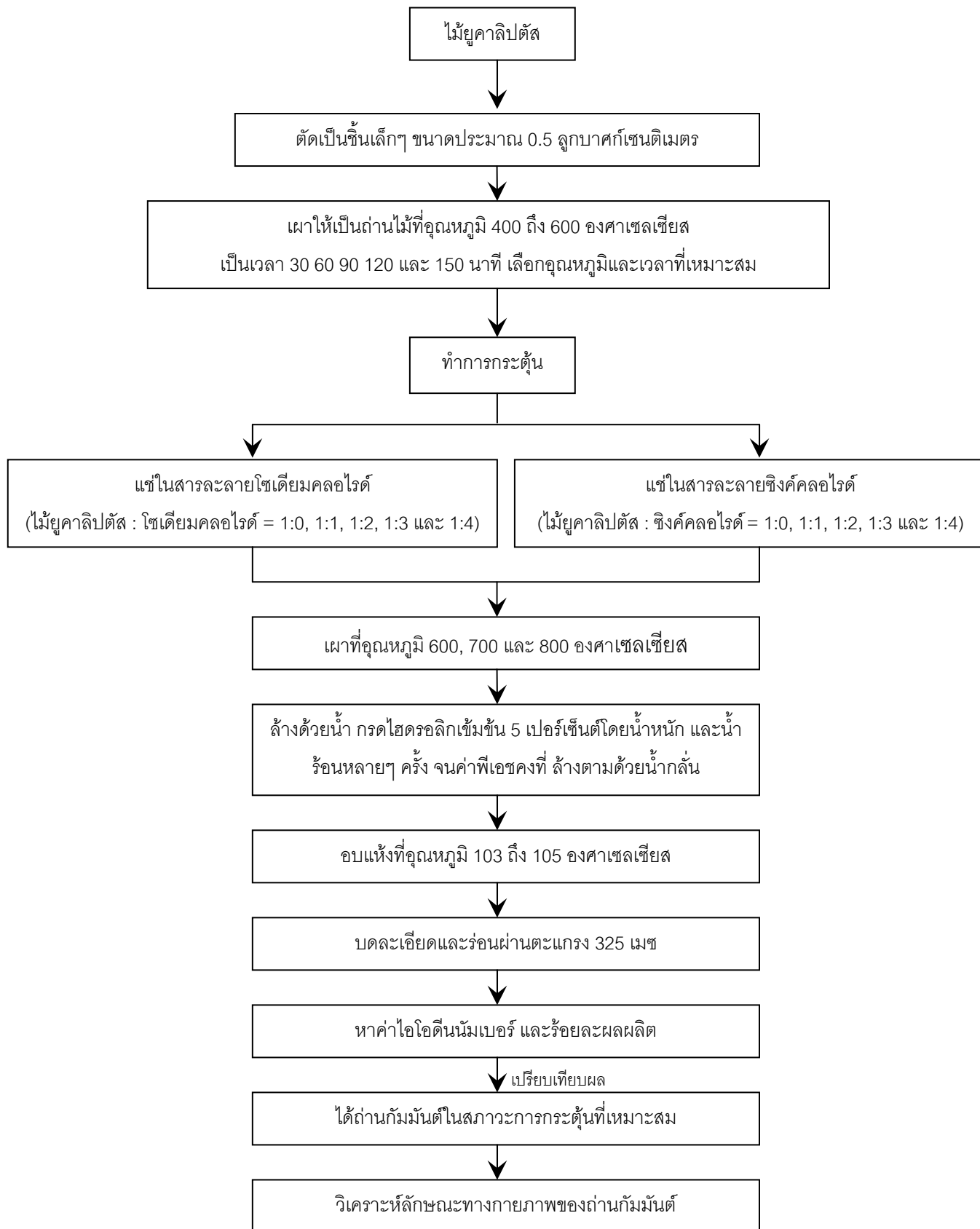
ภาคผนวก ค เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวและคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์และร้อยละผลผลิตที่เหมาะสมมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดติดผิวสีจากสีย้อมธรรมชาติในขั้นอื่นๆ ต่อไป

8) ศึกษาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ลักษณะทางกายภาพ	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์
พื้นที่ผิว	ตารางเมตรต่อกรัม	N <sub>2</sub> -Bet(Brunauer-Emmeit Teller)
ปริมาตรโพรง	มิลลิลิตรต่อกรัม	N <sub>2</sub> -Bet(Brunauer-Emmeit Teller)
ขนาดโพรงเฉลี่ย	อังสตรอม	N <sub>2</sub> -Bet(Brunauer-Emmeit Teller)
ความชื้น	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	ASTM D1762-84
เถ้า	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	ASTM D1762-84
สารอินทรีย์ระเหย	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	ASTM D1762-84
คาร์บอนคงตัว	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	ASTM D1762-84

9) ถ่ายภาพลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์

### 3.6.2 ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

#### 3.6.2.1 การทดสอบค่าไอโอดีนนมเบอร์

- นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.6.1 ข้อย่อยที่ 6) แบ่งเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่ล้างด้วยน้ำจากข้อ 3.6.1 ข้อย่อยที่ 6)

ส่วนที่ 2 ล้างเพิ่มเติมด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วล้างตามด้วยน้ำร้อน (หรือใช้สารละลายเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมที่ละลายน้อยในการล้างหากจำเป็น เพื่อทำปฏิกิริยาการสะเทิน) จนถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าพีเอชคงที่ที่สภาพเป็นกลาง หรือมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 7.5 จากนั้นทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น

- นำถ่านกัมมันต์ทั้งสองส่วนที่เตรียมได้มาบดให้ละเอียด จนสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เมช ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนมเบอร์ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 4607 - 86, 1996 (วิธีหาค่าไอโอดีนนมเบอร์) เพื่อเปรียบเทียบและคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่มีความเหมาะสมที่สุดที่เตรียมได้ ไปใช้ทดลองและทดสอบสมบัติอื่นๆ ต่อไป

#### 3.6.2.2 การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย

- นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ และคัดเลือกที่เหมาะสมที่สุดแล้วจากข้อ 3.6.2.1 ไปทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (Specific Surface Area Analyzer) โดยการวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดเก็บไว้โดยถ่านกัมมันต์ (Brunauer-Emmett-Teller; BET)

### 3.6.3 ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวโดยการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวสีย้อมในน้ำเสีย จากสีย้อมธรรมชาติของถ่านยูคาลิปตัส โดยใช้การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวดังนี้

#### 3.6.3.1 ผลของ พีเอช ต่อการดูดติดผิว

- เตรียมน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติที่ปรับ พีเอช เท่ากับ 5, 7, 9, 11 และ 13 ตามลำดับ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ สารละลายกรดไนตริก ตามความจำเป็น

- นำน้ำเสียที่ได้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร อย่างละ 100 มิลลิลิตร 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ใบ

- ชุดการทดลองแรกนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมากรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 วัดค่าพีเอช และค่าการดูดกลืนแสง

- ชุดการทดลองที่สอง เติมถ่านกัมมันต์ที่คัดเลือกว่าเหมาะสมที่สุดแล้ว น้ำหนัก 1.0 กรัม ลงขวดทุกใบ

- นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

- วัดค่าพีเอชที่จุดสมดุล ในขวดแต่ละใบหลังเขย่า บันทึกค่าไว้

- แยกผงถ่านกัมมันต์ออก โดยการกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

- นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.6

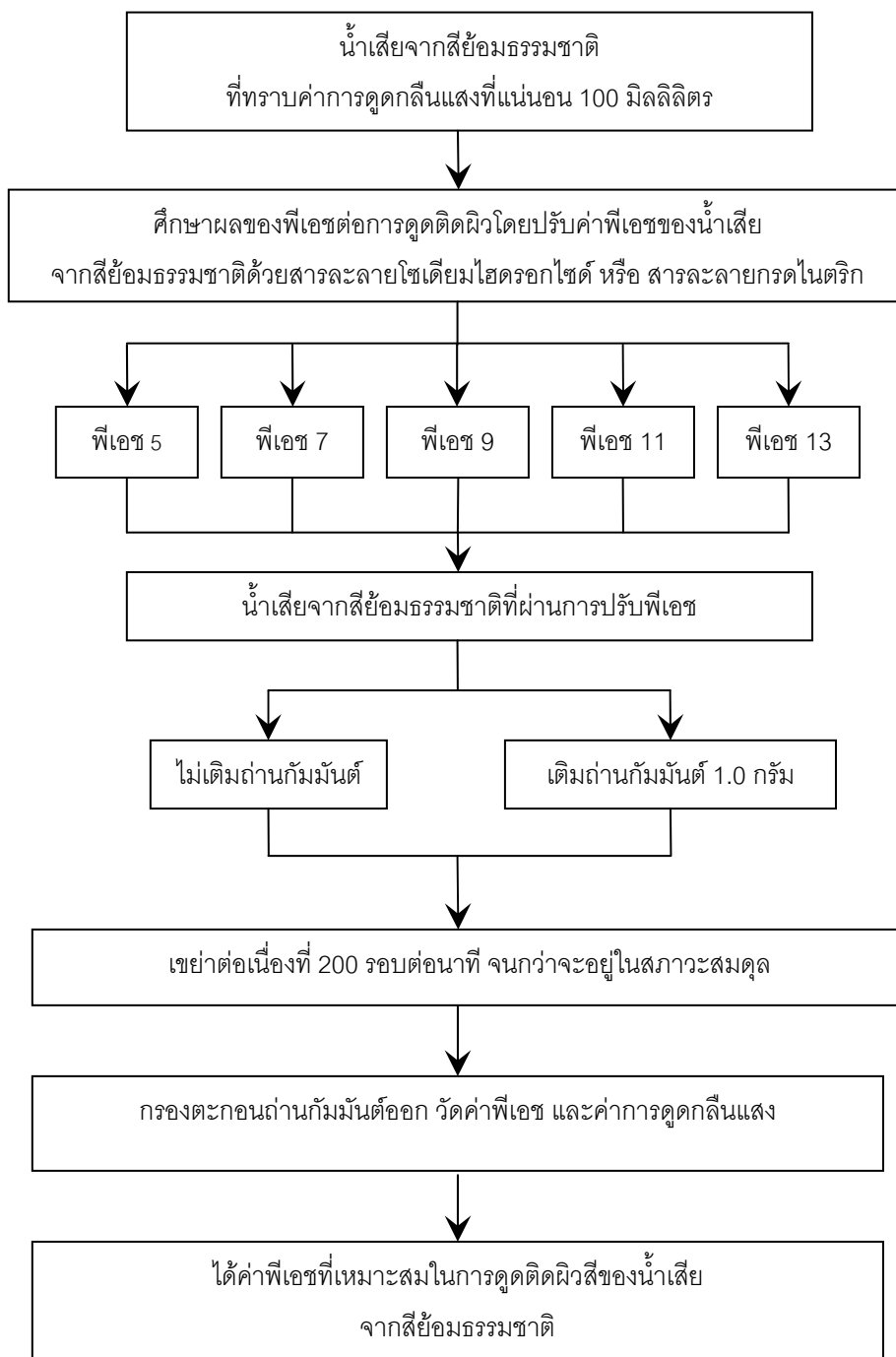
### 3.6.3.2 ผลของเวลาสัมพัทธ์ต่อการดูดติดผิว

- นำน้ำเสียจากสี่ข้อมธรรมชาติ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.6.3.1 แบ่งออกเป็นสองชุดการทดลอง
  - ชุดแรกนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 และ 240 นาที แล้วนำมากรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 วัดค่าพีเอชและค่าการดูดกลืนแสง เพื่อหาร้อยละการตกตะกอนของน้ำเสียจากสี่ข้อมธรรมชาติ
  - ชุดที่สองจะเติมถ่านกัมมันต์ขนาด 325 เมช ปริมาณ 1.0 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 และ 240 นาที เช่นเดียวกัน
- แยกถ่านกัมมันต์ออก โดยนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 วัดพีเอช และค่าการดูดกลืนแสง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.7

### 3.6.3.3 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์

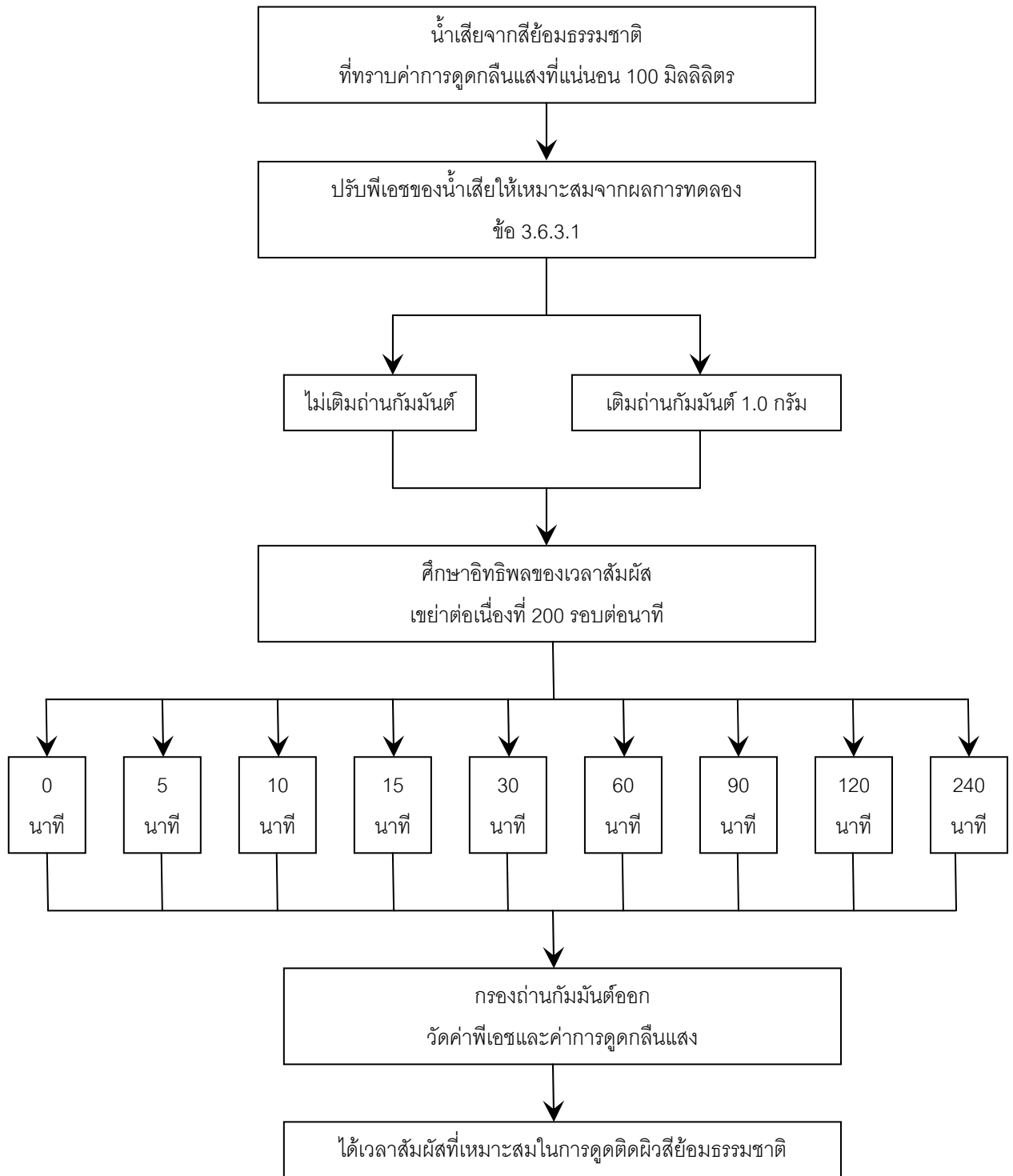
- นำน้ำเสียจากสี่ข้อมธรรมชาติ ปรับพีเอชให้เท่ากับค่าพีเอชที่เหมาะสมจากผลของการทดลอง 3.6.3.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
  - เติมผงถ่านยูคาลิปตัสปริมาณ 0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.0, 2.0 และ 5.0 กรัม
  - นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลา 120 นาที
  - แยกผงถ่านกัมมันต์ออก โดยการกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 นำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
  - นำผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสี่ข้อมที่เหลือ มาเขียนสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.8

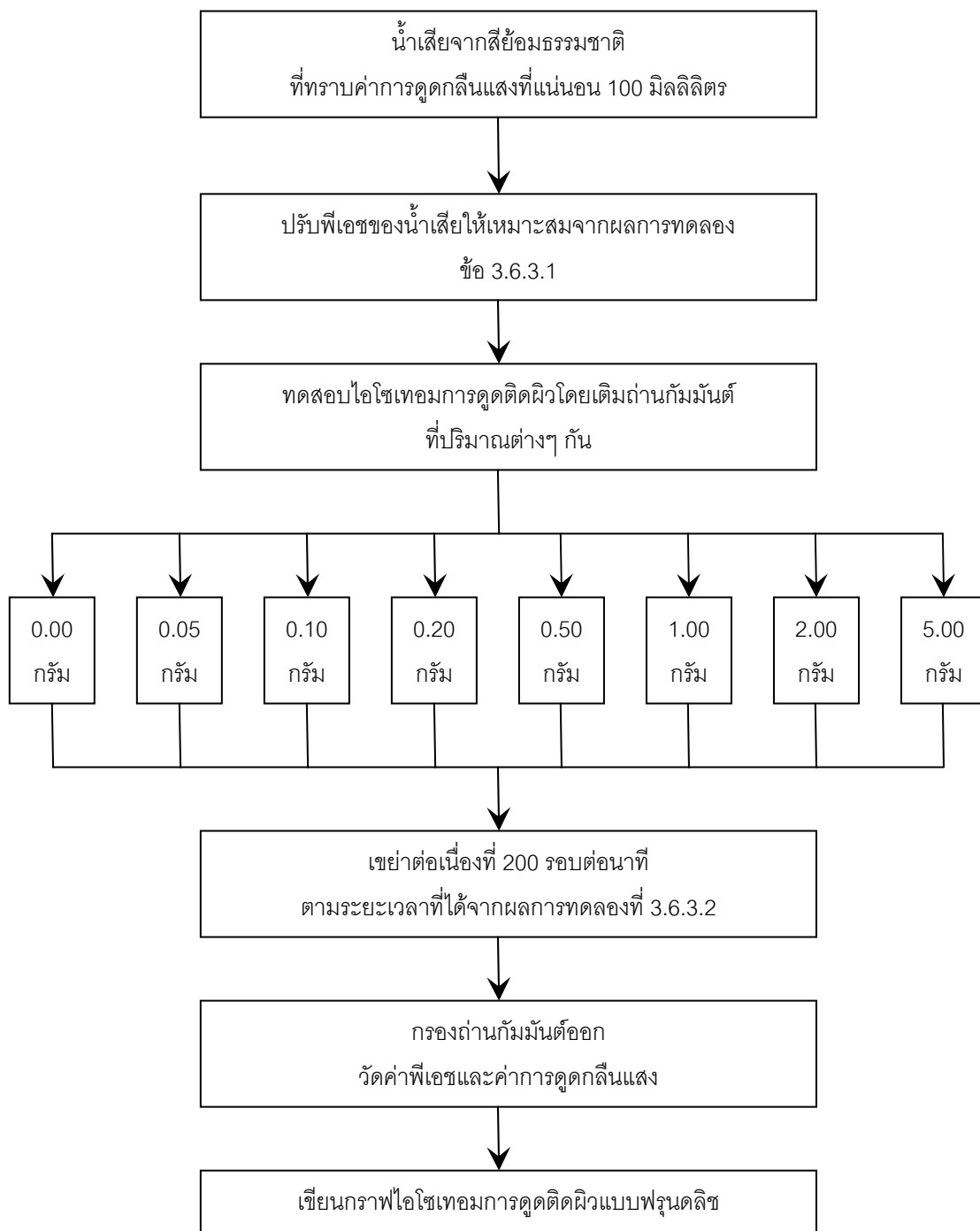


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว





รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสดต่อการดูดติดผิว



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ (ไอโซเทอมการดูดติดผิว)

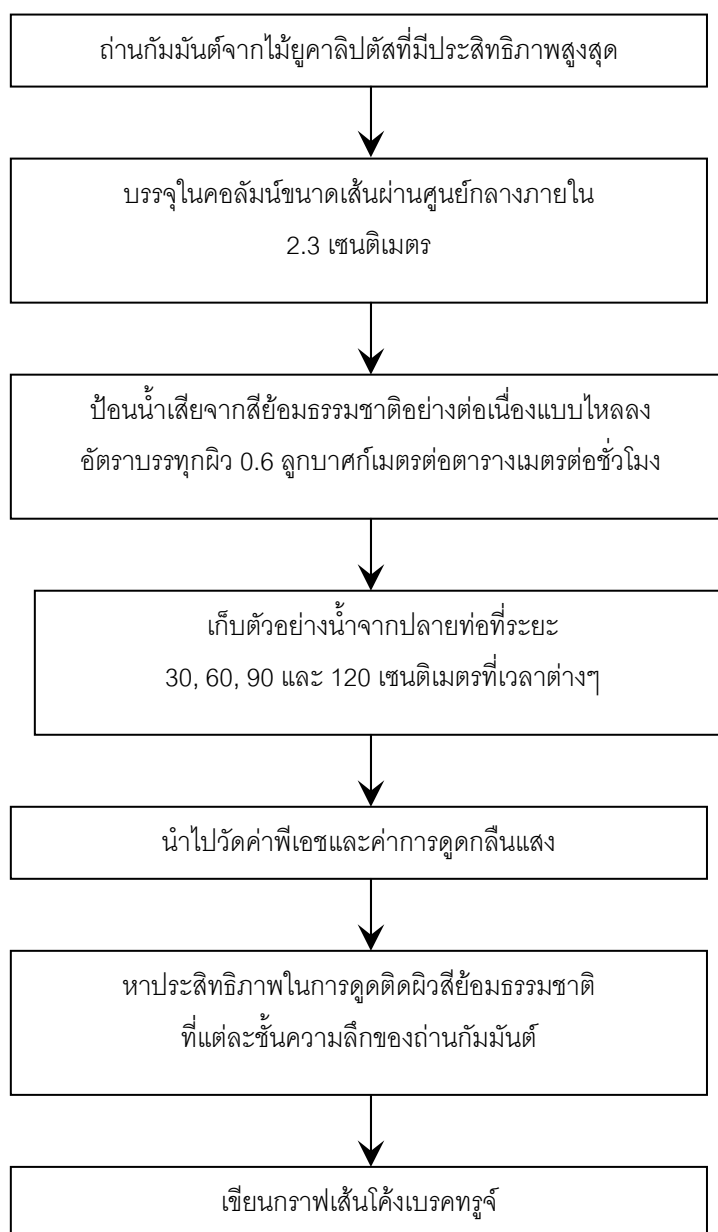
### 3.6.4 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ (Column Test)

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติ ของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Column Test) โดยนำถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงสุดจากผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช มาบรรจุในถังดูดติดผิวแบบแท่งแล้วป้อนน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติให้ไหลลงอย่างต่อเนื่องตามขั้นตอน ดังนี้

- 1) นำถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงสุด มาคัดขนาดให้อยู่ในช่วง 8 ถึง 20 เมช (0.59 ถึง 2.36 มิลลิเมตร)
- 2) บรรจุถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสลงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่เป็นท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 เซนติเมตร เจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำ ที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร บันทึกน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้บรรจุในคอลัมน์สูง 120 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.9
- 3) ทำการป้อนน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติที่ค่าพีเอชสมดุล ด้วยอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ทุกๆ ชั่วโมงในช่วงแรก และอีกทุกๆ 2 ถึง 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จนกว่าค่าดูดกลืนแสงจะมีค่าเท่ากับน้ำเสียเข้าระบบ
- 4) นำน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติที่เก็บได้ไปวัดค่าพีเอช และค่าการดูดกลืนแสง
- 5) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลหาประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ระบบถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพถ่านโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

### 3.6.5 ศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้อยู่คาบปัส ที่ผ่านการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติ

ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวสีของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติระหว่างถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) เพื่อหาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพ

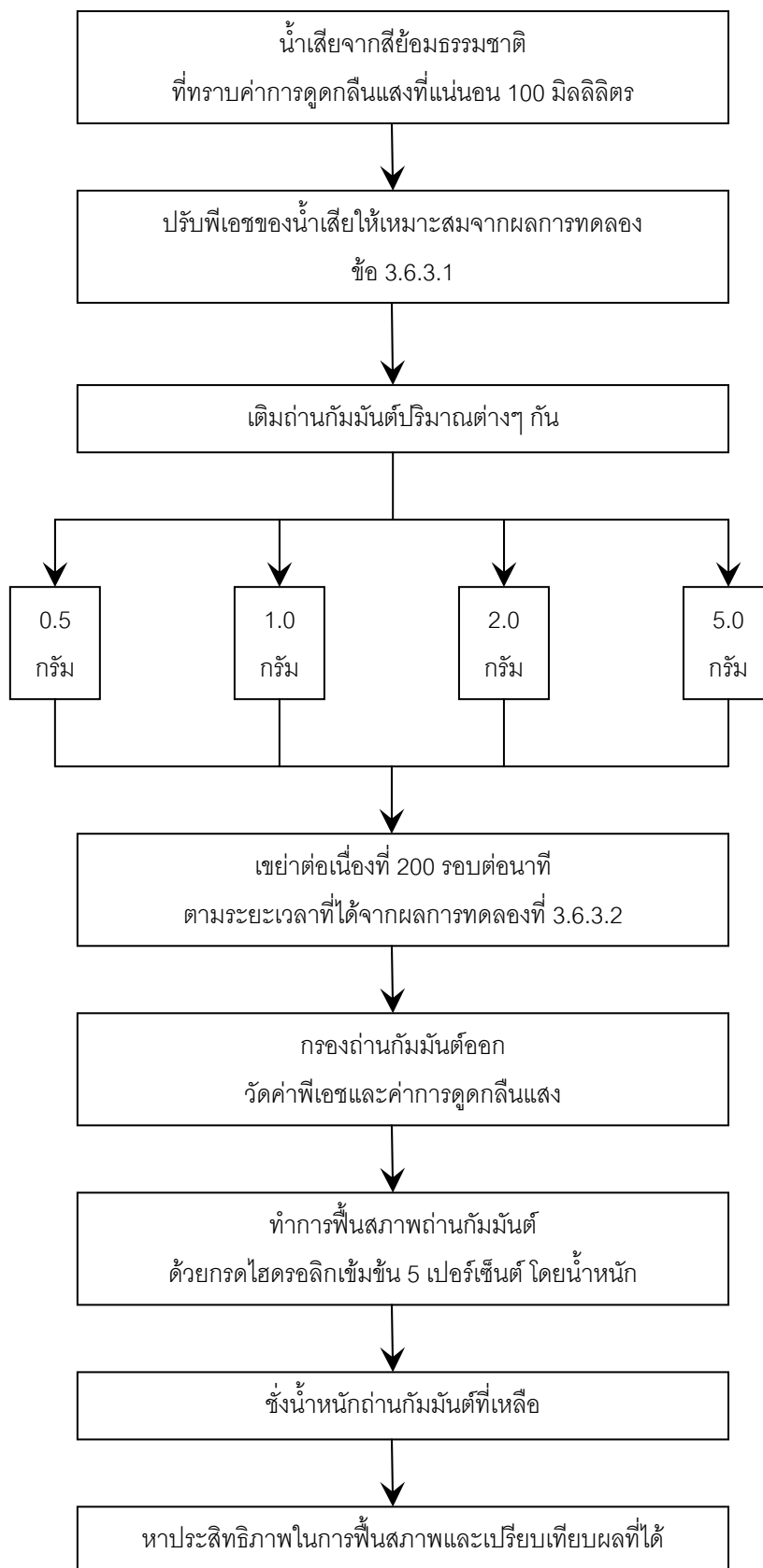
- นำน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.6.3.1

- เติมถ่านกัมมันต์ขนาด 325 เมช ปริมาณ 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่เหมาะสมจากผลการทดลอง 3.6.3.2

- แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 วัดค่าพีเอชของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

- นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิวแล้วมาฟื้นฟูสภาพ โดยการล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ นำถ่านกัมมันต์มาชั่งน้ำหนักที่เหลือ

- นำมาดูดติดผิวสีจากสีย้อมธรรมชาติและทำการฟื้นฟูสภาพอีก 2 รอบ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง หาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสี่อ้อมธรรมชาติ

### 3.6.6 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ

เพื่อความเป็นไปได้ในการหาเครื่องมือวัดสีสำหรับใช้ในการทดลอง จึงเลือกใช้เครื่องมือสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งปกติมีใช้กันอยู่ในห้องปฏิบัติการ มาใช้ในการวัดตัวอย่างน้ำเสีย โดยวัดออกมาเป็นค่าแอมซอบแบนท์ ดังนั้นวิธีวัดสีด้วยเครื่องมือชนิดนี้จึงมีขีดจำกัด ตรงที่ต้องเลือกตัวอย่างน้ำเสียที่นำมาทดลองเป็นน้ำเสียที่มีโทนสีโดดเท่านั้น เพราะเวลาที่หาค่าความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตรที่สามารถใช้เป็นตัวแทนสำหรับโทนสีใดๆ นั้น จะให้ค่าความยาวคลื่นตัวแทนเพียงช่วงความยาวเดียวเท่านั้นที่ 580 นาโนเมตร สำหรับน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา และ 520 นาโนเมตร สำหรับน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง

วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียทำได้โดย นำตัวอย่างน้ำเสียที่เตรียมไว้ไปวัดสีเริ่มต้นด้วยเครื่องสเปกโตรแอมซอบแบนท์ โดยปรับค่าแอมซอบแบนท์ของน้ำกลั่นเท่ากับศูนย์ กรองแล้ววัดค่าแอมซอบแบนท์ตัวอย่างน้ำเสียเริ่มต้น



## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ในรูปแบบของตารางและกราฟ แยกเป็นแต่ละการทดลองตามลำดับดังนี้

#### 4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ การศึกษาสมบัติและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต

ไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์สามารถหาได้โดยทั่วไป เนื่องจากมีแหล่งผลิตกระจายอยู่ทั่วประเทศไทย ในงานวิจัยนี้ นำไม้ยูคาลิปตัสส่วนลำต้นเหนือพื้นดิน อายุประมาณ 4 ถึง 5 ปี เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นมากที่สุด 25 เซนติเมตร น้อยที่สุด 15 เซนติเมตร เป็นวัตถุดิบในการทดลอง

4.1.1 สมบัติเบื้องต้น (ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว) ของไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดลอง ตามวิธี ASTM D 1762-84 (Dry Basis) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของไม้ยูคาลิปตัสจากแหล่งสิงห์บุรี

ครั้งที่	ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter, VM)			เถ้า (Ash.)		ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon, FC)
	น้ำหนักตัวอย่าง (Dry) (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ร้อยละโดย น้ำหนัก (%)	น้ำหนักหลังอบเผา (กรัม)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	ร้อยละได้น้ำหนัก (%)
1	1.0245	0.2198	78.546	0.0100	0.976	20.478
2	1.0237	0.2153	78.968	0.0094	0.918	20.113
3	1.0255	0.2238	78.176	0.0087	0.848	20.975
เฉลี่ย			78.564		0.914	20.522

4.1.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อร้อยละผลผลิต และสมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

ไม้ยูคาลิปตัสจะถูกนำไปเผาคาร์บอนไนซ์ในช่วงอุณหภูมิ 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละของผลผลิต เพื่อคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผลจากการวิเคราะห์ถ่านไม้ยูคาลิปตัส แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าประมาณของถ่านไม้ยูคาลิปตัส จากการคาร์บอนไนซ์ที่ภาวะต่างๆ

ครั้งที่	อุณหภูมิที่เผา (°ซ)	เวลาที่เผา (นาที)	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ผลผลิต (%)	เถ้า (Ash) (%)	คาร์บอนคงตัว (%)	หมายเหตุ
1	400	30	65.45	24.80	37.89	5.214	94.786	ถ่านไม้ยังไหม้ไม่หมด
2		60	65.34	22.39	34.27	5.205	94.795	
3		90	65.09	20.95	32.19	4.978	95.022	
4		120	65.11	18.42	28.29	4.876	95.124	
5		150	65.28	16.48	25.25	4.864	95.136	
6	450	30	65.34	24.75	37.88	4.593	95.407	เลือกใช้
7		60	65.17	20.99	32.21	4.584	95.416	
8		90	65.85	20.53	31.18	4.579	95.421	
9		120	64.98	18.36	28.25	4.575	95.425	
10		150	65.12	16.49	25.32	4.570	95.430	
11	500	30	65.84	16.15	24.53	4.493	95.507	
12		60	65.30	14.26	21.84	4.406	95.594	
13		90	65.21	13.12	20.12	4.347	95.653	
14		120	65.30	12.79	19.59	4.342	95.658	
15		150	65.18	12.72	19.52	4.328	95.672	
16	550	30	65.32	15.31	23.44	4.123	95.877	
17		60	65.32	13.79	21.11	4.118	95.882	
18		90	65.84	12.93	19.64	4.114	95.886	
19		120	65.17	12.72	19.52	4.109	95.891	
20		150	65.26	12.62	19.34	4.086	95.914	
21	600	30	65.14	14.66	22.51	3.684	96.316	
22		60	65.26	13.17	20.18	3.680	96.320	
23		90	65.28	12.59	19.29	3.675	96.325	
24		120	65.34	12.57	19.24	3.666	96.334	
25		150	65.65	12.55	19.12	3.657	96.343	

หมายเหตุ : ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัว (%) คัดจากน้ำหนักหลังหาปริมาณสารระเหยแล้ว

จากตารางที่ 4.2 ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส มีค่าร้อยละของผลผลิตสูงสุดร้อยละ 37.89 จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และร้อยละของผลผลิตต่ำสุดร้อยละ 19.12 จากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที

สำหรับปริมาณคาร์บอนคงตัว มีค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัวสูงสุด ร้อยละ 96.343 จากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที และร้อยละของคาร์บอนคงตัวต่ำสุดร้อยละ 94.786 จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

การเลือกใช้อุณหภูมิและเวลาที่เผา พิจารณาค่าร้อยละผลผลิตสูงสุดและการเปลี่ยนแปลงเป็นถ่านทั้งหมดเป็นตัวแปรหลักในการพิจารณา โดยเลือกใช้อุณหภูมิการเผาที่ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเผา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ซึ่งให้ค่าผลผลิตร้อยละ 37.88



รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ่านไม้ยูคาลิปตัสจากการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 นาที

#### 4.2 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผาต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

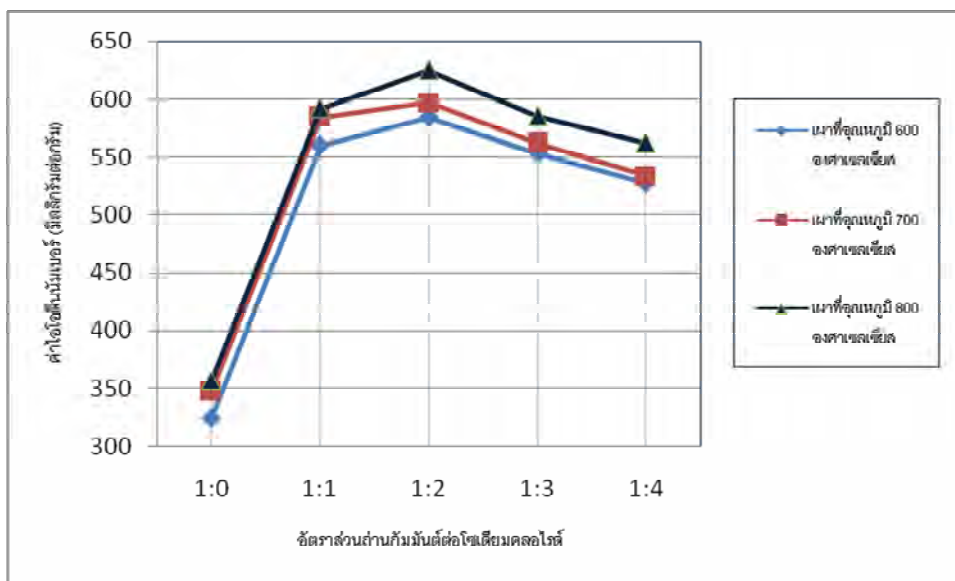
ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่จะนำมาใช้ในการกำจัดสี จากสีข้อมธรรมชาติ จะถูกเตรียมโดยใช้สารโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) และ ซิงค์คลอไรด์ ( $\text{ZnCl}_2$ ) เป็นสารกระตุ้น ซึ่งต้องทำการหาอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) และ ซิงค์คลอไรด์ ( $\text{ZnCl}_2$ ) ต่อถ่านกัมมันต์อย่างเหมาะสม โดยนำถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสมาบดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 20 (0.85 ถึง 2.36 มิลลิเมตร) เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการซึมแพร่ของสารละลาย

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) เข้าสู่เนื้อถ่าน ทำการทดลองโดยแช่ถ่านในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนต่างๆ กันตามวิธีการดำเนินการวิจัย เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตากให้แห้งแล้วนำมาอบได้น้ำ แล้วนำไปบรรจุลงในภาชนะดินเผา ทำการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส รอให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม มาทำการทดลองวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D4607-86 ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดอย่างหนึ่งในการบ่งบอกถึงความสามารถดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นด้วย ผลการทดลองหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์แสดงดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์

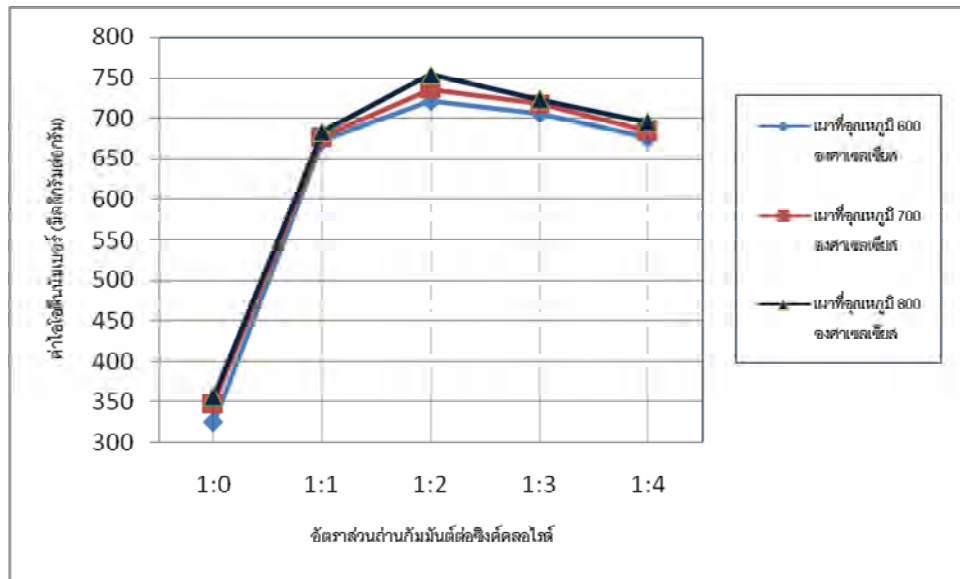
ครั้งที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ ถ่านกัมมันต์ : โซเดียมคลอไรด์	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	หมายเหตุ
1	600	1:0	325	
2		1:1	560	
3		1:2	584	
4		1:3	553	
5		1:4	528	
6	700	1:0	348	
7		1:1	584	
8		1:2	597	
9		1:3	562	
10		1:4	534	
11	800	1:0	357	
12		1:1	592	
13		1:2	625	ค่าสูงสุด
14		1:3	585	
15		1:4	562	



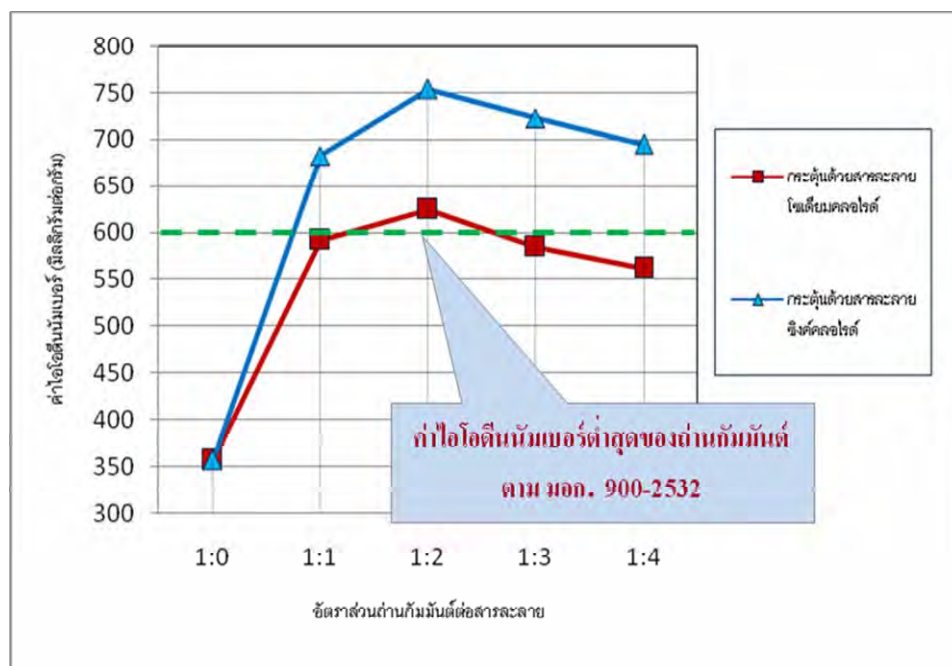
รูปที่ 4.2 ค่าไอโอดีนน้ำมันเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์

ตารางที่ 4.4 ค่าไอโอดีนน้ำมันเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ครั้งที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ ถ่านกัมมันต์ : ซิงค์คลอไรด์	ค่าไอโอดีนน้ำมันเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	หมายเหตุ
1	600	1:0	325	
2		1:1	672	
3		1:2	721	
4		1:3	705	
5		1:4	675	
6	700	1:0	348	
7		1:1	677	
8		1:2	736	
9		1:3	718	
10		1:4	684	
11	800	1:0	357	
12		1:1	683	
13		1:2	754	ค่าสูงสุด
14		1:3	723	
15		1:4	695	



รูปที่ 4.3 ค่าไอโอดีน้ำมันเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์สเตียเรต



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าไอโอดีน้ำมันเบอร์ของถ่านกัมมันต์ ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ ที่อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส

จากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด ที่การกระตุ้นด้วยอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อไซเดียมคลอไรด์และซิงค์คลอไรด์ คือ 1:2 และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเท่ากัน การกระตุ้นด้วยไซเดียมคลอไรด์จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 625 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 754 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าที่ได้มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก.900-2532) จึงเลือกใช้อัตราส่วนการกระตุ้นเท่ากับ 1:2 และการเผาที่อุณหภูมิเผา 800 องศาเซลเซียส

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ คือ โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่าน ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (Specific Surface Area Analyzer) โดยการวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับไว้โดยถ่านกัมมันต์ (Brunauer-Emmett-Teller; BET) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

คุณสมบัติ	หน่วย	ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์	ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์	ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 <sup>#</sup>
พื้นที่ผิว	ตร.ม.ต่อกรัม	405	453	719.36
ปริมาตรโพรง	มิลลิลิตรต่อกรัม	0.284	0.315	0.33253
ขนาดโพรงเฉลี่ย	อังสตรอม	13.58	13.92	14.8101

หมายเหตุ : 1) ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสผ่านการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุติดต่อสารกระตุ้นเท่ากับ 2:1 ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส  
2) <sup>#</sup> ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 (จักริน นกไร่, 2549)

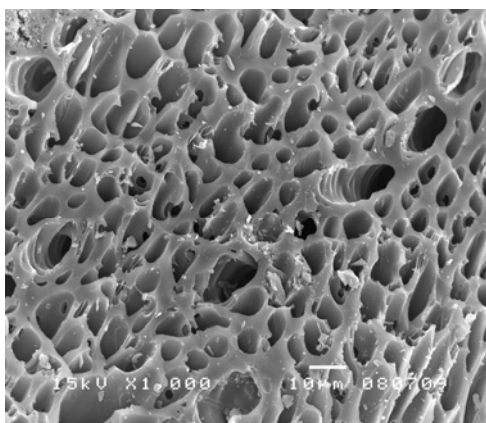
จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ มีพื้นที่ผิว 453 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิว 405 ตารางเมตรต่อกรัม

ค่าปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ มีค่า 0.315 มิลลิลิตรต่อกรัม และ 13.92 อังสตรอม ตามลำดับ มีค่ามากกว่าถ่าน

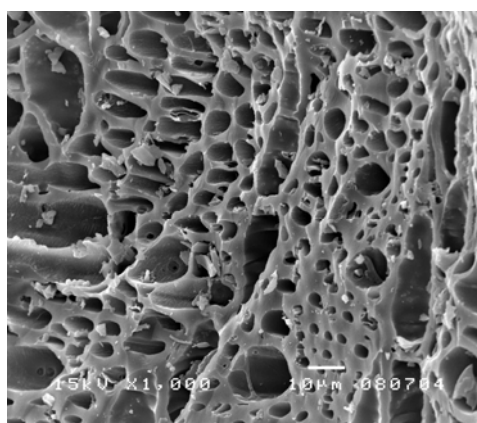
กัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ มีค่า 0.284 มิลลิลิตรต่อกรัม และ 13.58 อังสตรอม ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และไฮเดียมคลอไรด์ มีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป

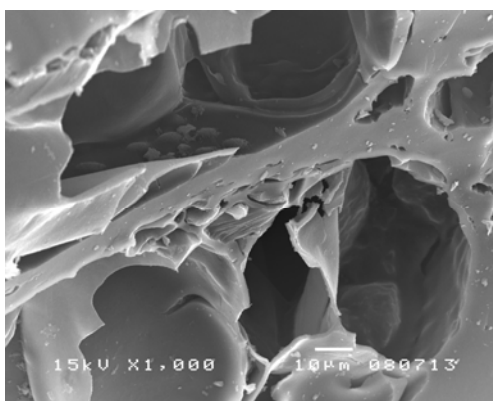
ผลจากการถ่ายภาพพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ทำให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้อย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.5 ลักษณะดังกล่าวจะมีความสอดคล้องกับการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ยจากการทดลองข้างต้นอย่างชัดเจน



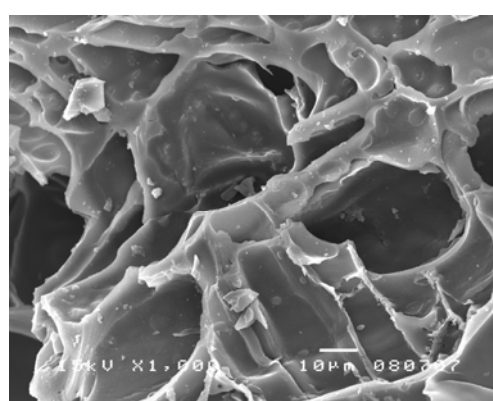
(1) ถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่ยังไม่ได้กระตุ้น  
สำหรับกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์



(3) ถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่ยังไม่ได้กระตุ้น  
สำหรับกระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์



(2) ถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ 1:2



(4) ถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์ 1:2

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

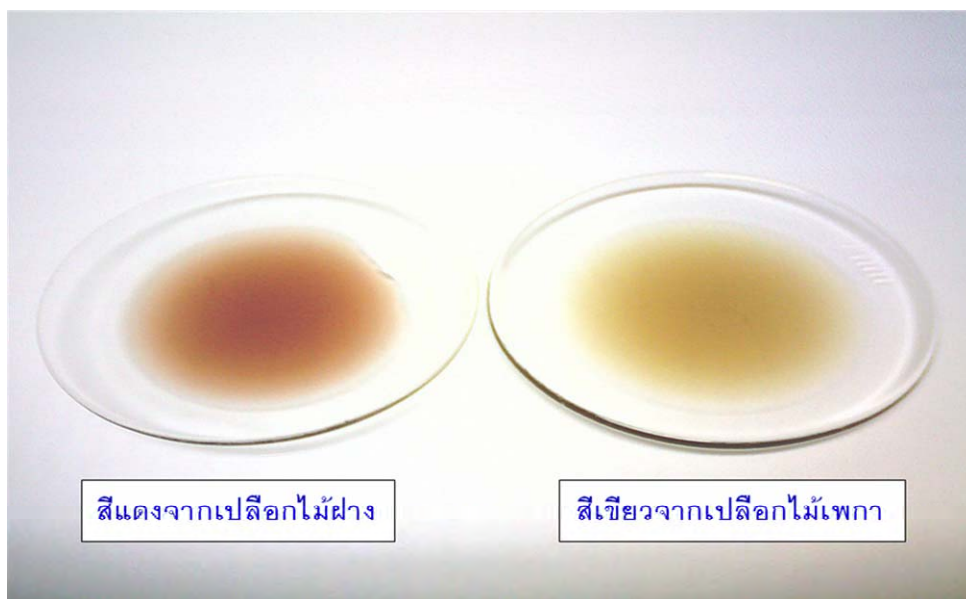


#### 4.4 การวัดสี

เนื่องจากพีเอชส่งผลต่อค่าสีที่วัดได้ กล่าวคือตาม Standard Methods แนะนำให้ปรับค่าพีเอชเป็น 7.6 ก่อนการวัดทุกครั้ง เพราะเหตุว่าพีเอชจะทำให้ลักษณะทางกายภาพของสีขุ่นมัวเปลี่ยนแปลง ซึ่งหมายความว่า แม้ค่าสีที่วัดออกมาได้ในรูปแอมซอบแบนท์เท่ากันก็ตาม แต่การวัดกระทำในสภาวะที่พีเอชต่างกัน ก็ไม่สามารถตีความว่าปริมาณสีหรือมวลสีขุ่นที่วัดออกมาจะเท่ากัน แต่ในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะเรื่องการจัดสีในน้ำเสีย ปกติที่ผ่านมาสนใจเฉพาะสีที่ปรากฏแก่สายตาหรือความรู้สึก การที่น้ำเสียถูกปรับพีเอชให้แตกต่างกันไปแล้วอ่านค่าสีในรูปค่าแอมซอบแบนท์ในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับโทนสีนั้นๆ ค่าที่อ่านได้ก็เปลี่ยนแปลงไปตามพีเอชนั้นด้วย ทำให้สามารถตีค่าแอมซอบแบนท์ในกรณีวัดแบบนี้ (โทนสีโดด) เป็นค่าที่เลียนแบบการเห็นของสายตามนุษย์สำหรับน้ำที่มีโทนสีโดดที่ไม่เปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งวิธีวัดสีแบบนี้บอกลักษณะความน่ารังเกียจของน้ำเสียได้เฉพาะความเข้มสีของแต่ละโทนสีโดดๆ เท่านั้น แต่ไม่สามารถวัดออกมาในรูปความเข้มข้นโดยมวลได้ ดังนั้น ในการหาประสิทธิภาพการกำจัดสีซึ่งแต่เดิมตั้งใจวัดออกมาในรูปมวลของสีขุ่นที่ถูกกำจัดไปจริงๆ มิใช่เพียงภาพที่ปรากฏแก่สายตา เพราะการแปลงค่ามวลสีขุ่นที่ถูกกำจัดไปจากค่าแอมซอบแบนท์ให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้เนื่องจากพีเอช ดังนั้นวิธีวัดสีสำหรับการหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีขุ่นในน้ำเสียของการทดลองนี้ จึงเป็นวิธีวัดสีในรูปของการดูกลิ่นแสงหรือค่าแอมซอบแบนท์ เป็นวิธีวัดสีที่เลียนแบบการเห็นของมนุษย์ ที่จะพบเห็นจริงในน้ำทิ้งหรือแหล่งรองรับน้ำทิ้งนั้น โดยใช้แนวคิดไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชมาใช้อ้างอิงหรืออธิบายการดูดติดสีที่เกิดขึ้น

#### 4.5 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ มาศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดสีน้ำเสียจากสีขุ่นธรรมชาติ ได้แก่ ค่าพีเอช เวลาสัมผัส และไอโซเทอมการดูดติดผิว โดยการทดลองแบบแบทช์ (Batch Test) ซึ่งนำเสียจากสีขุ่นธรรมชาติ (สีเขียวจากเปลือกเพกา และสีแดงจากเปลือกฝาง) ที่ใช้ในการทดลองได้จากกลุ่มหัตถกรรมและสิ่งทอบ้านทุ่งสุน อำเภอทุ่งช้าง จังหวัดน่าน ลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.6 มีความเข้มสีและพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะของสีย้อมธรรมชาติที่นำมาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติที่ใช้ในการวิจัย

สี	พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้	หน่วย
เขียวจากเพกา	แอมซอบแบนท์	0.326	-
	อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
	พีเอช	8.42	-
	บีโอดี	430	มิลลิกรัมต่อลิตร
	หมู่ฟังก์ชันนัล	ภาคผนวก ข	-
แดงจากฝาง	แอมซอบแบนท์	0.418	-
	อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
	พีเอช	8.04	-
	บีโอดี	418	มิลลิกรัมต่อลิตร
	หมู่ฟังก์ชันนัล	ภาคผนวก ข	-

#### 4.5.1 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสีน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ

การศึกษาถึงอิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดติดผิว จะแบ่งน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติออกเป็นสองชุด ทำการปรับพีเอช (ด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ สารละลายกรดไนตริก) ตั้งแต่ 5 ถึง 13 ของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติทั้งสองชุดเหมือนกัน ชุดแรกจะนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการปรับพีเอช ส่วนชุดที่สองจะเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 1.0 กรัม และนำไปเขย่าที่ความเร็วและเวลาเดียวกัน เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าพีเอชต่างๆ ของน้ำเสียสีย้อมสีเขียวจากเพกา และสีแดงจากฝาง แสดงตามตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 ดังนี้

ตารางที่ 4.7 พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมธรรมชาติ (สีเขียวจากเปลือกไม้เพกา)

ครั้งที่	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเขย่า	แอมซอบแบนท์ก่อนบำบัด ( $A_i$ )	แอมซอบแบนท์ที่เหลือหลังนำไปเขย่า ( $A_0$ )	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)	หมายเหตุ
1	5	5.85	0.326	0.324	0.61	
2	7	7.63	0.326	0.323	0.92	
3	9	9.82	0.326	0.324	0.61	
4	11	11.24	0.326	0.318	2.45	
5	13	13.45	0.326	0.319	2.15	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ 4.8 พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมธรรมชาติ (สีแดงจากเปลือกไม้ฝาง)

ครั้งที่	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลัง เขย่า	แอมซอบแบนท์ ก่อนบำบัด ( $A_t$ )	แอมซอบแบนท์ที่ เหลือหลังนำไป เขย่า ( $A_0$ )	เปอร์เซ็นต์ลด ค่าแอมซอบ แบนท์ (%)	หมายเหตุ
1	5	5.73	0.418	0.416	0.48	
2	7	7.64	0.418	0.417	0.24	
3	9	9.25	0.418	0.417	0.24	
4	11	11.43	0.418	0.413	1.20	
5	13	13.39	0.418	0.414	0.96	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

จากตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการกำจัดสีย้อมธรรมชาติของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ (สีเขียวจากเพกาและสีแดงจากฝางตามลำดับ) ที่ค่าพีเอชต่างๆ ซึ่งวัดออกมาในรูปเปอร์เซ็นต์การลดค่าแอมซอบแบนท์ ผลที่ได้แสดงเปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์มากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 11 เท่ากัน คือ 2.45 และ 1.20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสีเขียวจากเปลือกเพกาและสีแดงจากเปลือกไม้ฝางตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมธรรมชาติ (สีเขียวจากเปลือกไม้เพกา) จากการเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ปริมาณ 1.0 กรัมต่อ 100 ลิตร

ครั้งที่	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเขย่า	แอมซอบแบนท์ ก่อนบำบัด ( $A_t$ )	แอมซอบแบนท์ที่ เหลือหลังนำไปเขย่า ( $A_0$ )	เปอร์เซ็นต์ลดค่า แอมซอบแบนท์ (%)	หมายเหตุ
1	5	5.94	0.326	0.212	34.97	
2	7	7.87	0.326	0.215	34.05	
3	9	9.58	0.326	0.213	34.66	
4	11	11.23	0.326	0.194	40.49	
5	13	13.02	0.326	0.206	36.81	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ 4.10 พีเอชและเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมธรรมชาติ (สีแดงจากเปลือกไม้ฝาง) จากการเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ปริมาณ 1.0 กรัมต่อ 100 ลิตร

ครั้งที่	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเขย่า	แอมซอบแบนท์ก่อนบำบัด (A <sub>p</sub> )	แอมซอบแบนท์ที่เหลือหลังนำไปเขย่า	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์	หมายเหตุ
1	5	6.21	0.418	0.321	23.21	
2	7	7.93	0.418	0.319	23.68	
3	9	9.75	0.418	0.319	23.68	
4	11	11.44	0.418	0.294	29.67	
5	13	13.03	0.418	0.306	26.79	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

การทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส จากสภาวะการเตรียมที่เหมาะสม แสดงเปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์สูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 11 เช่นเดียวกัน คือ 40.49 และ 29.67 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสีเขียวจากเปลือกเพกาและสีแดงจากเปลือกไม้ฝางตามลำดับ

#### 4.5.2 ผลของเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสีน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ

การศึกษาถึงอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดติดผิว จะแบ่งน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติออกเป็นสองชุด ทำการปรับพีเอชของน้ำเสียจากสีย้อมทั้งสองชุดเหมือนกันให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 11 ชุดแรกจะนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 และ 240 นาที โดยชุดแรกไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ ส่วนชุดที่สองจะเติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 1.0 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วและเวลาเดียวกัน เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

ผลการทดลองในชุดแรกการวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติเริ่มต้น และค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียหลังการตกตะกอนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักจึงไม่ขอนำข้อมูลมาแสดง แต่ที่สนใจคือผลการทดลองในชุดที่สอง ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เวลาต่างๆ กันของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แสดงตามตารางที่ 4.11 และ 4.12 ดังนี้

ตารางที่ 4.11 ผลของเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสีย้อมสีเขียวจากไม้เพกา ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสปริมาณ 1.0 กรัมต่อ 100 ลิตร

ครั้งที่	พีเอชเริ่มต้น	เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชหลังตกตะกอน	ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัด ( $A_1$ )	ค่าแอมซอบแบนท์ที่เหลือหลังนำไปเขย่า ( $A_0$ )	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)	หมายเหตุ
1	11	0	11.03	0.326	0.325	0.31	
2	11	5	11.54	0.326	0.233	28.53	
3	11	10	11.53	0.326	0.232	28.83	
4	11	15	11.56	0.326	0.231	29.14	
5	11	30	11.56	0.326	0.231	29.14	
6	11	60	11.55	0.326	0.230	29.45	
7	11	90	11.54	0.326	0.218	33.13	
8	11	120	11.55	0.326	0.232	28.83	
9	11	240	11.57	0.326	0.233	28.53	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ 4.12 ผลของเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสีย้อมสีแดงจากไม้ฝาง ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ 1.0 กรัมต่อ 100 ลิตร

ครั้งที่	พีเอชเริ่มต้น	เวลาสัมผัส (นาที)	พีเอชหลังตกตะกอน	ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัด ( $A_1$ )	ค่าแอมซอบแบนท์ที่เหลือหลังนำไปเขย่า ( $A_0$ )	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)	หมายเหตุ
1	11	0	10.94	0.418	0.417	0.24	
2	11	5	9.62	0.418	0.315	24.64	
3	11	10	9.53	0.418	0.313	25.12	
4	11	15	9.47	0.418	0.313	25.12	
5	11	30	9.38	0.418	0.312	25.36	
6	11	60	9.35	0.418	0.310	25.84	
7	11	90	9.34	0.418	0.285	31.82	
8	11	120	9.34	0.418	0.298	28.71	
9	11	240	9.31	0.418	0.297	28.95	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเวลาสัมผัสที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เทียบจากเปอร์เซ็นต์ลดค่าแอบซอร์บแนนท์ที่ดีที่สุด ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้ในสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองขั้นต้นมีค่าเท่ากับ 90 นาที เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอบซอร์บแนนท์ 33.1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา และ 90 นาที เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอบซอร์บแนนท์ 31.8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง

#### 4.5.3 ผลการทดสอบการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

การศึกษาการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสปริมาณต่างๆ กัน คือ 0.00, 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00, 2.00 และ 5.00 กรัม มากำจัดสีน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ ที่ผ่านการปรับค่าพีเอชเท่ากับ 11 และนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณเพื่อสร้างกราฟไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

การเลือกใช้ฟรุนดลิชไอโซเทอม สำหรับอธิบายความสามารถในการกำจัดสีย้อมธรรมชาติของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ด้วยเหตุผลและข้อสมมติฐานที่ว่า บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous) และมีความสามารถในการดูดติดผิวแตกต่างกันไปของบริเวณต่างๆ บนพื้นผิวเดียวกัน โดยพิจารณาผลต่างระหว่างค่าแอบซอร์บแนนท์ก่อนและหลังบำบัด

จาก Freundlich Isotherm

$$X/m = kC^{1/n}$$

หรือ  $\log X/m = \log k + 1/n \log C$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว (หน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม) แทนค่าแนวโน้มด้วยผลต่างระหว่างค่าแอบซอร์บแนนท์ก่อนและหลังบำบัด ( $A_1 - A_0$ )

$m$  = มวลถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

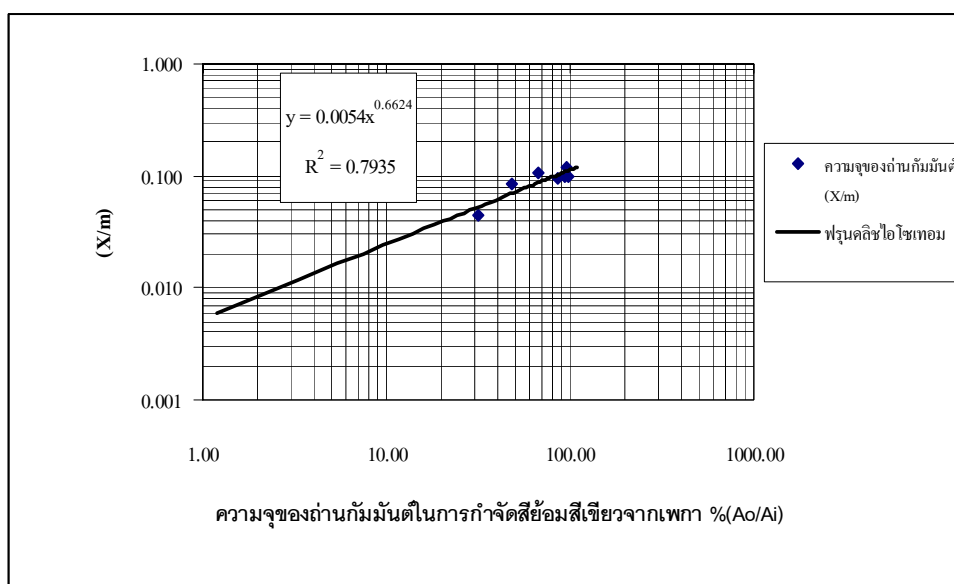
$C$  = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิว ในสารละลายที่ภาวะสมดุล (หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร) แทนค่าแนวโน้มด้วยค่าแอบซอร์บแนนท์หลังบำบัด/ก่อนบำบัด % ( $A_1/A_0$ )

$K,n$  = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

ตารางที่ 4.13 การทดสอบแนวโน้มไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน, m (กรัม)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเขย่า	ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัด ( $A_i$ )	ค่าแอมซอบแบบที่หลังเขย่า ( $A_o$ )	$X (A_i - A_o)$	$X/m$	$C (\%, A_o/A_i)$	หมายเหตุ
1	0.00	11	11.03	0.326	0.326	0.000	-	100.00	
2	0.05	11	11.47	0.326	0.321	0.005	0.100	98.47	
3	0.10	11	11.49	0.326	0.314	0.012	0.120	96.32	
4	0.20	11	11.48	0.326	0.306	0.020	0.100	93.87	
5	0.50	11	11.49	0.326	0.279	0.047	0.094	85.58	
6	1.00	11	11.49	0.326	0.220	0.106	0.106	67.48	
7	2.00	11	11.50	0.326	0.158	0.168	0.084	48.47	
8	5.00	11	11.50	0.326	0.102	0.224	0.045	31.29	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบบที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)



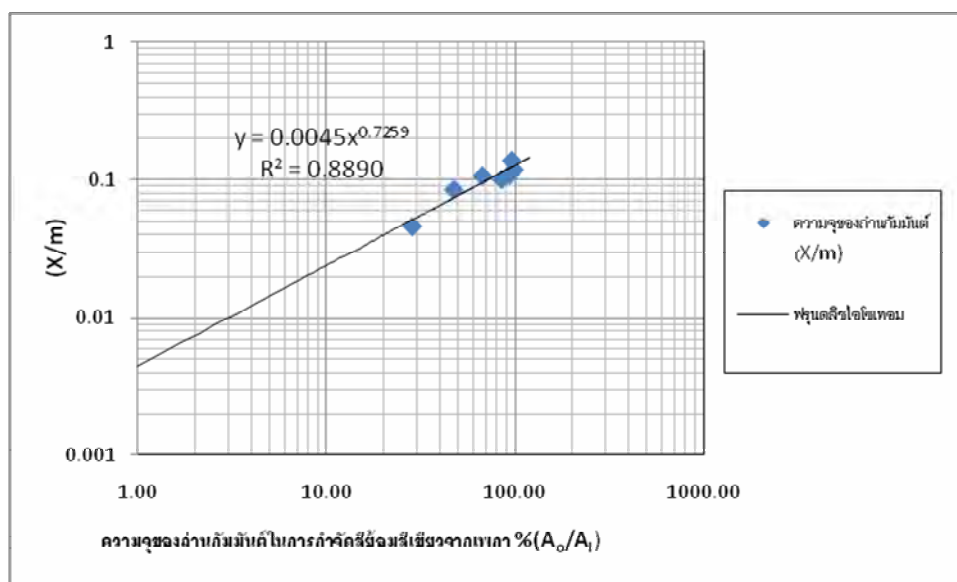
รูปที่ 4.7 แนวโน้มฟรอนดลิชไอโซเทอมการดูดติดผิวสีเขียวจากเปลือกไม้เพกา โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11



ตารางที่ 4.14 การทดสอบแนวโน้มไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชการดูดซับน้ำเสียสี่ย้อมสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน, m (กรัม)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเขย่า	ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัด (A <sub>i</sub> )	ค่าแอมซอบแบบที่หลังเขย่า (A <sub>o</sub> )	X (A <sub>i</sub> -A <sub>o</sub> )	X/m	C (%A <sub>o</sub> /A <sub>i</sub> )	หมายเหตุ
1	0.00	11	11.02	0.326	0.326	0.000	-	100.00	
2	0.05	11	11.52	0.326	0.320	0.006	0.120	98.16	
3	0.10	11	11.56	0.326	0.312	0.014	0.140	95.71	
4	0.20	11	11.55	0.326	0.304	0.022	0.110	93.25	
5	0.50	11	11.56	0.326	0.275	0.051	0.102	84.36	
6	1.00	11	11.56	0.326	0.218	0.108	0.108	66.87	
7	2.00	11	11.57	0.326	0.154	0.172	0.086	47.24	
8	5.00	11	11.59	0.326	0.093	0.233	0.047	28.53	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบบที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

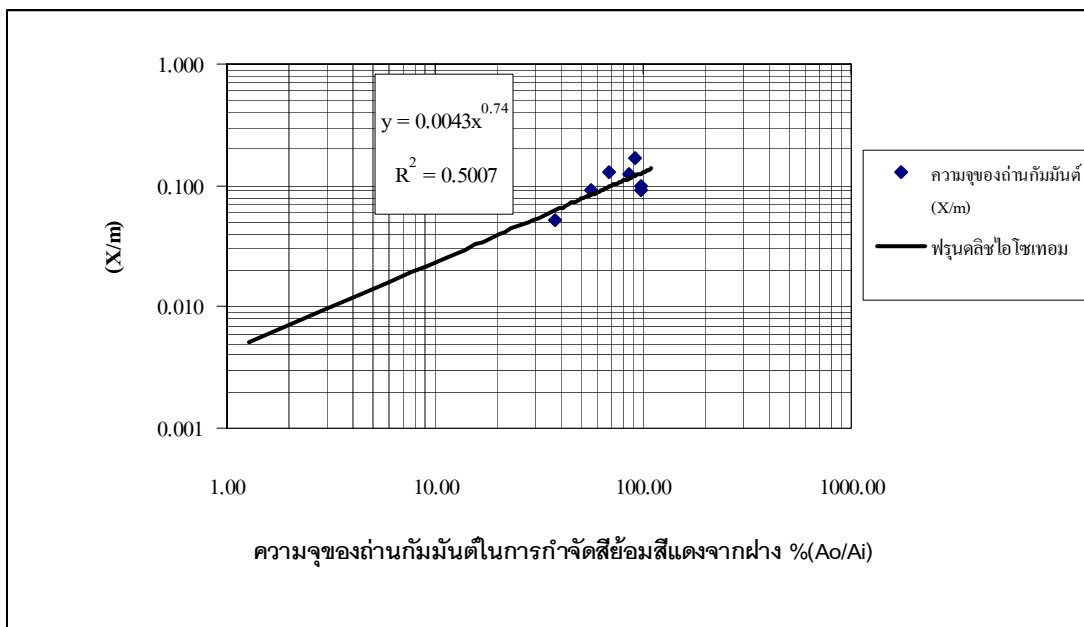


รูปที่ 4.8 แนวโน้มฟรอนดลิชไอโซเทอมการดูดซับสีเขียวจากเปลือกไม้เพกา โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11

ตารางที่ 4.15 การทดสอบแนวโน้มไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชการดูดซับน้ำเสียสีแดงจากฝาง ของ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน, m (กรัม)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเขย่า	ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัด (A <sub>i</sub> )	ค่าแอมซอบแบบที่หลังเขย่า (A <sub>o</sub> )	X (A <sub>i</sub> -A <sub>o</sub> )	X/m	C (%A <sub>o</sub> /A <sub>i</sub> )	หมายเหตุ
1	0.00	11	11.03	0.418	0.418	0.000	-	100.00	
2	0.05	11	11.63	0.418	0.413	0.005	0.100	98.80	
3	0.10	11	11.64	0.418	0.409	0.009	0.090	97.85	
4	0.20	11	11.64	0.418	0.385	0.033	0.165	92.11	
5	0.50	11	11.68	0.418	0.356	0.062	0.124	85.17	
6	1.00	11	11.71	0.418	0.287	0.131	0.131	68.66	
7	2.00	11	11.71	0.418	0.236	0.182	0.091	56.46	
8	5.00	11	11.72	0.418	0.159	0.259	0.052	38.04	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบบที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

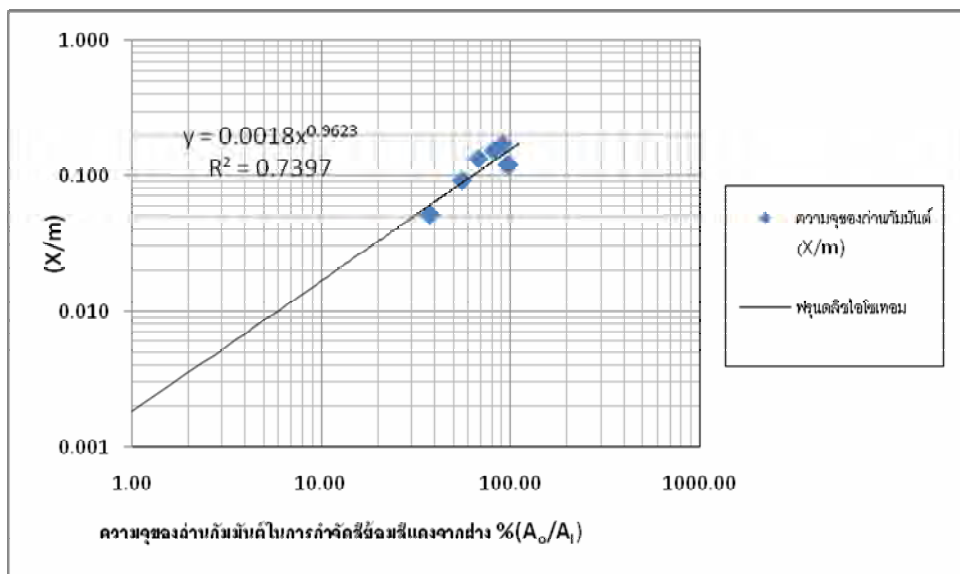


รูปที่ 4.9 แนวโน้มฟรอนดลิชไอโซเทอม การดูดติดิวสีแดงจากเปลือกไม้ฝาง โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11

ตารางที่ 4.16 การทดสอบแนวโน้มไอโซเทอมแบบฟรอนดลิชการดูดซับน้ำเสียสีแดงจากฝาง ของ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน, m (กรัม)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังเขย่า	ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัด (A <sub>i</sub> )	ค่าแอมซอบแบบที่หลังเขย่า (A <sub>o</sub> )	X (A <sub>i</sub> -A <sub>o</sub> )	X/m	C (% A <sub>o</sub> /A <sub>i</sub> )	หมายเหตุ
1	0.00	11	11.03	0.418	0.418	0.000	-	100.00	
2	0.05	11	11.64	0.418	0.412	0.006	0.120	98.56	
3	0.10	11	11.65	0.418	0.406	0.012	0.120	97.13	
4	0.20	11	11.63	0.418	0.384	0.034	0.170	91.87	
5	0.50	11	11.72	0.418	0.354	0.064	0.128	84.69	
6	1.00	11	11.73	0.418	0.285	0.133	0.133	68.18	
7	2.00	11	11.73	0.418	0.234	0.184	0.092	55.98	
8	5.00	11	11.74	0.418	0.158	0.260	0.052	37.80	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบบที่ก่อนบำบัดเป็นค่าแอมซอบแบบที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)



รูปที่ 4.10 แนวโน้มฟรอนดลิชไอโซเทอม การดูดติดสีอมสีแดงจากเปลือกไม้ฝาง โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ที่พีเอชเท่ากับ 11

จากกราฟข้างต้น แสดงการหาไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์สำหรับกำจัดสี ในน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ ที่พีเอช 11 ด้วยฟรอนดลิชไอโซเทอม จะได้สมการการดูดติดสีแยกเป็นชนิดน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ

#### 4.5.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

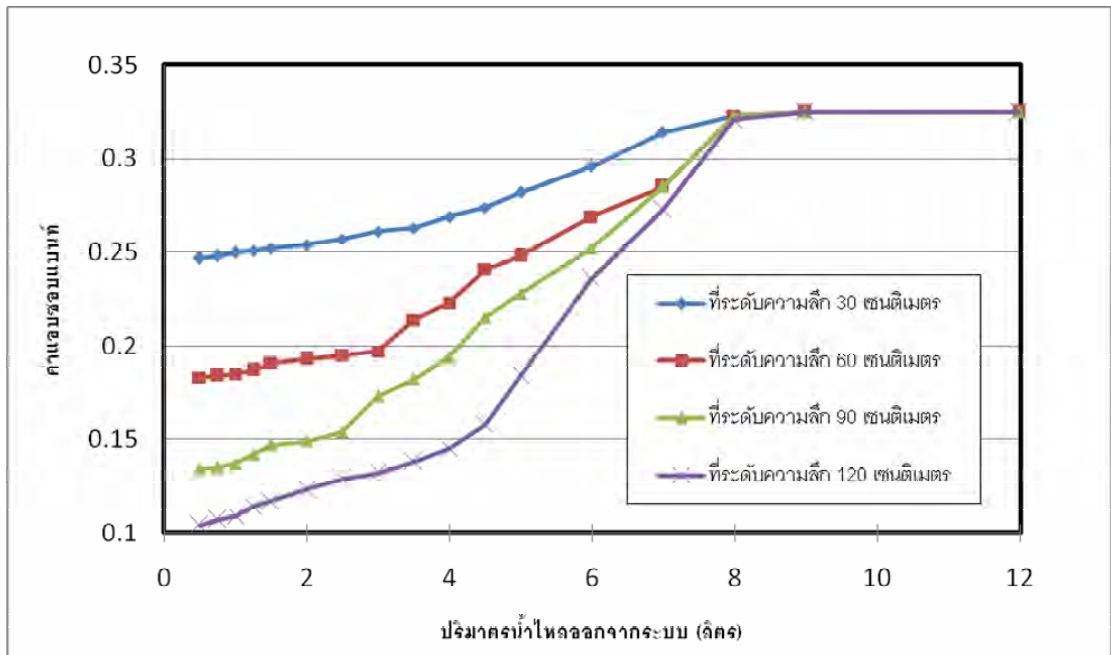
การศึกษาศักยภาพในการใช้งานของถ่านกัมมันต์ โดยนำถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมได้จากสภาวะที่เหมาะสมขนาด 8 ถึง 36 เมช (0.59 ถึง 2.36 มิลลิเมตร) บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Column Test) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร เจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากสี่ย้อมธรรมชาติ น้ำหนักและปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์แสดงตามตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 น้ำหนักและปริมาตรของถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสในถังดูดติดผิวแบบแบ่ง

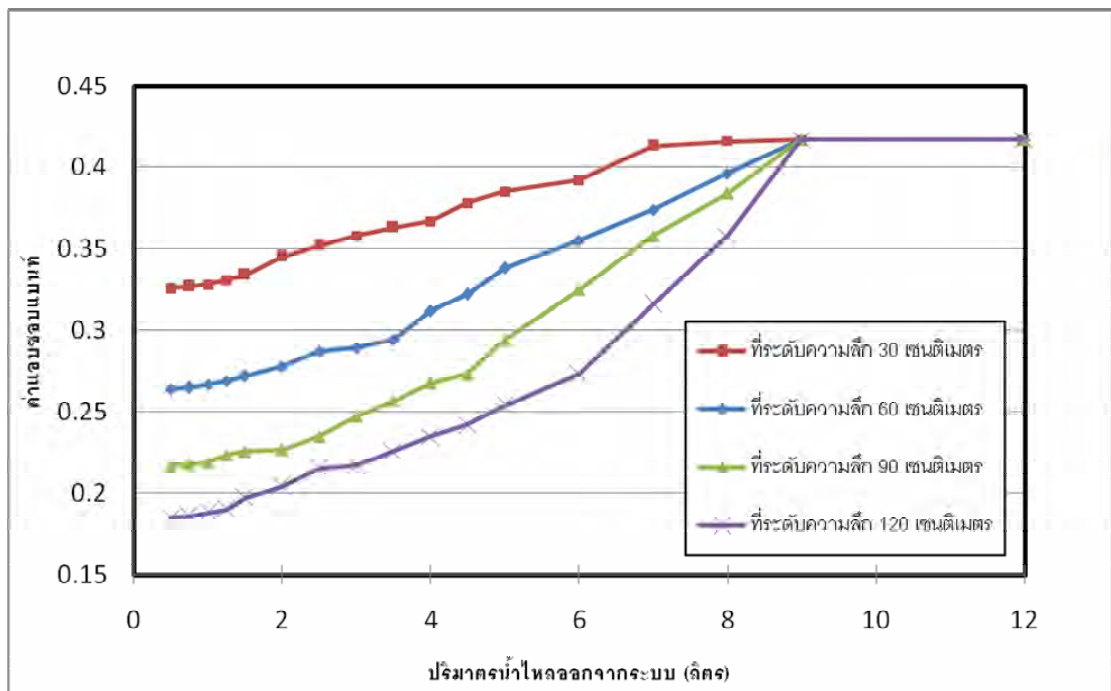
ความลึกของชั้นถ่าน (เซนติเมตร)	ปริมาตรของชั้นถ่าน (ลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)
30	0.1246	51.25
60	0.2492	102.50
90	0.3737	153.75
120	0.4983	205.00

สูบน้ำสะอาดผ่านถังดูดติดผิวเพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลาหนึ่งวัน จากนั้นสูบน้ำเสียจากสี่ย้อมธรรมชาติที่ผ่านการปรับพีเอชเท่ากับ 11 ทั้งสองชนิด (สีเขียวจากเพกาและสีแดงจากฝาง) เข้าสู่ถังพักด้านบน แล้วปล่อยน้ำเสียจากสี่ย้อมธรรมชาติเข้าสู่ถังดูดติดผิวแบบแบ่ง โดยควบคุมอัตราการไหลทางชลศาสตร์ เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง หมุนเวียนอย่างต่อเนื่อง

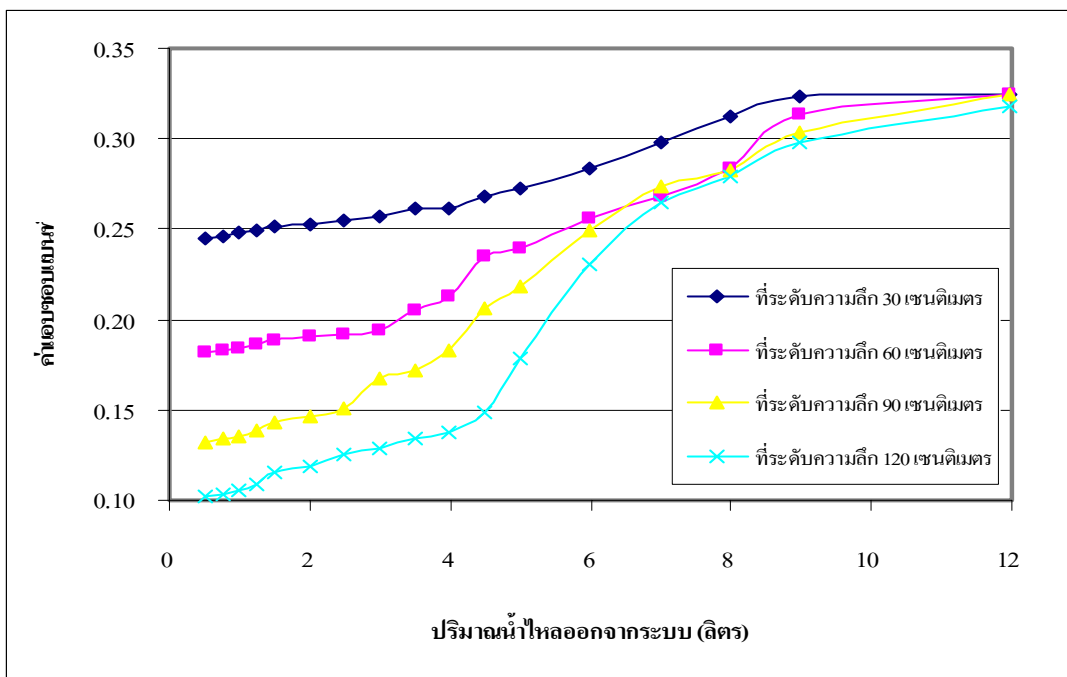
เก็บตัวอย่างของน้ำเสียจากสี่ย้อมธรรมชาติที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากับ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร จนกว่าค่าการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียที่เข้าถังดูดติดผิวแบบแบ่ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ภาคผนวก ข สำหรับน้ำเสียสี่ย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา และน้ำเสียสี่ย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง



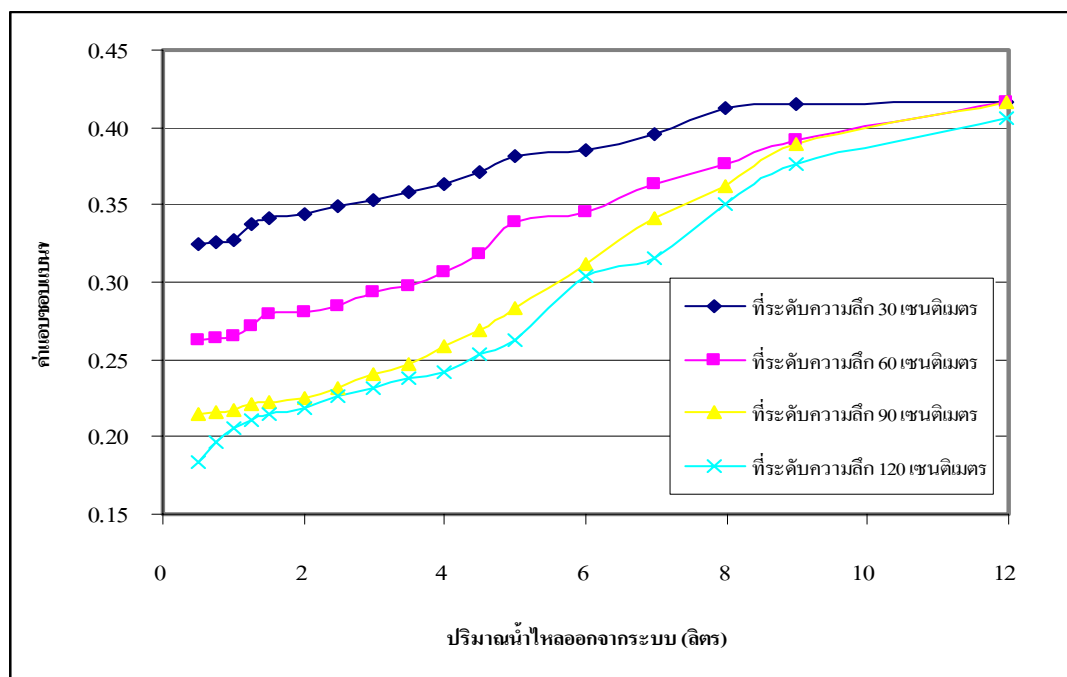
รูปที่ 4.11 ระบบดูดติดผิวสี จากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกาแบบไหลต่อเนื่องของถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.12 ระบบดูดติดผิวสี จากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง แบบไหลต่อเนื่องของถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.13 ระบบดูดติดผิวสี จากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกาแบบไหลต่อเนื่องของถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.14 ระบบดูดติดผิวสี จากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง แบบไหลต่อเนื่องของถ่านกัมมันต์ จากไม้ยูคาลิปตัสที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

จากตารางและกราฟข้างต้น จุดเริ่มหมดสภาพสำหรับการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกาเมื่อบำบัดน้ำเสียที่ปริมาตรของน้ำไหลออก 4 ลิตร ส่วนการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากเพกาเกิดขึ้นเมื่อบำบัดน้ำเสีย ที่ปริมาตรของน้ำไหลออก 6 ลิตร

จุดหมดสภาพ (Breakthrough Point) สำหรับการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา เมื่อบำบัดน้ำเสียที่ปริมาตรน้ำไหลออก 8 ลิตร ส่วนการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากเพกาเกิดขึ้นเมื่อบำบัดน้ำเสีย ที่ปริมาตรของน้ำไหลออก 8 ลิตร เช่นเดียวกัน

ระยะเวลานับจากเริ่มต้นการดูดติดผิวจนถึงจุดเริ่มหมดสภาพ (Breakpoint Time) สำหรับการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา เท่ากับ 18 ชั่วโมง ส่วนการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากเพกา เท่ากับ 24 ชั่วโมง

การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มข้นและปริมาตรของถ่านในคอลัมน์ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร เพื่อนำไปสร้างกราฟนั้น สามารถคำนวณปริมาตรเบท (Bed Volume, BV) โดยใช้สมการ

$$\text{ปริมาตรเบท (BV)} = \frac{\text{ปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านการบำบัด}}{\text{ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์}}$$

$$\text{เมื่อปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์} = \pi r^2 h / 1000 \quad \text{ลิตร}$$

$$\text{โดยที่} \quad r = \text{รัศมีของคอลัมน์ (เซนติเมตร)}$$

$$h = \text{ความสูงของชั้นถ่านในคอลัมน์ (เซนติเมตร)}$$

ค่าปริมาตรเบท (Bed Volume, BV) แสดงตามภาคผนวก ข

#### 4.5.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติ

การศึกษาศักยภาพในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ จะทำการศึกษาเฉพาะถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมเท่านั้น โดยนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ปริมาณ 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 กรัม มากำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา และสีแดงจากฝางที่ปรับพีเอชเท่ากับ 11 นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็น

เวลา 90 นาที แล้วแยกถ่านกัมมันต์ออกด้วยการกรอง ล้างด้วยกรดไฮดรอลิกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วล้างตามด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง นำไปอบให้แห้งแล้วนำมากำจัดสียจากสีย้อมธรรมชาติอีกครั้ง ผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.18 และตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดสียจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา หลังฟื้นฟูสภาพและประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลัง เขย่า	ค่าแอมซอบแบนท์ เริ่มต้น	ค่าแอมซอบ แบนท์หลังเขย่า	เปอร์เซ็นต์การฟื้นฟูสภาพ	
						เปอร์เซ็นต์	เฉลี่ย เปอร์เซ็นต์
เริ่มต้น	0.5	11	11.54	0.326	0.275	-	-
	1.0	11	11.56	0.326	0.218	-	
	2.0	11	11.57	0.326	0.154	-	
	5.0	11	11.59	0.326	0.093	-	
1	0.5	11	11.48	0.326	0.281	88.24	89.64
	1.0	11	11.49	0.326	0.229	89.81	
	2.0	11	11.52	0.326	0.172	89.53	
	5.0	11	11.54	0.326	0.114	90.99	
2	0.5	11	11.43	0.326	0.290	70.59	72.20
	1.0	11	11.45	0.326	0.249	71.3	
	2.0	11	11.48	0.326	0.204	70.93	
	5.0	11	11.51	0.326	0.149	75.97	
3	0.5	11	11.38	0.326	0.301	49.02	49.33
	1.0	11	11.42	0.326	0.273	49.07	
	2.0	11	11.46	0.326	0.241	49.42	
	5.0	11	11.48	0.326	0.210	49.79	

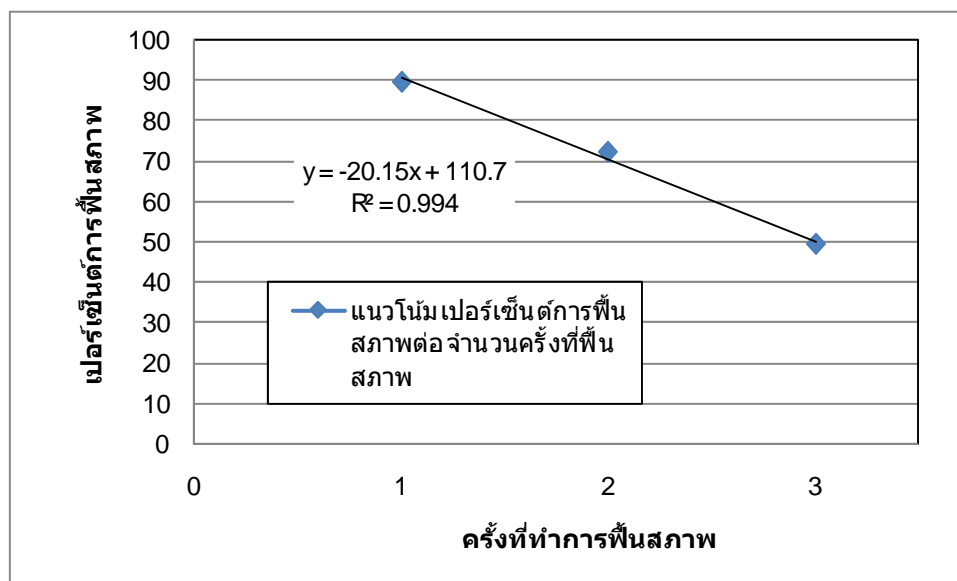
หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เริ่มต้นเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)



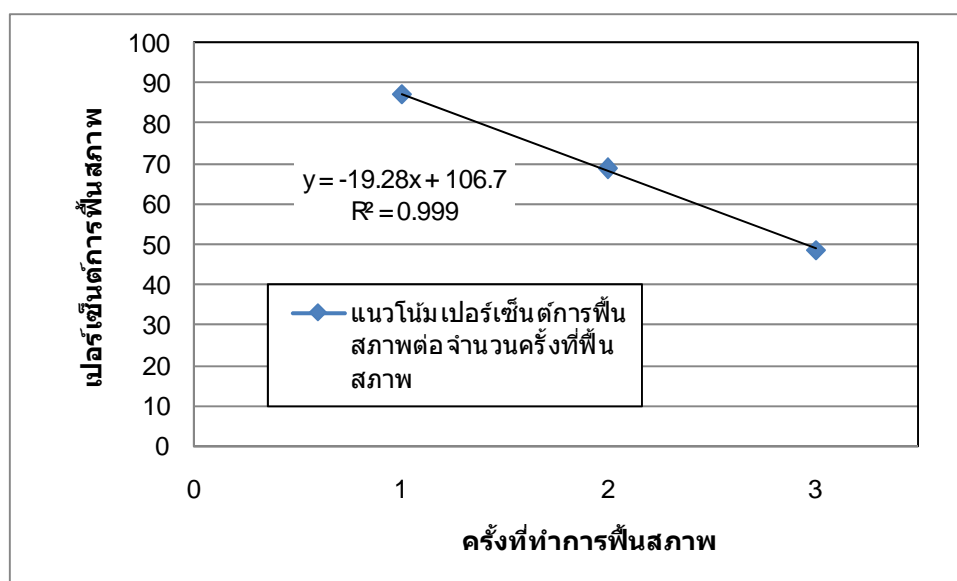
ตารางที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง หลังฟื้นฟูสภาพและประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลัง เขย่า	ค่าแอมซอบแบนท์ เริ่มต้น	ค่าแอมซอบ แบนท์หลังเขย่า	เปอร์เซ็นต์การฟื้นฟูสภาพ	
						เปอร์เซ็นต์	เฉลี่ย เปอร์เซ็นต์
เริ่มต้น	0.5	11	11.72	0.418	0.354	-	-
	1.0	11	11.72	0.418	0.285	-	
	2.0	11	11.73	0.418	0.234	-	
	5.0	11	11.74	0.418	0.158	-	
1	0.5	11	11.68	0.418	0.362	87.50	87.20
	1.0	11	11.68	0.418	0.297	90.98	
	2.0	11	11.69	0.418	0.261	85.33	
	5.0	11	11.71	0.418	0.197	85.00	
2	0.5	11	11.65	0.418	0.374	68.75	68.69
	1.0	11	11.66	0.418	0.325	69.92	
	2.0	11	11.66	0.418	0.295	66.85	
	5.0	11	11.68	0.418	0.238	69.23	
3	0.5	11	11.54	0.418	0.386	50.00	48.63
	1.0	11	11.57	0.418	0.356	46.62	
	2.0	11	11.58	0.418	0.332	46.74	
	5.0	11	11.61	0.418	0.285	51.15	

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เริ่มต้นเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)



รูปที่ 4.15 แนวโน้มของประสิทธิภาพในการพื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จากการดูดติดสีจากสีย้อมธรรมชาติ สีเขียวจากเพกา



รูปที่ 4.16 แนวโน้มของประสิทธิภาพในการพื้นสภาพถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จากการดูดติดสีจากสีย้อมธรรมชาติ สีแดงจากฝาง

เมื่อนำประสิทธิภาพในการพื้นสภาพของถ่านกัมมันต์เฉลี่ยมาพิจารณาถึงจำนวนครั้งที่ จะทำการพื้นสภาพได้ โดยเขียนเส้นแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การพื้นสภาพของถ่านกัมมันต์ กับ น้ำเสียทั้งสองชนิด พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา สามารถ

คำนวณสมการเส้นตรงได้  $Y = -20.15X + 110.7$  ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.994 เมื่อแทนค่า  $Y = 0$  ก็จะได้จำนวนครั้งที่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้เท่ากับ 5 ครั้ง ถึงจุดนี้ถ่านกัมมันต์จะหมดประสิทธิภาพ

ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง สามารถคำนวณสมการเส้นตรงได้  $Y = -19.28X + 106.7$  ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.999 เมื่อแทนค่า  $Y = 0$  ก็จะได้จำนวนครั้งที่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้เท่ากับ 5 ครั้ง ถึงจุดนี้ถ่านกัมมันต์จะหมดประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองดังแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองสำหรับงานวิจัยการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ถ่านไม้ยูคาลิปตัส คือการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเผา 30 นาที ให้ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 37.88 ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 95.407

ถ่านกัมมันต์จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 625 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 405 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรง 0.284 มิลลิลิตรต่อกรัม และขนาดโพรงเฉลี่ย 13.58 อังสตรอม ที่การกระตุ้นด้วยอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 1:2 เฉากกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในขณะที่เดียวกันถ่านกัมมันต์จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 754 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 453 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรง 0.315 มิลลิลิตรต่อกรัม และขนาดโพรงเฉลี่ย 13.92 อังสตรอมที่การกระตุ้นด้วยอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 1:2 เฉากกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน

##### 5.1.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

- 1) ค่าการกำจัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติ ที่ค่าพีเอช 5, 7, 9, 11 และ 13 วัดออกมาในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ลดค่าแอบซอเบแนนท์ ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักแสดงว่าค่าพีเอชไม่ค่อยมีผลมากนักสำหรับการกำจัดสีภายใต้เงื่อนไขของการทดลอง แต่จะเลือกปรับค่าพีเอชในขั้นตอนต่อไปที่ค่าพีเอชเท่ากับ 11 ซึ่งทำให้เปอร์เซ็นต์การลดค่าแอบซอเบแนนท์มากที่สุดที่ 2.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา และ มีค่าเท่ากับ 1.20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง
- 2) เวลาสัมผัสที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีของถ่านกัมมันต์ วัดออกมาในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ลดค่าแอบซอเบแนนท์ ที่พีเอชของสีย้อมธรรมชาติเท่ากับ

11 ที่เวลาสัมผัส 90 นาที ลดเปอร์เซ็นต์แอบชอบแบนที่ได้ 33.1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดติดสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา และที่ระยะเวลา 90 นาทีเช่นเดียวกัน สามารถลดเปอร์เซ็นต์แอบชอบแบนที่ได้ 31.82 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดติดสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง

### 5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ (Column Test)

จุดเริ่มหมดสภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ที่ปริมาตรน้ำไหลออกจากระบบ 4 ลิตร

จุดเริ่มหมดสภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดติดสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง ที่ปริมาตรน้ำไหลออกจากระบบ 6 ลิตร

ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับความสูง 120 เซนติเมตร ป้อนน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11 ด้วยอัตราบรรจุทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่า

- 1) น้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา มีประสิทธิภาพการกำจัดสีที่จุดยุติ (เนื่องจากมาตรฐานน้ำทิ้งไม่ได้กำหนดความเข้มสี ทำให้ไม่สามารถกำหนดจุดยุติได้) จะมีระยะเวลาการใช้งานที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร เท่ากับ 28, 32, 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อคำนวณเป็นปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านจะได้เท่ากับ 6.99, 7.99, 8.99 และ 11.98 ลิตร หรือเท่ากับ 56.09, 32.05, 24.05 และ 24.04 ปริมาตรเบด (BV) ตามลำดับ
- 2) น้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง มีประสิทธิภาพการกำจัดสีที่จุดยุติ (เนื่องจากมาตรฐานน้ำทิ้งไม่ได้กำหนดความเข้มสี ทำให้ไม่สามารถกำหนดจุดยุติได้) จะมีระยะเวลาการใช้งานที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร เท่ากับ 28, 32, 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อคำนวณเป็นปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านจะได้เท่ากับ 6.99, 7.99, 8.99 และ 11.98 ลิตร

หรือเท่ากับ 56.09, 32.05, 24.05 และ 24.04 ปริมาตรเบด (BV)  
ตามลำดับ เช่นเดียวกัน

- 3) ประสิทธิภาพการดูดติดสีของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่  
ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการกระตุ้น  
ด้วยไซเดียมคลอไรด์

#### 5.1.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติ

จากผลการทดลองการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ไม่ควรเกิน 2 ครั้งเนื่องจาก  
ประสิทธิภาพการดูดติดสีจะลดลงเป็นอย่างมากเหลือร้อยละ 72.02 สำหรับการดูดติดสีเขียวจาก  
เพกา และร้อยละ 68.69 สำหรับการดูดติดสีแดงจากฝาง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยสารกระตุ้น หรือวิธีอื่นๆ  
เช่น การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก การกระตุ้นด้วยสารประกอบของโพตัสเซียม  
และการกระตุ้นโดยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน แล้วเปรียบเทียบต้นทุนและ  
ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เพื่อหาแนวทางในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มี  
ประสิทธิภาพมากที่สุด
- 2) ศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติเบื้องต้น ก่อนเข้าสู่ระบบดูดติด  
ผิวแบบแห้ง เช่น การทำให้ตกตะกอนโดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ หรือวิธีการบำบัด  
ทางชีววิทยาก่อนการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์เพื่อลดความเข้มข้นลงก่อนระดับ  
หนึ่ง
- 3) พิจารณาวิธีการวัดค่าสีประเภทอื่นที่สามารถทำได้ เช่น การเทียบสีมาตรฐานที่  
ยอมให้เป็นสีอ้างอิง หรือใช้เครื่องทินโทมิเตอร์วัดสี โดยใช้การผสมแม่สี 2 ใน 3 สี  
ร่วมกับการปรับแสงสว่างในการมอง
- 4) นำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานจริง เช่น การทำถังดูดติดสีสำเร็จรูปหรือ  
คาร์บอนฟิร์ลเตอร์ เพื่อกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำทิ้ง

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์.2542. วิศวกรรมประปา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ มิตรนราการพิมพ์.
- จักริน นักร.2549. การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดำรง ขุนมงคล และ อภิสัทธ์ เจริญกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น. วิศวกรรมสาร 43 (พฤศจิกายน - ธันวาคม 2533): 96-99.
- รวัชชัย สิงหศิริ.2548. การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) และไม้กระถินเทพา (*Acacia mangium* Willd.) เพื่อการกำจัดโครเมียม และนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์.2527.รายงานวิจัยขั้นสมบูรณ์ การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า เล่มที่ 4 การกำจัดสีน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโดยวิธี PACT. ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- บุญชัย ตระกูลมหชัย.2537. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พงศธร ใค้วคชาภรณ์.2538. ถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพชรพรรค ทศกร.2535.หน่วยปฏิบัติการทั่วไป.คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ.2547. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขี้เป้งของโรงงานน้ำตาลในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ต้นทุลเวศม์.2539.วิศวกรรมประปา เล่ม 2.พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานพ ตีระรัตนสมโภช.2545. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- มานัด แก้วถาวร.2537. ผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลลิตา นิตเสนจารุกุล.2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดซับผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สาขา วิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์.2543. การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. กระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิเชียร ตรงจิตรธรรม.2532. การคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินในฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุเจนีย์ คู่ยเสถียร.2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (มอก.900-2532). กระทรวงอุตสาหกรรม.



## ภาษาอังกฤษ

- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for: Determination of iodine number of activated carbon, D 4607 - 94. Annual book of ASTM standards Vol.15.01. Philadelphia: ASTM
- American Society for Testing and Materials. 1977. Standard test method for: Specific surface area of carbon or graphite, C 819 - 77. Annual book of ASTM standards. Philadelphia: ASTM
- Baker, F. S., Miller, C. E. and Repik, A. J. 1997. Activated Carbon. In D.M. Ruthven (ed.). Encyclopedia of Separation Technology. Volume 1. New York: John Wiley & Sons.
- Byrne, J. F. and Marsh, H. 1995. Introductory Overview. In Patrick, John W., Porosity in Carbons: Characterization and Application, 227-252. Great Britain: Edward Arnold.
- Cookson, J. T. Jr. 1978. Adsorption mechanisms: the chemistry of organic adsorption on activated carbon. In P. N. Cheremisinoff, and F. Ellerbusch (eds.). Carbon Adsorption Handbook. Michigan: Ann Arbor Science.
- Derbyshire, F., Jagtoyen, M. and Thwaites, M. 1995 Activated Carbons – Production and application. In Patrick, John W., Porosity in Carbons: Characterization and Application, 227-252. Great Britain: Edward Arnold.
- Faust, S. D. and Aly, O. M. 1987. Adsorption Process for Water Treatment. MA.: Butterworth Publishers.
- Gordon, P. F. and Gregory, P. 1983. Organic Chemistry in Color. New York: Springer Verlag, 1-5.
- Jankowska, H., Swiatkowski, A. and Choma, J. 1991. Active Carbon. Poland: Ellis Horwood Limited.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. and Namasivayam, C. 2001. Removal of heavy metals from industrial wastewater by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural soil waste. Bioresource Technology 76(1): 63 - 65
- Lewis, R. J. 1997. Hawley's Condensed Chemical Dictionary. 13<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.

- Mameri, N., Aiouèche, F., Belhocine, D., Grib, H. and Lounici, H. 2000. Preparation of Activated Carbon from Olive Mill Solid Residue. J. Chem. Tech. Biotechnol. 75: 625-631.
- Montgomery, J. M. 1985. Water treatment principles and design. New York: John Wiley and Sons.
- Myer, D. 1999. Surface, interface and colloids: principal and applications. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.
- Rengaraj, S., Arabindoo, B. and Murugesan, V. 1998. Activated Carbon from Rubber seed and Palm seed coats: Preparation and Characterization. Journal of Scientific & Industrial Research 57: 129-132.
- Roberson, S. M. 1973. Dyes from Plants. New York: Van Nostrand Reinhold, 24-26.
- Tam, M. S. and Michael Jerry Antal, Jr. 1999. Preparation of Activated Carbons from Macadamia Nutshell and Coconut Shell by Air Activation. Ind.Engchem.Res. 38: 4268-4276.
- Tsia, W. T., Chang, C. Y., Lin, M. C., Chien, S. F. and Hsieh, M. F. 2000. Adsorption of acid dye onto activated carbons prepared from agriculture waste bagasse by ZnCl<sub>2</sub> activation. Chemosphere 45: 51-58.
- Valencia, G. and Gloyna, E.F. 1972. On the synthesis of activated column data. Texas: Bureau of Engineering Research, 235.
- Available from: <http://www.ext.nodak.edu/extpubs/hzoqual/ae1029w.htm> [01/08/2006]
- Available from: <http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/wtprimer/carbon/sketcarb.html> [01/08/2006]
- Available from: <http://www.chemvironcarbon.com/carbon/definition/whatis.htm> [29/06/2006]
- Available from: <http://www.chemvironcarbon.com/carbon/tar.htm> [29/06/2006]
- Available from: <http://dic.moohin.com/c/cellulose.shtml> [29/08/2007]

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส

## วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติโดยประมาณ

วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติโดยประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส ตามวิธี ASTM D1762-84 โดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศ และคำนวณเพื่อรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) ยกเว้นค่าความชื้นที่รายงานเทียบน้ำหนักของสารที่แห้งในอากาศ (Air dry basis) วิธีวิเคราะห์ครอบคลุมการวิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า รายละเอียดการวิเคราะห์ มีดังต่อไปนี้

การเตรียมสารตัวอย่าง

- บดตัวอย่างอย่างรวดเร็วและคัดขนาดของตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาดเบอร์ 20 (No.20, 850 ไมครอน) โดยการบดต้องไม่ใช้เวลานานนัก เพราะจะทำให้มีความร้อนขึ้นทำให้มีการสูญเสียความชื้นและสารระเหยได้ นอกจากนั้นยังทำให้ตัวอย่างมีขนาดเล็กกลง ซึ่งถ้ามีขนาดเล็กมาก ๆ (น้อยกว่า 150 ไมครอน) จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ เนื่องจากอาจมีการสูญเสียไปจากถ้วยกระเบื้องในระหว่างการไล่สารละลาย

- นำตัวอย่างที่บดได้มาผสมรวมกันและเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

## 1. วิเคราะห์หาค่าความชื้น (Moisture, M)

- เเผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา จากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัมให้ละเอียดถึงเทคนิคตำแหน่งที่ 4 (มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ในถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ก่อนอบแห้ง ควบน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องและฝา (A)
- นำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้หลังอบแห้ง ควบน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (B)
- คำนวณค่าความชื้นดังนี้
- ความชื้น (Moisture) ร้อยละโดยน้ำหนัก (%) =  $[(A-B)/A] * 100$

## 2. วิธีหาปริมาณสารระเหย (Volatile Matter, VM)

- เผาเตาเผาไว้ที่ 950 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนกับถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาและตัวอย่างที่ใช้ในการหาความชื้นในขั้นตอนที่ 1 วางไว้หน้าเตาเผาเป็นเวลา 2 นาที (อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส) แล้วนำเข้าเตาเผาเป็นเวลา 6 นาที
- นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังอบเผา ลบน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (C)
- คำนวณค่าสารระเหยดังนี้
- สารระเหย (Volatile Matter) ร้อยละโดยน้ำหนัก (%) =  $[(B-C)/B] * 100$

## 3. ค่าเถ้า (Ash)

- ให้ความร้อนกับถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา และตัวอย่างที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังอบเผา ลบน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา (D)
- คำนวณค่าเถ้าดังนี้
- ค่าเถ้า (Ash) ร้อยละโดยน้ำหนัก (%) =  $[D/B] * 100$

## 3. ค่าถ่านคงตัว (Fixed Carbon, FC)

- คำนวณค่าถ่านคงตัวดังนี้
- ค่าถ่านคงตัว (Fixed Carbon, FC) ร้อยละโดยน้ำหนัก (%) =  $100 - A - VM - M$

**ภาคผนวก ข**  
**วิธีวิเคราะห์ค่าเถ้าของถ่านกัมมันต์**

วิธีวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ ตามวิธี ASTM D2866-94 โดยวิเคราะห์ และ รายงานค่าที่ได้เปรียบเทียบกับน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีความชื้น (Dry basis) รายละเอียดการวิเคราะห์ มีดังต่อไปนี้

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 850 ไมโครเมตร (No.20 mesh)
- เเผาด้วยกระบะเบี่ยงทนความร้อนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ชั่งด้วยกระบะเบี่ยงทนความร้อน และบันทึกน้ำหนักที่คงที่ไว้ ( $X_0$ )
- ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งที่  $150 \pm 5$  องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) ใส่ในถ้วยกระบะเบี่ยงทนความร้อน ให้มีน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ให้ละเอียดถึงทัศนียมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้ รวมน้ำหนักของถ้วยกระบะเบี่ยงทนความร้อน ( $X_1$ )
- นำไปเผาที่อุณหภูมิ  $650 \pm 25$  องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ใช้เวลาประมาณ 3 - 16 ชั่วโมง
- นำออกมาตั้งทิ้งไว้บนอิฐทนไฟ 10 นาที แล้วทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น
- ค่อยๆ เปิดฝาหม้อดูดความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฝ้าที่ฝ้ากระจาย ชั่งและบันทึกตัวอย่างที่ได้หลังเผา รวมน้ำหนักของถ้วยกระบะเบี่ยงทนความร้อน ( $X_2$ )
- คำนวณค่าเถ้าดังนี้

$$\text{เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = [(X_2 - X_0) / (X_1 - X_0)] * 100$$

**ภาคผนวก ค**  
**การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์**

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมติว่าเป็นสารพิษในน้ำตามวิธี ASTM D4607-86 รายละเอียดการวิเคราะห์ มีดังต่อไปนี้  
สารเคมีที่ใช้

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร เทใส่น้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
- น้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งแป้ง 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนัก 10 กรัม น้ำแป้งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น
- สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น  $0.100 \pm 0.001$  นอร์มัล เตรียมโดยละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 24.820 กรัมในน้ำ 75 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 0.1 กรัม และเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายไอโอดีนเข้มข้น  $0.100 \pm 0.001$  นอร์มัล เตรียมโดยละลายไอโอดีน 12.700 กรัม และโปตัสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 กรัม ด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง จนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายโปตัสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยอบโปตัสเซียมไอโอเดตที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร

กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

- ปิเปตสารละลายโปตัสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโปตัสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2 กรัม เขย่าให้ละลาย เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 5 มิลลิลิตร
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติคือจุดที่สารละลายไม่มีสี คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = (P \cdot R) / S$$

โดย  $N_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P	คือ	ปริมาตรของสารละลายโปตัสเซียมไอโอดेट (มิลลิลิตร)
R	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมไอโอดेट (นอร์มัล)
S	คือ	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

#### กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนจาก

$$N_2 = (P \cdot R) / S$$

โดย	$N_2$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)
	P	คือ	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)
	R	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)
	S	คือ	ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)

#### กรรมวิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดให้ละเอียดน้อยกว่า 60 เมช (0.246 มิลลิเมตร)
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 - 120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรซึ่งมีจุกปิด

หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าน้อยกว่า, เท่ากับและมากกว่า 0.02 น้ำหนักประมาณของตัวอย่าง ดูจากตารางที่ จ.1

- ใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจำนวน 10 มิลลิลิตร (ตรวจด้วยปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร) ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที แกว่งขวดเบาๆ เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
- ใส่สารละลาย 100 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที
- กรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman) เบอร์ 42 ทิ้งสารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก
- ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตรด้วยปิเปต



- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติคือจุดที่สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร (S)
- คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$\begin{aligned} X/M \text{ (mg/g)} &= [A - (2.2 * B * S)] / W \\ C &= (N_2 * S) / 50 \end{aligned}$$

X/M	คือ	มิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ
N <sub>1</sub>	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน
N <sub>2</sub>	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต
A	คือ	N <sub>1</sub> * 12693.0
B	คือ	N <sub>2</sub> * 126.93
C	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้
S	คือ	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้

- นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่างแกนราบคือ log C แกนตั้งฉากคือ log X/M จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
- จากเส้นความสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง C = 0.02 หรือ log C = -1.639 จะทราบค่าบนแกนตั้งฉาก สมมติเท่ากับ Y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า IA ดังนี้

$$IA \text{ (มิลลิกรัม/กรัม)} = 10^Y$$

ตารางที่ ค.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

FIND M FOR CALCULATE IODINE NUMBER BY USING ASTM D4607

น้ำหนักตัวอย่าง (M)				น้ำหนักตัวอย่าง (M)			
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.388
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.666	0.567	2750	0.411	0.360	0.309

### ภาคผนวก ง

## ความรู้เกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

- ชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นมาใช้กันทั่วไปมีดังนี้คือ
  1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)
  2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดผ่าน (Scanning Transmission Electron Microscope; STEM)
  3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
  4. เครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรย์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งชน (Electron Probe X-Ray Microanalyses; EXMA)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ SEM เนื่องจากเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในงานวิจัย

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงเคลื่อนส่องกราดไปบนผิวตัวอย่างในทอสุญญากาศ ในลักษณะลำแสง (Raster) เมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่าง จะมีอิเล็กตรอนสะท้อนกลับขึ้นมา (Reflected Electron) ซึ่งจะถูกจับด้วยเครื่องตรวจจับ (Detector) และทำให้เกิดภาพบนส่วนแสดงภาพ (Synchronous Display Tube)

- การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด

ในสภาพสุญญากาศ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าขนาด 1 - 40 กิโลโวลต์ (kV) ผ่านไปยังเส้นใยทังสเตน (Filament) ทำให้เส้นใยทังสเตน (Filament) ร้อนแดง ปล่อยอิเล็กตรอน ออกมา อิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกบังคับให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงและความเร็วคงที่วิ่งผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเลนส์รวมแสง (Condenser Lens) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมแสงให้มีความเข้มสูงสุดผ่านเลนส์ก้อง (Objective Lens) ไปตกบนตัวอย่าง ลำแสงอิเล็กตรอนที่ตกลงบนตัวอย่างนั้น จะถูกสนามแม่เหล็กดึงให้เคลื่อนส่องกราดไปบนตัวอย่างจากซ้ายไปขวาอีกในทำนองเดียวกันนี้จนทั่วทั้งผิวตัวอย่าง ลักษณะของเส้นลำแสงที่ส่องกราดไปบนตัวอย่างนี้เรียกว่าเรสเตอร์ (Raster) ได้จากจอทีวีเมื่อเวลาอยู่ใกล้ๆ ในขณะที่ลำแสงถูกดึงให้ส่องกราดไปบนตัวอย่างนั้นจะมีอิเล็กตรอน

สะท้อนกลับขึ้นมา และถูกตรวจจับเอาไว้ด้วยเครื่องตรวจจับอิเล็กทรอนิกส์ (Scintillation Detector) สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เครื่องตรวจจับ ตรวจจับได้จะถูกขยายในโฟโตมัลติไฟร์เออร์ (Photomultiplier;PMT) และแปลงเป็นสัญญาณวิดีโอส่งกราฟไปบนจอ (Cathode Ray Tube;CRT) สัมพันธ์กับลำแสงที่เคลื่อนส่งกราฟบนตัวอย่าง

## ภาคผนวก จ

ความยาวคลื่นและค่าแอมพลิจูดของตัวอย่างน้ำเสียจากสี่ย้อมธรรมชาติ  
 ตารางที่ จ.1 ความยาวคลื่นและค่าแอมพลิจูดของตัวอย่างน้ำเสียสี่ย้อมธรรมชาติที่ได้จากไม้  
 เพกา (สีเขียว) ที่พีเอชต่างๆ

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าแอมพลิจูดบนที่น้ำเสียสีเขียว					หมายเหตุ
	พีเอช 5	พีเอช 7	พีเอช 9	พีเอช 11	พีเอช 13	
400	0.105	0.104	0.105	0.103	0.103	
410	0.105	0.104	0.105	0.102	0.102	
420	0.103	0.102	0.103	0.102	0.102	
430	0.104	0.103	0.104	0.101	0.101	
440	0.112	0.110	0.111	0.109	0.109	
450	0.120	0.118	0.119	0.118	0.119	
460	0.158	0.154	0.158	0.156	0.158	
470	0.204	0.198	0.202	0.192	0.195	
480	0.212	0.209	0.212	0.207	0.209	
490	0.218	0.212	0.214	0.214	0.215	
500	0.218	0.216	0.217	0.216	0.216	
510	0.223	0.221	0.223	0.222	0.223	
520	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235	
530	0.256	0.254	0.256	0.253	0.252	
540	0.274	0.273	0.274	0.272	0.271	
550	0.287	0.286	0.287	0.286	0.285	
560	0.312	0.309	0.310	0.304	0.305	
570	0.318	0.316	0.317	0.306	0.307	
580	0.324	0.323	0.324	0.318	0.319	ตัวแทน
590	0.318	0.316	0.317	0.315	0.314	
600	0.313	0.312	0.313	0.311	0.310	
610	0.284	0.281	0.284	0.279	0.278	
620	0.241	0.239	0.240	0.238	0.236	
630	0.198	0.196	0.197	0.196	0.195	
640	0.155	0.153	0.154	0.153	0.152	
650	0.094	0.092	0.094	0.091	0.089	
660	0.038	0.035	0.037	0.034	0.034	
670	0.027	0.026	0.027	0.025	0.024	
680	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	
690	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	
700	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	

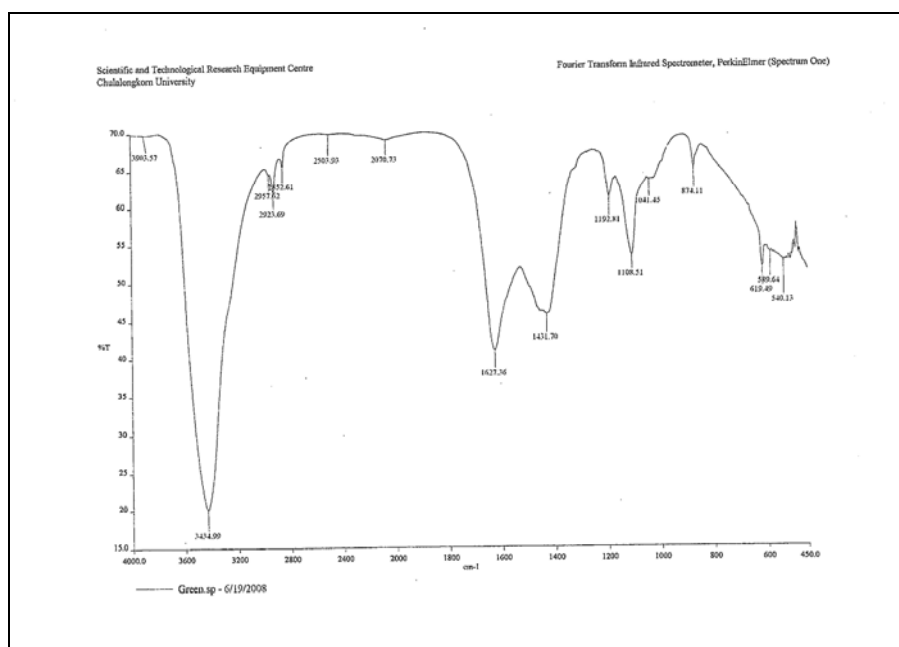
ตารางที่ ๑.2 ความยาวคลื่นและค่าแอมพลิจูดของตัวอย่างน้ำเสียสี่ข้อมรรถมาติที่ได้จากไม้  
ฝาง (สีแดง) ที่พีเอชต่างๆ

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าแอมพลิจูดบนที่น้ำเสียสีแดง					หมายเหตุ
	พีเอช 5	พีเอช 7	พีเอช 9	พีเอช 11	พีเอช 13	
400	0.106	0.105	0.106	0.104	0.104	
410	0.105	0.106	0.106	0.105	0.106	
420	0.105	0.104	0.105	0.104	0.105	
430	0.106	0.107	0.106	0.107	0.108	
440	0.109	0.108	0.109	0.108	0.109	
450	0.118	0.117	0.119	0.118	0.117	
460	0.147	0.146	0.146	0.147	0.148	
470	0.216	0.216	0.216	0.216	0.216	
480	0.254	0.254	0.254	0.254	0.254	
490	0.283	0.282	0.283	0.281	0.283	
500	0.352	0.352	0.351	0.351	0.352	
510	0.379	0.378	0.379	0.378	0.377	
520	0.416	0.417	0.417	0.413	0.414	ตัวแทน
530	0.356	0.357	0.356	0.355	0.256	
540	0.316	0.317	0.316	0.315	0.314	
550	0.304	0.302	0.303	0.302	0.303	
560	0.301	0.303	0.304	0.303	0.302	
570	0.287	0.288	0.287	0.286	0.288	
580	0.279	0.279	0.278	0.278	0.279	
590	0.253	0.252	0.254	0.253	0.251	
600	0.248	0.247	0.249	0.248	0.249	
610	0.245	0.243	0.244	0.247	0.246	
620	0.237	0.238	0.237	0.238	0.237	
630	0.194	0.195	0.196	0.195	0.196	
640	0.147	0.153	0.154	0.153	0.152	
650	0.092	0.092	0.093	0.094	0.092	
660	0.026	0.028	0.029	0.028	0.027	
670	0.025	0.026	0.027	0.025	0.024	
680	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	
690	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	
700	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	

**ภาคผนวก จ**  
**ผลการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วย**  
**อินฟราเรด (FTIR)**

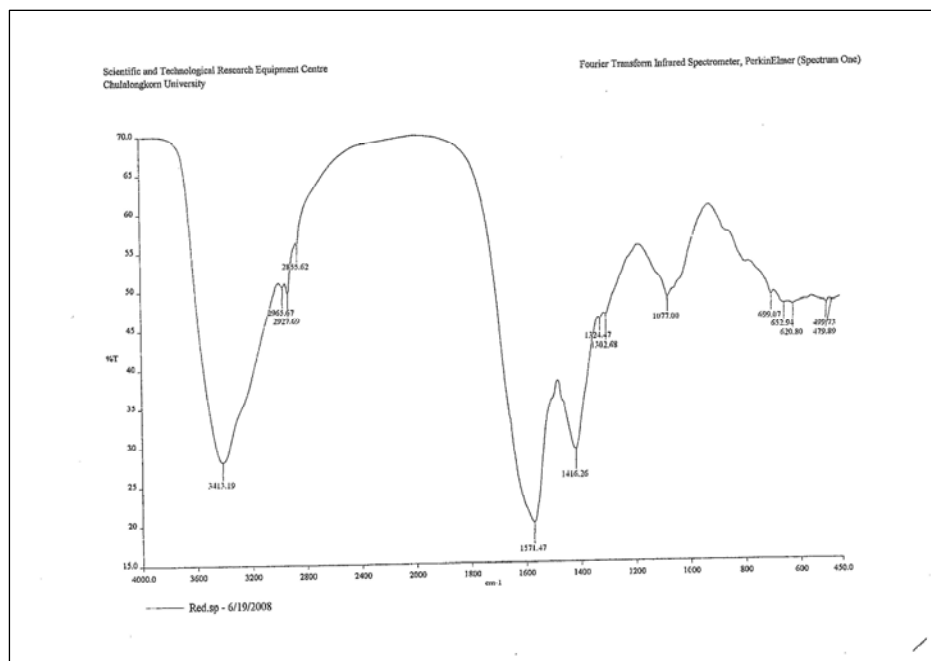
โดยทั่วไปแล้ว เครื่องมือทางอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมักจะใช้หลักการกระจายแสง (Dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจเป็นตัวกำหนด นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาหรือพิสูจน์เกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ หาฟังก์ชันโมเลกุลต่างๆ ซึ่งจะปรากฏออกมาที่ความถี่ต่างๆ กัน

รายละเอียดฟังก์ชันโมเลกุลที่สำคัญของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติ ของสีเขียวจากเพกา และสีแดงจากฝางแสดงค่าพิกัดตามรูปที่ จ.1 และ รูปที่ จ.2



รูปที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

- ลักษณะหมู่ฟังก์ชันโมเลกุลของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา มีพีดเล็ก ๆ ใกล้ 1,650 ต่อเซนติเมตร เป็นพันธะคู่วงแหวนอะโรมาติก (-C=C-)



รูปที่ ๑.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝางด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

- ลักษณะหมู่ฟังก์ชันหลักของน้ำเสียจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง มีพีคกว้างๆ ใกล้เคียง 3,600 ถึง 3,000 ต่อเซนติเมตร เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มีสองพีคใกล้ 2,850 ต่อเซนติเมตร และ 2,750 ต่อเซนติเมตร อยู่ทางขวามือเป็นหมู่อัลดีไฮด์ และมีพีคใกล้ 1,300 ถึง 1,000 ต่อเซนติเมตร เป็นหมู่เอสเทอร์ไนโตรกรูป (C-O)



## ภาคผนวก ข

## ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธี BET

- 1) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ASAP 2000 V3.09		Micromeritics Instrument Corporation		PAGE 08
		A		
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	AICL /2	START	13:15:21	12/18/07
SAMPLE ID:	eucs	COMPL	15:45:28	12/18/07
SUBMITTER:		REPRT	15:57:09	12/22/07
OPERATOR:		SAMPLE WT:	0.3112 g	
UNIT NUMBER: 1		FREE SPACE:	47.2621 cc	
ANALYSIS GAS: Nitrogen		EQUIL INTRVL:	10 sec	
SUMMARY REPORT				
AREA				
BET SURFACE AREA:		634.6857	sq.	m/g
LANGMUIR SURFACE AREA:		832.4825	sq.	m/g
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/PO 0.2024:		648.5937	sq.	m/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:		51.2358	sq.	m/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:		61.8374	sq.	m/g
MICROPOR AREA:		405.2631	sq.	m/g
VOLUME				
SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN 1253.4298 A DIAMETER AT P/PO 0.9643 :		0.309253	cc/g	
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:		0.039672	cc/g	
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:		0.041256	cc/g	
MICROPOR VOLUME:		0.284312	cc/g	
PORE SIZE				
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY LANGMUIR):		13.5834	A	
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):		27.7251	A	
BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):		25.3128	A	

รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

- 2) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

ASAP 2000 V3.09		Micromeritics Instrument Corporation	
A		PAGE 09	
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	AICL /2	START 13:00:21	12/21/07
SAMPLE ID:	eucz	COMPL 15:30:38	12/21/07
SUBMITTER:		REPRT 15:57:09	12/22/07
OPERATOR:		SAMPLE WT:	0.3254 g
UNIT NUMBER:1		FREE SPACE:	43.3725 cc
ANALYSIS GAS:Nitrogen		EQUIL INTRVL:	10 sec
SUMMARY REPORT			
AREA			
BET SURFACE AREA:	645.5724	sq. m/g	
LANGMUIR SURFACE AREA:	864.2753	sq. m/g	
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/PO 0.2024:	653.8245	sq. m/g	
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:	54.3578	sq. m/g	
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:	63.2612	sq. m/g	
MICROPORE AREA:	453.420	sq. m/g	
VOLUME			
SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN 1253.4298 A DIAMETER AT P/PO 0.9643 :	0.312845	cc/g	
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:	0.040253	cc/g	
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A. DIMETER:	0.042274	cc/g	
MICROPORE VOLUME:	0.315243	cc/g	
PORE SIZE			
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY LANGMUIR):	13.9263	A	
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):	28.7914	A	
BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):	26.2432	A	

- รูปที่ ๒.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

**ภาคผนวก ซ**  
**ผลการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดตีผิวแบบคอลัมน์**

ตารางที่ ซ.1 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดตีผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 30 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ ผ่านการ บำบัด (ลิตร)	ปริมาตร ถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอม ซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบ แบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่า แอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.1246	4.00	0.326	11.14	0.247	24.2
3	0.749	0.1246	6.01	0.326	11.13	0.248	23.9
4	0.998	0.1246	8.01	0.326	11.21	0.250	23.3
5	1.248	0.1246	10.02	0.326	11.15	0.251	23.0
6	1.498	0.1246	12.02	0.326	11.19	0.252	22.7
8	1.997	0.1246	16.03	0.326	11.23	0.254	22.1
10	2.496	0.1246	20.03	0.326	11.26	0.257	21.2
12	2.995	0.1246	24.04	0.326	11.26	0.261	19.9
14	3.494	0.1246	28.04	0.326	11.28	0.263	19.3
16	3.994	0.1246	32.05	0.326	11.32	0.269	17.5
18	4.493	0.1246	36.06	0.326	11.36	0.274	16.0
20	4.992	0.1246	40.06	0.326	11.43	0.282	13.5
24	5.990	0.1246	48.07	0.326	11.46	0.296	9.2
28	6.989	0.1246	56.09	0.326	11.53	0.314	3.7
32	7.987	0.1246	64.10	0.326	11.62	0.323	0.9
36	8.986	0.1246	72.12	0.326	11.65	0.325	0.3
48	11.981	0.1246	96.16	0.326	11.69	0.325	0.3

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ๒.2 ผลการกำจัดสีจากสีข้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 60 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตรถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.2492	2.00	0.326	11.12	0.183	43.9
3	0.749	0.2492	3.01	0.326	11.14	0.184	43.6
4	0.998	0.2492	4.00	0.326	11.18	0.185	43.3
5	1.248	0.2492	5.01	0.326	11.19	0.187	42.6
6	1.498	0.2492	6.01	0.326	11.22	0.191	41.4
8	1.997	0.2492	8.01	0.326	11.24	0.193	40.8
10	2.496	0.2492	10.02	0.326	11.25	0.195	40.2
12	2.995	0.2492	12.02	0.326	11.27	0.197	39.6
14	3.494	0.2492	14.02	0.326	11.29	0.214	34.4
16	3.994	0.2492	16.03	0.326	11.31	0.223	31.6
18	4.493	0.2492	18.03	0.326	11.35	0.241	26.1
20	4.992	0.2492	20.03	0.326	11.39	0.248	23.9
24	5.990	0.2492	24.04	0.326	11.43	0.269	17.5
28	6.989	0.2492	28.05	0.326	11.52	0.285	12.6
32	7.987	0.2492	32.05	0.326	11.58	0.312	4.3
36	8.986	0.2492	36.06	0.326	11.64	0.325	0.3
48	11.981	0.2492	48.08	0.326	11.65	0.325	0.3

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ๓.3 ผลการกำจัดสีจากสีข้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 90 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตรถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.3737	1.34	0.326	11.16	0.134	58.9
3	0.749	0.3737	2.00	0.326	11.13	0.135	58.6
4	0.998	0.3737	2.67	0.326	11.16	0.137	58.0
5	1.248	0.3737	3.34	0.326	11.19	0.142	56.4
6	1.498	0.3737	4.01	0.326	11.21	0.147	54.9
8	1.997	0.3737	5.34	0.326	11.31	0.149	54.3
10	2.496	0.3737	6.68	0.326	11.32	0.154	52.8
12	2.995	0.3737	8.01	0.326	11.32	0.173	46.9
14	3.494	0.3737	9.35	0.326	11.37	0.182	44.2
16	3.994	0.3737	10.69	0.326	11.38	0.194	40.5
18	4.493	0.3737	12.02	0.326	11.41	0.215	34.0
20	4.992	0.3737	13.36	0.326	11.45	0.228	30.1
24	5.990	0.3737	16.03	0.326	11.47	0.252	22.7
28	6.989	0.3737	18.70	0.326	11.51	0.285	12.6
32	7.987	0.3737	21.37	0.326	11.58	0.294	9.8
36	8.986	0.3737	24.05	0.326	11.64	0.310	4.9
48	11.981	0.3737	32.06	0.326	11.67	0.325	0.3

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ๗.4 ผลการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 120 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.4983	1.00	0.326	11.11	0.104	68.1
3	0.749	0.4983	1.50	0.326	11.12	0.107	67.2
4	0.998	0.4983	2.00	0.326	11.13	0.109	66.6
5	1.248	0.4983	2.50	0.326	11.16	0.114	65.0
6	1.498	0.4983	3.01	0.326	11.18	0.117	64.1
8	1.997	0.4983	4.01	0.326	11.21	0.123	62.3
10	2.496	0.4983	5.01	0.326	11.24	0.129	60.4
12	2.995	0.4983	6.01	0.326	11.25	0.132	59.5
14	3.494	0.4983	7.01	0.326	11.29	0.138	57.7
16	3.994	0.4983	8.02	0.326	11.34	0.145	55.5
18	4.493	0.4983	9.02	0.326	11.37	0.158	51.5
20	4.992	0.4983	10.02	0.326	11.41	0.184	43.6
24	5.990	0.4983	12.02	0.326	11.43	0.236	27.6
28	6.989	0.4983	14.03	0.326	11.51	0.273	16.3
32	7.987	0.4983	16.03	0.326	11.58	0.289	11.3
36	8.986	0.4983	18.03	0.326	11.62	0.313	4.0
48	11.981	0.4983	24.04	0.326	11.64	0.321	1.5

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ๗.5 ผลการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบ คอลัมน์ ที่ระดับ 30 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตร ถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.1246	4.00	0.418	11.11	0.326	22.0
3	0.749	0.1246	6.01	0.418	11.12	0.327	21.8
4	0.998	0.1246	8.01	0.418	11.18	0.328	21.5
5	1.248	0.1246	10.02	0.418	11.19	0.342	18.2
6	1.498	0.1246	12.02	0.418	11.21	0.345	17.5
8	1.997	0.1246	16.03	0.418	11.27	0.349	16.5
10	2.496	0.1246	20.03	0.418	11.29	0.352	15.8
12	2.995	0.1246	24.04	0.418	11.32	0.358	14.4
14	3.494	0.1246	28.04	0.418	11.36	0.363	13.2
16	3.994	0.1246	32.05	0.418	11.38	0.367	12.2
18	4.493	0.1246	36.06	0.418	11.41	0.378	9.6
20	4.992	0.1246	40.06	0.418	11.47	0.385	7.9
24	5.990	0.1246	48.07	0.418	11.49	0.392	6.2
28	6.989	0.1246	56.09	0.418	11.57	0.413	1.2
32	7.987	0.1246	64.10	0.418	11.59	0.416	0.5
36	8.986	0.1246	72.12	0.418	11.61	0.417	0.2
48	11.981	0.1246	96.16	0.418	11.69	0.417	0.2

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

ตารางที่ ๗.6 ผลการกำจัดสีจากสีข้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบ คอลัมน์ ที่ระดับ 60 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตร ถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมชอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมชอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมชอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.2492	2.00	0.418	11.12	0.264	36.8
3	0.749	0.2492	3.01	0.418	11.21	0.265	36.6
4	0.998	0.2492	4.00	0.418	11.23	0.267	36.1
5	1.248	0.2492	5.01	0.418	11.17	0.274	34.4
6	1.498	0.2492	6.01	0.418	11.16	0.281	32.8
8	1.997	0.2492	8.01	0.418	11.22	0.285	31.8
10	2.496	0.2492	10.02	0.418	11.28	0.287	31.3
12	2.995	0.2492	12.02	0.418	11.29	0.294	29.7
14	3.494	0.2492	14.02	0.418	11.25	0.312	25.4
16	3.994	0.2492	16.03	0.418	11.34	0.316	24.4
18	4.493	0.2492	18.03	0.418	11.35	0.322	23.0
20	4.992	0.2492	20.03	0.418	11.41	0.348	16.7
24	5.990	0.2492	24.04	0.418	11.47	0.365	12.7
28	6.989	0.2492	28.05	0.418	11.54	0.374	10.5
32	7.987	0.2492	32.05	0.418	11.63	0.382	8.6
36	8.986	0.2492	36.06	0.418	11.67	0.417	0.2
48	11.981	0.2492	48.08	0.418	11.68	0.417	0.2

หมายเหตุ : ค่าแอมชอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมชอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)



ตารางที่ ๗.7 ผลการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบ คอลัมน์ ที่ระดับ 90 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตร ถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมชอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมชอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมชอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.3737	1.34	0.418	11.13	0.217	48.1
3	0.749	0.3737	2.00	0.418	11.14	0.218	47.8
4	0.998	0.3737	2.67	0.418	11.19	0.219	47.6
5	1.248	0.3737	3.34	0.418	11.22	0.224	46.4
6	1.498	0.3737	4.01	0.418	11.25	0.226	45.9
8	1.997	0.3737	5.34	0.418	11.28	0.227	45.7
10	2.496	0.3737	6.68	0.418	11.29	0.235	43.8
12	2.995	0.3737	8.01	0.418	11.32	0.247	40.9
14	3.494	0.3737	9.35	0.418	11.37	0.257	38.5
16	3.994	0.3737	10.69	0.418	11.39	0.268	35.9
18	4.493	0.3737	12.02	0.418	11.42	0.273	34.7
20	4.992	0.3737	13.36	0.418	11.45	0.294	29.7
24	5.990	0.3737	16.03	0.418	11.49	0.325	22.2
28	6.989	0.3737	18.70	0.418	11.51	0.358	14.4
32	7.987	0.3737	21.37	0.418	11.58	0.372	11.0
36	8.986	0.3737	24.05	0.418	11.62	0.394	5.7
48	11.981	0.3737	32.06	0.418	11.68	0.417	0.2

หมายเหตุ : ค่าแอมชอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมชอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

ตารางที่ ๗.8 ผลการกำจัดสีจากสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบ คอลัมน์ ที่ระดับ 120 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตร ถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมชอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมชอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมชอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.4983	1.00	0.418	11.14	0.185	55.7
3	0.749	0.4983	1.50	0.418	11.13	0.218	47.8
4	0.998	0.4983	2.00	0.418	11.21	0.219	47.6
5	1.248	0.4983	2.50	0.418	11.15	0.224	46.4
6	1.498	0.4983	3.01	0.418	11.19	0.226	45.9
8	1.997	0.4983	4.01	0.418	11.23	0.227	45.7
10	2.496	0.4983	5.01	0.418	11.26	0.235	43.8
12	2.995	0.4983	6.01	0.418	11.26	0.247	40.9
14	3.494	0.4983	7.01	0.418	11.28	0.257	38.5
16	3.994	0.4983	8.02	0.418	11.32	0.268	35.9
18	4.493	0.4983	9.02	0.418	11.36	0.273	34.7
20	4.992	0.4983	10.02	0.418	11.43	0.294	29.7
24	5.990	0.4983	12.02	0.418	11.46	0.325	22.2
28	6.989	0.4983	14.03	0.418	11.53	0.358	14.4
32	7.987	0.4983	16.03	0.418	11.62	0.369	11.7
36	8.986	0.4983	18.03	0.418	11.65	0.387	7.4
48	11.981	0.4983	24.04	0.418	11.69	0.409	2.2

หมายเหตุ : ค่าแอมชอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมชอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

ตารางที่ ๗.9 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 30 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.1246	4.00	0.326	11.16	0.245	24.8
3	0.749	0.1246	6.01	0.326	11.15	0.246	24.5
4	0.998	0.1246	8.01	0.326	11.17	0.248	23.9
5	1.248	0.1246	10.02	0.326	11.21	0.249	23.6
6	1.498	0.1246	12.02	0.326	11.23	0.251	23.0
8	1.997	0.1246	16.03	0.326	11.25	0.253	22.4
10	2.496	0.1246	20.03	0.326	11.28	0.255	21.8
12	2.995	0.1246	24.04	0.326	11.28	0.257	21.2
14	3.494	0.1246	28.04	0.326	11.29	0.261	19.9
16	3.994	0.1246	32.05	0.326	11.33	0.262	19.6
18	4.493	0.1246	36.06	0.326	11.38	0.268	17.8
20	4.992	0.1246	40.06	0.326	11.45	0.273	16.3
24	5.990	0.1246	48.07	0.326	11.47	0.284	12.9
28	6.989	0.1246	56.09	0.326	11.54	0.298	8.6
32	7.987	0.1246	64.10	0.326	11.65	0.312	4.3
36	8.986	0.1246	72.12	0.326	11.67	0.323	0.9
48	11.981	0.1246	96.16	0.326	11.72	0.325	0.3

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ๗.10 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 60 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.2492	2.00	0.326	11.16	0.182	44.2
3	0.749	0.2492	3.01	0.326	11.15	0.183	43.9
4	0.998	0.2492	4.00	0.326	11.17	0.184	43.6
5	1.248	0.2492	5.01	0.326	11.21	0.186	42.9
6	1.498	0.2492	6.01	0.326	11.23	0.189	42.0
8	1.997	0.2492	8.01	0.326	11.25	0.191	41.4
10	2.496	0.2492	10.02	0.326	11.28	0.192	41.1
12	2.995	0.2492	12.02	0.326	11.28	0.194	40.5
14	3.494	0.2492	14.02	0.326	11.29	0.205	37.1
16	3.994	0.2492	16.03	0.326	11.33	0.213	34.7
18	4.493	0.2492	18.03	0.326	11.38	0.235	27.9
20	4.992	0.2492	20.03	0.326	11.45	0.239	26.7
24	5.990	0.2492	24.04	0.326	11.47	0.256	21.5
28	6.989	0.2492	28.05	0.326	11.54	0.268	17.8
32	7.987	0.2492	32.05	0.326	11.65	0.284	12.9
36	8.986	0.2492	36.06	0.326	11.67	0.313	4.0
48	11.981	0.2492	48.08	0.326	11.72	0.325	0.3

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ข.11 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 90 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.3737	1.34	0.326	11.16	0.132	59.5
3	0.749	0.3737	2.00	0.326	11.15	0.134	58.9
4	0.998	0.3737	2.67	0.326	11.17	0.135	58.6
5	1.248	0.3737	3.34	0.326	11.21	0.139	57.4
6	1.498	0.3737	4.01	0.326	11.23	0.143	56.1
8	1.997	0.3737	5.34	0.326	11.25	0.147	54.9
10	2.496	0.3737	6.68	0.326	11.28	0.151	53.7
12	2.995	0.3737	8.01	0.326	11.28	0.168	48.5
14	3.494	0.3737	9.35	0.326	11.29	0.172	47.2
16	3.994	0.3737	10.69	0.326	11.33	0.183	43.9
18	4.493	0.3737	12.02	0.326	11.38	0.206	36.8
20	4.992	0.3737	13.36	0.326	11.45	0.218	33.1
24	5.990	0.3737	16.03	0.326	11.47	0.249	23.6
28	6.989	0.3737	18.70	0.326	11.54	0.274	16.0
32	7.987	0.3737	21.37	0.326	11.65	0.283	13.2
36	8.986	0.3737	24.05	0.326	11.67	0.304	6.7
48	11.981	0.3737	32.06	0.326	11.72	0.325	0.3

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ๗.12 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีเขียวจากเพกา ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 120 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.4983	1.00	0.326	11.16	0.102	68.7
3	0.749	0.4983	1.50	0.326	11.15	0.103	68.4
4	0.998	0.4983	2.00	0.326	11.17	0.105	67.8
5	1.248	0.4983	2.50	0.326	11.21	0.109	66.6
6	1.498	0.4983	3.01	0.326	11.23	0.115	64.7
8	1.997	0.4983	4.01	0.326	11.25	0.119	63.5
10	2.496	0.4983	5.01	0.326	11.28	0.125	61.7
12	2.995	0.4983	6.01	0.326	11.28	0.129	60.4
14	3.494	0.4983	7.01	0.326	11.29	0.134	58.9
16	3.994	0.4983	8.02	0.326	11.33	0.138	57.7
18	4.493	0.4983	9.02	0.326	11.38	0.149	54.3
20	4.992	0.4983	10.02	0.326	11.45	0.178	45.4
24	5.990	0.4983	12.02	0.326	11.47	0.231	29.1
28	6.989	0.4983	14.03	0.326	11.54	0.265	18.7
32	7.987	0.4983	16.03	0.326	11.65	0.279	14.4
36	8.986	0.4983	18.03	0.326	11.67	0.298	8.6
48	11.981	0.4983	24.04	0.326	11.72	0.318	2.5

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.42)

ตารางที่ ๗.13 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสี่ข้อมรรถมาติสี่แดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 30 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.1246	4.00	0.418	11.16	0.325	22.2
3	0.749	0.1246	6.01	0.418	11.15	0.326	22.0
4	0.998	0.1246	8.01	0.418	11.17	0.327	21.8
5	1.248	0.1246	10.02	0.418	11.21	0.338	19.1
6	1.498	0.1246	12.02	0.418	11.23	0.342	18.2
8	1.997	0.1246	16.03	0.418	11.25	0.344	17.7
10	2.496	0.1246	20.03	0.418	11.28	0.349	16.5
12	2.995	0.1246	24.04	0.418	11.28	0.353	15.6
14	3.494	0.1246	28.04	0.418	11.29	0.358	14.4
16	3.994	0.1246	32.05	0.418	11.33	0.364	12.9
18	4.493	0.1246	36.06	0.418	11.38	0.371	11.2
20	4.992	0.1246	40.06	0.418	11.45	0.382	8.6
24	5.990	0.1246	48.07	0.418	11.47	0.385	7.9
28	6.989	0.1246	56.09	0.418	11.54	0.396	5.3
32	7.987	0.1246	64.10	0.418	11.65	0.412	1.4
36	8.986	0.1246	72.12	0.418	11.67	0.415	0.7
48	11.981	0.1246	96.16	0.418	11.72	0.417	0.2

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

ตารางที่ ๗.14 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสี่ข้อมรรษชาติสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 60 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.2492	2.00	0.418	11.16	0.262	37.3
3	0.749	0.2492	3.01	0.418	11.15	0.264	36.8
4	0.998	0.2492	4.00	0.418	11.17	0.265	36.6
5	1.248	0.2492	5.01	0.418	11.21	0.271	35.2
6	1.498	0.2492	6.01	0.418	11.23	0.279	33.3
8	1.997	0.2492	8.01	0.418	11.25	0.281	32.8
10	2.496	0.2492	10.02	0.418	11.28	0.285	31.8
12	2.995	0.2492	12.02	0.418	11.28	0.293	29.9
14	3.494	0.2492	14.02	0.418	11.29	0.298	28.7
16	3.994	0.2492	16.03	0.418	11.33	0.306	26.8
18	4.493	0.2492	18.03	0.418	11.38	0.318	23.9
20	4.992	0.2492	20.03	0.418	11.45	0.339	18.9
24	5.990	0.2492	24.04	0.418	11.47	0.345	17.5
28	6.989	0.2492	28.05	0.418	11.54	0.364	12.9
32	7.987	0.2492	32.05	0.418	11.65	0.376	10.0
36	8.986	0.2492	36.06	0.418	11.67	0.392	6.2
48	11.981	0.2492	48.08	0.418	11.72	0.417	0.2

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)



ตารางที่ ๗.15 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสี่ข้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 90 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.3737	1.34	0.418	11.16	0.215	48.6
3	0.749	0.3737	2.00	0.418	11.15	0.216	48.3
4	0.998	0.3737	2.67	0.418	11.17	0.217	48.1
5	1.248	0.3737	3.34	0.418	11.21	0.221	47.1
6	1.498	0.3737	4.01	0.418	11.23	0.223	46.7
8	1.997	0.3737	5.34	0.418	11.25	0.225	46.2
10	2.496	0.3737	6.68	0.418	11.28	0.232	44.5
12	2.995	0.3737	8.01	0.418	11.28	0.241	42.3
14	3.494	0.3737	9.35	0.418	11.29	0.247	40.9
16	3.994	0.3737	10.69	0.418	11.33	0.258	38.3
18	4.493	0.3737	12.02	0.418	11.38	0.269	35.6
20	4.992	0.3737	13.36	0.418	11.45	0.283	32.3
24	5.990	0.3737	16.03	0.418	11.47	0.312	25.4
28	6.989	0.3737	18.70	0.418	11.54	0.341	18.4
32	7.987	0.3737	21.37	0.418	11.65	0.362	13.4
36	8.986	0.3737	24.05	0.418	11.67	0.389	6.9
48	11.981	0.3737	32.06	0.418	11.72	0.417	0.2

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

ตารางที่ ๗.16 ผลการกำจัดสีจากน้ำเสียสีย้อมธรรมชาติสีแดงจากฝาง ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ระดับ 120 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	ปริมาตรเบด (BV)	ค่าแอมซอบแบนท์ (เข้า)	พีเอช (ออก)	ค่าแอมซอบแบนท์ (ออก)	เปอร์เซ็นต์ลดค่าแอมซอบแบนท์ (%)
2	0.499	0.4983	1.00	0.418	11.16	0.183	56.2
3	0.749	0.4983	1.50	0.418	11.15	0.197	52.9
4	0.998	0.4983	2.00	0.418	11.17	0.206	50.7
5	1.248	0.4983	2.50	0.418	11.21	0.211	49.5
6	1.498	0.4983	3.01	0.418	11.23	0.215	48.6
8	1.997	0.4983	4.01	0.418	11.25	0.218	47.8
10	2.496	0.4983	5.01	0.418	11.28	0.226	45.9
12	2.995	0.4983	6.01	0.418	11.28	0.231	44.7
14	3.494	0.4983	7.01	0.418	11.29	0.238	43.1
16	3.994	0.4983	8.02	0.418	11.33	0.242	42.1
18	4.493	0.4983	9.02	0.418	11.38	0.254	39.2
20	4.992	0.4983	10.02	0.418	11.45	0.263	37.1
24	5.990	0.4983	12.02	0.418	11.47	0.304	27.3
28	6.989	0.4983	14.03	0.418	11.54	0.315	24.6
32	7.987	0.4983	16.03	0.418	11.65	0.351	16.0
36	8.986	0.4983	18.03	0.418	11.67	0.376	10.0
48	11.981	0.4983	24.04	0.418	11.72	0.406	2.9

หมายเหตุ : ค่าแอมซอบแบนท์เข้าระบบเป็นค่าแอมซอบแบนท์ที่วัดก่อนปรับพีเอชเริ่มต้น (ที่พีเอชเท่ากับ 8.04)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจรพงษ์ จุมนั้น เกิดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2547