

การบำบัดสีฟอกย้อม Reactive Blue ในน้ำเสียเสีงเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์  
จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ADSORPTION OF REACTIVE BLUE DYES IN WASTEWATER  
USING ACTIVATED CARBON FROM COFFEE GROUNDS  
BY ACTIVATION WITH ZINC CHLORINE

นางสาวดวงใจดา

อัญญาภรณ์

นางสาวธิดารัตน์

ศิริมิ่งกะโร

นางสาววิษุตา

นาคผลงู

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การบำบัดสีฟอกย้อม Reactive Blue ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์  
จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

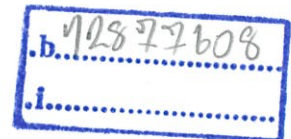
ADSORPTION OF REACTIVE BLUE DYES IN WASTEWATER  
USING ACTIVATED CARBON FROM COFFEE GROUNDS  
BY ACTIVATION WITH ZINC CHLORINE



T148954

นางสาวดวงธิดา	อัญญกานนท์
นางสาวธิดารัตน์	ศิริมั่งคะโร
นางสาววิชชุดา	นาคผจญ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....148954  
วัน,เดือน,ปี.....16 S.A. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

ADSORPTION OF REACTIVE BLUE DYES IN WASTEWATER  
USING ACTIVATED CARBON FROM COFFEE GROUNDS  
BY ACTIVATION WITH ZINC CHLORINE

MISS DUANGTIDA

ANYAKANON

MISS TIDARAT

SIRIMANGKARO

MISS VICHUTA

NAKPAJON




A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดสีฟอกย้อม Reactive Blue ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย  
ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์  
Adsorption of Reactive Blue dyes in wastewater using activated  
carbon from coffee grounds by activation with zinc chlorine

ชื่อนักศึกษา นางสาวดวงธิดา อัญญกานนท์ รหัสนักศึกษา 55050920  
นางสาวธิดารัตน์ ศิริมิ่งคะโร รหัสนักศึกษา 55050930  
นางสาววิษุตา นาคผจญ รหัสนักศึกษา 55050934

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชา เคมี  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ปัทมา ลีฬหาวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.สามารถ คงทวีเลิศ ประธานกรรมการ	
อาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการ	
อาจารย์ปัทมา ลีฬหาวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ Adsorption of Reactive Blue dyes in wastewater using activated carbon from coffee grounds by activation with zinc chlorine		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวดวงธิดา	อัญญกานนท์	รหัสนักศึกษา 55050920
	นางสาวธิดารัตน์	ศิริมั่งคะโร	รหัสนักศึกษา 55050930
	นางสาววิชชุดา	นาคผจญ	รหัสนักศึกษา 55050934
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปัทมา ลีฬหาวงศ์		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อกากกาแฟ 3:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวจากภาพ SEM และศึกษาขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน เส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุน โดยการอนุมานจากภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า และศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของสีย้อม พีเอช ระยะเวลาสัมผัส รวมทั้งศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีรูพรุนเปิดขนาดใหญ่กว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีรูพรุนเปิดขนาดเล็กจำนวนมาก และยังพบว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมดีกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 70.87% และ 100% ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม, ความเข้มข้นของสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร, pH 6.19, และระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ซึ่งจากการทดลองไอโซเทอร์มพบว่าพฤติกรรมดูดซับสอดคล้องกับ Freundlich model โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9434

คำสำคัญ : กากกาแฟ การกระตุ้นทางเคมี การดูดซับ ถ่านกัมมันต์ สีย้อม

<b>Title</b>	ADSORPTION OF REACTIVE BLUE DYES IN WASTEWATER USING ACTIVATED CARBON FROM COFFEE GROUNDS BY ACTIVATION WITH ZINC CHLORINE		
<b>Students</b>	MISS DUANGTIDA	ANYAKANON	ID 55050920
	MISS TIDARAT	SIRIMANGKARO	ID 55050930
	MISS VICHUTA	NAKPAJON	ID 55050934
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2015		
<b>Advisor</b>	Professor Patama Leerahawong		

### Abstract

In this work, preparation procedure of coffee grounds activated carbon was developed for removal of dye in wastewaters. The optimal conditions for the preparation were observed that the coffee grounds was activated by using zinc chloride with the ratio of the dry weight between zinc chloride and coffee ground at 3:1 for 24 hours and carbonized at 600 °C for 45 minutes. Studying the surface characterization from SEM image and studying surface area, volume of pore, diameter of pore by assuming from SEM image from activated carbon compare with activated carbon from trade. Additionally, some factors that affecting on the Reactive blue 19 dyes adsorption such as amount of activated carbon, the concentrated of dyes, pH, contacting time and adsorption isotherm were investigated. Founding activated carbon from coffee grounds surface has bigger pore comparing with activated carbon from trade that has lot of small pore. Also founding that activated carbon from coffee grounds has lower efficiency comparing with activated carbon from trade, absorption percentage is 70.87% and 100% respectively. The most suitable condition for absorb the dyes is 2.0 grams of activated carbon, concentrated of dyes 50 mg/L, pH 6.19, and contacting time 120 minutes. From isotherm experiment founding absorb behavior correspond with Freundlich model,  $R^2$  equal to 0.9434

**Keywords :** coffee grounds, chemical activation, adsorption, activated carbon, dyes

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ปัทมา สีนหวางค์ ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ และ อ.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณคุณปราณี บุญวัฒน์ คุณชัชชัย ลัทธิลักษณ์ คุณสาคร สอนพงษ์ คุณณัฐพล ไกรธรรม คุณรจนา จำกัต์ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งในด้านสารเคมีอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ คำแนะนำ ช่วยติดต่อประสานงานต่างๆ และอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบริษัท เคซีบี เท็กซ์ไทล์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สีฟลอกซ์อม Reactive Blue 19 ในการทำโครงการพิเศษนี้

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย เพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวดวงธิดา

อัญญกานนท์

นางสาวธิดารัตน์

ศิริมิ่งคะโร

นางสาววิชชุดา

นาคผจญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับน้ำเสีย	4
2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกากาแฟ	10
2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสีย้อม	13
2.4 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ	28
2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์	34
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>51</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	51
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย	52
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ	52
3.2.2 ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์	52
3.2.3 ขั้นตอนการทำกากกาแฟให้เป็นถ่านกัมมันต์ (Carbonization)	52
3.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ	53

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.5 ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี Reactive Blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ	53
3.2.6 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ	56
3.2.7 ขั้นตอนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ระหว่างถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์กับถ่านกัมมันต์การค้า	56
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	57
4.1 ผลของการศึกษาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ ความชื้น เถ้า สารระเหยและคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์	57
4.2 ผลของการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)	57
4.3 ประสิทธิภาพของการดูดซับสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ โดยกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์	59
4.3.1 การหาความยาวคลื่นแสง	59
4.3.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีฟอกย้อม Reactive Blue 19	59
4.3.3 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ โดยกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์	60
4.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการดูดซับสี Reactive Blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า	64
4.4 ผลของการศึกษา Adsorption Isotherm	65
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก	74
ภาคผนวก ข	76

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค	77
ภาคผนวก ง	93
ภาคผนวก จ	97
ภาคผนวก ฉ	107
ภาคผนวก ช	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	เปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในซีรีแอคทีฟ	19
2.2	ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์	22
2.3	มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม	22
2.4	ค่า LD <sub>50</sub> ของสีย้อมสิ่งทอ	23
2.5	ความเป็นพิษของสารที่ค่า LD <sub>50</sub> ต่างๆ	23
2.6	ตัวอย่างค่าความเป็นพิษของสีย้อมต่อปลา	24
2.7	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งด้วยวิธีการต่างๆ	27
4.1	เปอร์เซ็นต์ความชื้น ผลผลิตที่ได้ ถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว	57
4.2	ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรและเส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากการอนุमान	60
4.3	ค่าคงที่ต่างๆของ Langmuir Isotherm ในการดูดซับสีดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์	67
4.4	ค่าคงที่ต่างๆของ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์	67

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะของกาแฟแต่ละสายพันธุ์	10
2.2	ลักษณะของกาแฟ	11
2.3	โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue	17
2.4	ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Unmetallised	17
2.5	ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Metal-Complex Azo	18
2.6	ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Anthraquinone	18
2.7	ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Phthalocyanine	18
2.8	ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Bifunctional	18
2.9	ตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อมที่มีความเป็นพิษสูง	24
2.10	กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์	29
2.11	ภาพแสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์	29
2.12	Langmuir Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง	33
2.13	Freundlich Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง	34
4.1	ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	58
4.2	ลักษณะพื้นที่ผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	60
4.3	กราฟมาตรฐานของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี Reactive Blue 19 และค่าการดูดกลืนแสง	61
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์กับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม	61
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม	62
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสีย้อมกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม	63
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสีย้อมกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม	64
4.8	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมระหว่างถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า	65
4.9	ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 แบบ Langmuir Isotherm	66
4.10	ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 แบบ Freundlich Isotherm	66

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
BOD	บีโอดี (ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี)
COD	ซีโอดี (ความต้องการออกซิเจนทางเคมี)
g	กรัม
g/cm <sup>3</sup>	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
mg	มิลลิกรัม
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
m <sup>2</sup> /g	ตารางเมตรต่อกรัม
nm	นาโนเมตร
Pt Co	หน่วยการวัดสี (Platinum Cobalt Unit)
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
SS	ปริมาณของแข็งแขวนลอย
TS	ปริมาณของแข็งละลายน้ำ
TSS	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
TKN	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด
%	เปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทยมีความเจริญก้าวหน้ามากขึ้น เนื่องจากอุตสาหกรรมการฟอกย้อมนั้นเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ในการผลิตวัตถุดิบไปเข้าสู่กระบวนการของการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่าย ตามความต้องการของผู้บริโภค (รัตนาวดี, 2557) โดยอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มสามารถสร้างรายได้ให้แก่ประเทศโดยการส่งออกไปต่างประเทศรวมสองแสนห้าหมื่นล้านบาท โดยส่งออกไปยังประเทศอเมริกาสูงสุด รองลงมาได้แก่ ฮองกง จีน เวียดนาม ญี่ปุ่น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) ซึ่งในกระบวนการผลิตจะต้องใช้น้ำในปริมาณมาก จึงก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก โดยสิ่งเจือปนในน้ำเสียส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมี เนื่องจากเทคโนโลยีปัจจุบันยังไม่สามารถใช้สีย้อมในการย้อมหรือพิมพ์ผ้าได้หมดร้อยเปอร์เซ็นต์ เกิดเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง (ไพฑิพย์, 2547) สีในน้ำทิ้งที่ถูกปล่อยจะก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ, ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง, ขัดขวางการเดินทางของแสงที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช และความเป็นพิษของตัวสีย้อมบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง (รัชนิย์, 2544)

สีย้อมมีการแบ่งจำแนกออกเป็นออกเป็น 11 ประเภทตามวิธีใช้ คือ สีเอซิด สีไดเรกต์ สีเบสิก สีดิสเพอร์ส สีรีแอกทีฟ สีอะโซอิก สีแว็ต สีมอร์แดนท์ และสีซัลเฟอร์ โดยส่วนที่ทำให้เกิดสีเรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophore) โดยที่สีย้อมจะมีทั้งที่เป็นอออนลบ และอออนบวก โดยโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้สีฟอกย้อมประเภทสีรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยได้ดี โดยจะมีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยแล้วเชื่อมติดกันโดยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงก์กับเส้นใยได้สารประกอบใหม่ขึ้น ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป (พงษ์ศักดิ์, 2555) วิธีการบำบัดสีฟอกย้อมในน้ำเสียสามารถทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็น การตกตะกอนทางเคมี กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น สำหรับวิธีการบำบัดโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูง และทำง่าย แต่ถ่านกัมมันต์มีราคาสูง

การบริโภคกาแฟของคนไทย มีปริมาณการดื่มกาแฟเฉลี่ย 130-150 แก้วต่อคนต่อปี (วรสิทธิ์, 2552) ส่งผลให้ปริมาณกากกาแฟที่เป็นขยะอินทรีย์มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กากกาแฟสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ใช้ในการขจัดผิว ใช้เป็นปุ๋ยใส่ต้นไม้ ใช้สระผมเพื่อเพิ่มความเงางาม ใช้ดับ

กลิ่น เป็นต้น ในกากกาแฟประกอบด้วย ความชื้น 5.36%, เถ้า 3.16%, Extractible 22.17%, ลิกนิน 8.78%, เซลลูโลส 25.39%, เฮมิเซลลูโลส 37.33% ซึ่งเหมาะสมในการนำมาแปรรูปเป็น ถ่านกัมมันต์ (ชลธิชา และคณะ, 2554) ที่จะนำไปใช้ในการดูดซับสีฟอกย้อมในน้ำเสีย

ในงานวิจัยนี้ได้นำกากกาแฟซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์และศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลาง และนำมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และถ่านกัมมันต์ทางการค้า
- 2) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 จากสภาวะที่เหมาะสม ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาคุณสมบัติถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า
  - ลักษณะพื้นที่ผิวจากการสังเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้
  - ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม
  - ความเข้มข้นของสีย้อม 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - ค่าพีเอช 2.0, 4.0, 7.0, 9.0 และ 11.0
  - ระยะเวลาสัมผัส 0, 30, 60, 120, 150, และ 180 นาที
- 3) ศึกษาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในสภาวะที่เหมาะสม
- 4) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าในสภาวะที่เหมาะสม
- 5) ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งแบบ Langmuir และแบบ Freundlich โดยกำหนดน้ำหนักของตัวดูดซับต่อปริมาณสารละลายเป็น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19

2) ประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

3) นำวัสดุเหลือทิ้งมาแปรรูปให้เกิดมูลค่า

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่อง การดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ ผู้ศึกษาได้รวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางในการศึกษา โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

- 2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับน้ำเสีย
- 2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกาแฟ
- 2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสีย้อม
- 2.4 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ
- 2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับน้ำเสีย (Wastewater) (วรรณวรรณ, 2546)

น้ำเสีย คือ น้ำที่ได้รับผลกระทบในด้านคุณภาพจากอิทธิพลของมนุษย์ ระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลจะระบายลงในท่อหรือคลองระบายน้ำ เพื่อส่งไปบำบัดที่โรงบำบัดน้ำเสียหรือลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีการปล่อยลงไปในแหล่งน้ำธรรมชาติต่อไปหรืออาจนำไปใช้ประโยชน์ทางใดทางหนึ่ง

#### 2.1.1 บทบาทหน้าที่ของชุมชนในการมีส่วนร่วม

การจัดการควรมีการร่วมมือกันภายในชุมชนในการวางแผนและสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพในการจัดการของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดคือ บ้านเรือน โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บรวบรวมและการแยกของเสียอันตราย จะเป็นการช่วยเจ้าหน้าที่ภายในท้องถิ่นในการป้องกันการปนเปื้อนของของเสียอันตรายไปสู่สิ่งแวดล้อม หรือไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย และน้ำใต้ดิน ดังนั้นประชาชนจึงควรมีส่วนร่วมและสนับสนุนการดำเนินการจัดการของเสียอันตรายจากบ้านเรือนของตนเองให้เหมาะสม อาทิเช่น

- เรียนรู้เกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียที่ท่านใช้อยู่ให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และบอกกล่าวให้ครอบครัวหรือเพื่อนได้รับรู้ด้วย

- เรียนรู้เกี่ยวกับระบบฝังกลบของชุมชนและโปรแกรมพิเศษสำหรับจัดการของเสียอันตราย

#### 2.1.2 ลักษณะของน้ำเสีย จำแนกออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

##### 2.1.2.1 ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ

ประกอบไปด้วย ปริมาณของแข็งทั้งหมด กลิ่น อุณหภูมิ สี และความขุ่น ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำเสียทางกายภาพได้ โดยดูจากปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณ

ของแข็งที่แขวนลอย (TSS, Total Suspended Solids) และปริมาณของแข็งละลาย (TDS, Total Dissolved Solids) ค่าปริมาณของแข็งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสกปรกและความหนาแน่นของน้ำเสียได้ และยังสามารถบอกลักษณะประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ ที่เลือกใช้ในการบำบัดได้

ก. กลิ่น ส่วนมากจะมาจากก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เช่น ก๊าซไข่เน่าเกิดจากจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจน โดยทำการเปลี่ยนสภาพของซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ ในการกำจัดกลิ่นในน้ำเสียอาจใช้สารเคมีที่สามารถออกซิไดซ์สารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้ เช่น คลอรีน หรือการใช้ผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ข. อุณหภูมิของน้ำ เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นกว่าปกติ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาชีวเคมีของพวกจุลินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำถูกใช้เพิ่มมากขึ้น และทำให้การเจริญเติบโตของพืชที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำมีมากกว่าปกติ นอกจากนี้ยังมีผลให้การละลายของออกซิเจนในน้ำลดลง เนื่องจากค่าอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจะลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ค. สี สีของน้ำเสียเป็นปัญหาเนื่องจากโรงงานหลายแห่ง เช่น โรงงานทอผ้า โรงงานสีย้อม และอื่นๆ ปล่อยน้ำเสียออกมา หรือสีเขียวซึ่งเกิดจากการเกิดสาหร่ายหลายๆ ในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดผลเสีย คือ จะเป็นตัวกั้นขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงใต้น้ำ ทำให้แหล่งน้ำมีสีไม่น่าดู เนื่องจากสามารถมองเห็นสีของน้ำเสียได้ด้วยตาเปล่า

ง. ความขุ่น เกิดจากการมีสารแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ จะกั้นหรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงใต้น้ำ

#### 2.1.2.2 ลักษณะน้ำเสียทางเคมี

ประดว้ยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ น้ำเสียที่มาจากบ้านเรือน จะประกอบด้วย 50% ของสารอินทรีย์และ 50% ของสารอนินทรีย์

ก. สารอินทรีย์ ส่วนประดว้ที่สำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากชุมชน คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันและน้ำมัน และปริมาณเล็กน้อยของผงซักฟอก สารประดว้ฟีนอลและยาปราบศัตรูพืช

ข. สารอนินทรีย์ ได้แก่ คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟต โลหะหนัก ก๊าซ และสภาพความเป็นกรดและเบสของน้ำเสีย เป็นต้น

ค. คลอไรด์ ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำเสีย ถ้ามีไม่มากจนเกินไป จะไม่มีอันตรายต่อมนุษย์ แต่จะมีผลทำให้น้ำมีรสเค็มเท่านั้น โดยปกติในน้ำประปาไม่ควรให้มีความเข้มข้นของคลอไรด์เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ง. ไนโตรเจน ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญธาตุหนึ่งต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพจำเป็นต้องมีไนโตรเจนอย่างพอเพียงแต่ถ้ามีมากเกินไปจะมีผลทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตมากหรือเรียกว่าสาหร่ายเบ่งบาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณของไนโตรเจนของน้ำให้เหมาะสม

จ. ฟอสฟอรัส เป็นธาตุหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำเช่นเดียวกับไนโตรเจน ดังนั้นจึงต้องควบคุมปริมาณของฟอสฟอรัสให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นจะก่อปัญหาทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียได้เช่นเดียวกับไนโตรเจน

ฉ. พีเอช (pH) เป็นค่าที่แสดงปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไฮโดรเจน  $[H^+]$  ในน้ำ ใช้บอกความเป็นกรดหรือด่างของน้ำทิ้ง เป็นค่าที่มีความสำคัญในการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมี ฟิสิกส์และชีววิทยา และจำเป็นต้องควบคุมค่าพีเอชของน้ำทิ้งให้คงที่หรือควบคุมให้อยู่ในช่วงที่จำกัดไว้

ช. สภาพกรดและสภาพด่าง (acidity and alkalinity) สภาพกรดของสารละลายใดๆ คือความสามารถของสารละลายนั้นในการแตกตัวให้โปรตอน น้ำทิ้งที่มีสภาพกรด คำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรของแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีค่าพีเอชต่ำกว่า 8.2 สภาพด่างของสารละลายใดๆ คือความสามารถของสารละลายนั้นในการรับโปรตอน สภาพด่างของน้ำธรรมชาติหรือน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภคเกิดขึ้นจากองค์ประกอบของสารละลายไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ น้ำทิ้งที่มีสภาพด่าง คำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จะมีพีเอชสูงกว่า 4

ซ. ซัลเฟอร์ มีอยู่ในน้ำธรรมชาติและในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากเป็นองค์ประกอบในกรดอะมิโนของโปรตีน ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของ organic sulfur เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ธาตุซัลเฟอร์และสารซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นจากการย่อยสลายน้ำเสียและการกัดกร่อนต่อสภาพแวดล้อม

ณ. โลหะหนัก เป็นสารซึ่งมีพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่มีโลหะหนักบางชนิดที่มีความจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต แต่ต้องได้รับในปริมาณที่พอเหมาะ ถ้ามากเกินไปจะเป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสี เป็นต้น สำหรับโลหะหนักบางชนิดที่ไม่เป็นที่ต้องการและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว ปรอทและนิกเกิล เป็นต้น

ญ. ก๊าซ ที่พบในน้ำเสียโดยมากจะเป็นพวกไนโตรเจน ออกซิเจน คาร์บอน ไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนียและมีเทน ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่มีอากาศ (anaerobic) และตัวการที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นในน้ำเสีย คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนียและมีเทน ถ้าสารซัลไฟด์ไปรวมตัวกับเหล็กจะเกิดเป็นเฟอร์รัสซัลไฟด์ซึ่งทำให้น้ำเสียมีสีดำเกิดขึ้น

ฎ. ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO, Dissolved Oxygen) ออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ น้ำธรรมชาติที่มีคุณสมบัติดีจะมีค่า DO ประมาณ 5-7 ppm แต่ถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การละลายของออกซิเจนลดลงหรือ ถ้าในน้ำมีสิ่งมีชีวิตที่ต้องการออกซิเจนมาก ก็มีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงเช่นกัน ซึ่งค่าความต้องการออกซิเจนในน้ำจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำ คือ ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี เป็นค่าที่ใช้วัดปริมาณออกซิเจนซึ่งใช้โดยแบคทีเรียเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ และความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD,

Chemical Oxygen Demand) เป็นค่าที่ใช้วัดปริมาณสารอินทรีย์ที่มีในน้ำด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

### 2.1.2.3 ลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา

ประดัวจุลินทรีย์มากมายหลายชนิดเจริญอยู่จุลินทรีย์ที่พบในน้ำเสียทั่วไป ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่าย ฟังไจ โปรโตซัว โรทีเฟอร์ คัสตาเซียนและไวรัส เป็นต้น

### 2.1.3 สาเหตุของมลพิษทางน้ำ

ก. ธรรมชาติ แหล่งน้ำต่างๆ อาจเกิดจากการเน่าเสียได้เองเมื่ออยู่ในภาวะที่ขาดออกซิเจน ส่วนใหญ่มีสาเหตุเกิดจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน แล้วตายลงพร้อม ๆ กันเมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายซากแพลงค์ตอนทำให้ออกซิเจนในน้ำถูกนำไปใช้มาก จนเกิดการขาดแคลนได้ นอกจากนี้การเน่าเสียอาจเกิดได้อีกประการหนึ่งคือ เมื่อน้ำอยู่ในสภาพนิ่งไม่มีการหมุนเวียนถ่ายเท

ข. น้ำทิ้ง และสิ่งปฏิกูลจากแหล่งชุมชน ได้แก่ อาคาร บ้านเรือน สำนักงาน อาคารพาณิชย์ โรงแรม เป็นต้น สิ่งปะปนมากับน้ำทิ้งประกอบด้วยสารอินทรีย์ซึ่งจะถูกย่อยสลายโดยผู้ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สำคัญคือ แบคทีเรีย ซึ่งมีทั้งแบคทีเรียแอโรบิก (aerobic bacteria) กับแบคทีเรียแอนาโรบิก (anaerobic bacteria) อีกชนิดหนึ่งคือ แบคทีเรียแฟคัลเตติฟ (facultative bacteria) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนในสภาวะ แวดล้อมนั้น บทบาทในการย่อยสลายสารเหล่านี้ของแบคทีเรียแอโรบิกต้องใช้ออกซิเจน ในปริมาณมาก ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (ดีโอ DO = dissolved oxygen) ลดลงต่ำมาก ทำให้ออกซิเจนในน้ำเหลืออยู่น้อย ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นและสีของน้ำ เปลี่ยนไปนอกจากสารอินทรีย์แล้ว ตามแหล่งชุมชนยังมีผงซักฟอกซึ่งเป็นตัวลดความตึงผิว ของน้ำ ซึ่งหมุนเวียนไปสู่คนได้ทางโซ่อาหาร

ค. การเกษตร เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีน้ำเสีย เช่น การเลี้ยงสัตว์ เศษอาหารและน้ำทิ้งจากการชำระคอกสัตว์ ทิ้งลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง ซึ่งก่อให้เกิดโรคระบาด การใช้ปุ๋ยไนเตรตของเกษตรกร เมื่อปุ๋ยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้มีปริมาณเกลือไนเตรตสูงถ้าดื่มเข้าไปจะทำให้เป็นโรคพิษไนเตรต อาจทำให้เกิดอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้เกษตรกรนิยมใช้สารกำจัดศัตรูพืชมากขึ้น สารที่ตกค้างตามต้นพืช และตามผิวดิน จะถูกชะล้างไปกับน้ำฝนและไหลลงสู่แหล่งน้ำ สารที่ละลายตัวจะสะสมในแหล่งน้ำ นั้นมากขึ้นจนเป็นอันตรายได้

ง. โรงงานอุตสาหกรรม ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานปลาป่น โรงงานผลิตภัณฑ์นม โรงไม้แป่ง โรงงานทำอาหารกระป๋อง ส่วนใหญ่มีสารอินทรีย์พวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ปนอยู่มากสารอินทรีย์ที่ถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งนี้ก็จะถูกย่อยสลายทำให้เกิดผล เช่นเดียวกับน้ำทิ้งที่ถูกปล่อยจากชุมชน นอกจากนี้ยังมีสารพิษชนิดอื่นปะปนอยู่ด้วย ขึ้นอยู่กับ ประเภทของโรงงาน เช่น พรอทจากโรงงานผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารพิษต่อสัตว์น้ำ และผู้นำสัตว์น้ำไปบริโภค นอกจากนี้ น้ำทิ้งจากโรงงานบางประเภท ทำให้สภาพกรดเบส ของแหล่งน้ำนั้นเปลี่ยนไป เช่นน้ำทิ้ง

จากโรงงานกระดาษมีค่า pH สูงมาก น้ำทิ้งจากโรงงาน บางประเภท เช่นจากโรงไฟฟ้าอาจทำให้ อนุภูมิภาคของน้ำเปลี่ยนแปลงไป สภาพเช่นนี้ไม่ เหมาะกับการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตในน้ำ

จ. การคมนาคมทางน้ำ ในการเดินเรือตามแหล่งน้ำ ลำคลอง ทะเล มหาสมุทร มีการทิ้งของ เสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ และน้ำมันเชื้อเพลิงถ้ามีโอกาสรั่วไหลลงน้ำได้และมีจำนวนมาก ก็จะทำให้สัตว์น้ำขาดออกซิเจน และเป็นผลเสียต่อระบบนิเวศ

#### 2.1.4 การบำบัดน้ำเสีย (กัณฑ์, 2547)

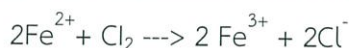
การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมี คุณสมบัติไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 3 วิธี คือ

##### 2.1.4.1 กระบวนการทางเคมี (chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้วทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

ก. การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวก เพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้เมื่อเมื่อไม่สามารถ แยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ

ข. การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน  $Fe^{2+}$  ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร  $Fe^{3+}$  ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



ค. การเกิดรีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออนของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น การเปลี่ยน  $Cr^{6+}$  ซึ่งมีพิษมากไปเป็น  $Cr^{3+}$  ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



ง. การสะเทิน (neutralization) เป็นการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสียให้มีฤทธิ์เป็นกลาง (pH = 7) ถ้าต้องการปรับค่าน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด (pH < 7) ในน้ำเสียให้สูงขึ้นต้องเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกรณีถ้าต้องการปรับน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (pH > 7) ให้มีค่า pH ต่ำลงจะต้องเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดเกลือและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

#### 2.1.4.2 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)

เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

#### 2.1.4.3 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถุงพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นต้นแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

#### 2.1.4.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process)

เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

- การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

- การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีการลำเลียงน้ำภายใน

## 2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกาแฟ

### 2.2.1 ลักษณะเมล็ดกาแฟ

เมล็ดกาแฟเมื่อผ่านการคั่วแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเมล็ดกาแฟต้องผ่านกระบวนการก่อนที่จะกลายมาเป็นเมล็ดกาแฟคั่ว ขั้นตอนเบื้องต้น คือ

- การเก็บเมล็ดกาแฟที่สุกเต็มที่ โดยใช้มือเก็บ
- การคัดแยกเมล็ดกาแฟที่สุกและไม่สุกออกจากกัน
- การแยกเปลือกและเมล็ดกาแฟ
- การหมักเมล็ดกาแฟเพื่อกำจัดชั้นเมือกบาง ๆ ที่เกาะอยู่ตามเมล็ดกาแฟ
- การล้างทำความสะอาดเมล็ดกาแฟโดยใช้น้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูงเพื่อกำจัดกากที่เกิดจากการหมัก

หมัก

- การตากเมล็ดกาแฟให้แห้ง เพื่อให้ได้เมล็ดดิบของกาแฟ
- บรรจุพร้อมนำออกจำหน่าย

### 2.2.2 สายพันธุ์ของกาแฟ

กาแฟมีสายพันธุ์หลักๆ 2 พันธุ์ คือ



ก



ข

รูปที่ 2.1 ลักษณะของกาแฟแต่ละสายพันธุ์

ก. กาแฟพันธุ์โรบัสต้า

ข. กาแฟพันธุ์อาราบิก้า

ก. โรบัสต้า (Robusta หรือ Coffea Canephora)

โรบัสต้าเป็นพันธุ์กาแฟที่ทนทานต่อโรคและสภาพดินฟ้าอากาศ แต่มีรสชาติและกลิ่นเข้มกระด้าง ไม่อ่อนละมุนเหมือนกาแฟอาราบิก้า มีคาเฟอีน 2-3% ต่อน้ำหนัก และเนื่องจากมีรสชาติเข้มนี้เองที่ทำให้กาแฟโรบัสต้าเป็นที่นิยมในการผลิตกาแฟสำเร็จรูป หรือกาแฟพร้อมดื่ม เช่น กาแฟกระป๋อง ลักษณะเฉพาะของเมล็ดกาแฟ โรบัสต้า จะอ้วนกลม กลิ่นฉุนเหมือนเมนทอล ให้รสชาติที่

เข้มข้น ในกาแฟโรบัสต้ามีปริมาณแทนนิน มากกว่ากาแฟอาราบิก้าโดยมีค่า 3.1 และ 2.9% ตามลำดับ

ข. อาราบิก้า (Arabica หรือ Coffea Arabica) (ดร.พรพรรณ และคณะ, 2557)

อาราบิก้าเป็นพันธุ์กาแฟที่คนนิยมมากที่สุด มีลักษณะเด่นที่มีกลิ่นและรสชาติหอมหวานเป็นที่นิยมของคนทั่วโลก มีรสชาติที่กลมกล่อมไม่ขม มีสารคาเฟอีนน้อยประมาณ 1-1.6% ต่อน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะของเมล็ดกาแฟ อาราบิก้าจะมีทรงรียาว มีกลิ่นหอม รสชาติกลมกล่อม



รูปที่ 2.2 ลักษณะของกาแฟ

- ก. ต้นกาแฟ
- ข. ผลกาแฟ
- ค. เมล็ดกาแฟ

กาแฟเป็นไม้พุ่มยืนต้น ขนาดปานกลางสูง ประมาณ 3-4 เมตร ใบสีเขียวแตกออกจากข้อเป็นคู่ๆ ดอกออกตามข้อของกิ่งมีสีขาวบริสุทธิ์ กลิ่นหอมต้นกาแฟในประเทศไทยเริ่มออกดอกในเดือน ตุลาคม - กุมภาพันธ์ ระยะเวลาตั้งแต่การออกดอกถึงการเก็บเกี่ยวใช้เวลาประมาณ 8-12 เดือน หลังจากปลูกกาแฟได้ 2-3 ปี กาแฟจะเริ่มออกดอกและติดผล ผลของกาแฟเรียกว่า Coffee Cherry มีลักษณะค่อนข้างกลม ขณะที่ผลยังอ่อนมีสีเขียว และเมื่อผลแก่จัดจะมีสีแดง ในแต่ละข้อของกิ่ง กาแฟติดผลประมาณ 10-60 ผล แต่ละผลมีเมล็ดกาแฟอยู่ 2 เมล็ดโดยส่วนแบนของเมล็ดประกบติดกัน เมื่อเก็บผลเชอร์รี่แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการลอกเปลือก เพื่อให้ได้เมล็ดกาแฟ ซึ่งมี 2 กรรมวิธี คือ

กรรมวิธีตากแห้ง (Dry Method) เป็นการนำผลเชอร์รี่มาตากแห้ง ใช้เวลาประมาณ 15 วัน จากนั้นจึงทำการกะเทาะเปลือกออกอีกครั้งหนึ่ง

กรรมวิธีแช่น้ำ (Wet Method) คือ การนำผลเชอร์รี่แช่น้ำ เสร็จแล้วนำเข้าเครื่องกะเทาะเปลือก จากนั้นนำมาตากแห้ง หรือเข้าเครื่องอบ วิธีนี้ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีตากแห้ง (Dry Method)

### 2.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของกาแฟดิบและการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการผลิต

ผลจากการวิเคราะห์กาแฟ arabica ดิบ แสดงองค์ประกอบทางเคมีคือ

ก. องค์ประกอบหลัก

- ความชื้น 12%
- คาโบไฮเดรต มากกว่า 50%
- ไขมัน 16%
- โปรตีน 10%

ข. องค์ประกอบย่อยที่สำคัญคือ

- คาเฟอีน 1.2%
- กรดคลอโรเจนิก 6.5%
- อนุพันธ์เอสเทอร์ของโพลีฟีนอล คาเฟอิกแอซิด และ ควินิกแอซิด

องค์ประกอบที่แตกต่างกันระหว่าง โรบัสตา เมื่อเทียบกับ อราบิกา คือ โรบัสตาจะมี คาเฟอีน และ กรดคลอโรเจนิก มากกว่า ในขณะที่มี ไขมันน้อยกว่า โดยสำหรับกาแฟที่มีการปลอมปนระหว่าง โรบัสตาที่ถูกกว่ากับ อราบิกา สามารถที่จะตรวจสอบได้อย่างแม่นยำด้วยการวิเคราะห์ทางคุณภาพของสารในกลุ่ม diterpene และ 16-methoxycafetol ซึ่งพบเฉพาะในสายพันธุ์ canephora (โรบัสตา)

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่มีผลกับร่างกาย และ อารมณ์ของคนเรา โดยนักวิทยาศาสตร์พบว่า caffeine จะออกฤทธิ์ โดยตรงต่อระบบประสาทส่วนกลาง สำหรับผู้รักกาแฟที่ปรารถนาที่จะลดปริมาณของคาเฟอีนที่มีอยู่ในกาแฟ ในทางอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนากระบวนการที่จะลดปริมาณของคาเฟอีนโดยตรงจากเมล็ดกาแฟดิบ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่อาศัยหลักการง่าย ๆ คือ นำเมล็ดกาแฟดิบมาสกัดคาเฟอีนออกด้วยตัวทำละลายหลายๆตัว ตามด้วยการระเหยตัวทำละลายออก ก็จะได้คาเฟอีนที่ถูกแยกออกจากเมล็ดกาแฟ แต่ด้วยกระบวนการนี้กลิ่นหอมบางส่วนจะถูกสกัดออกมาด้วย

นอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์ยังพบว่าในเมล็ดกาแฟดิบยังมีสารที่เป็นประโยชน์กับร่างกายอีกมากมายเช่น trigonelline, วิตามิน บี3, วิตามิน อี แต่สารเหล่านี้ได้สลายตัวไประหว่างกระบวนการแปรรูป

สารประกอบในกลุ่ม phenolic compound ก็พบในเมล็ดกาแฟดิบเช่นกัน เช่น chlorogenic, caffeic, p-coumaric จะมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ด้านอาการบวม (antiinflammatory) หรือแม้แต่ต้านมะเร็ง (anticancer) ซึ่งการวิจัยเมื่อเร็วนี้ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการคั่วเมล็ดกาแฟดิบในระยะ medium-dark จะพบสารในกลุ่ม antioxidant อยู่ แต่เมื่อกระบวนการดำเนินต่อไปจนเสร็จ สารดังกล่าวได้ถูกทำลายไป

นอกจากนี้ปฏิกิริยา pyrolytic reaction ที่เกิดขึ้นยังทำให้เกิด การสลายตัวของ กรดคลอโรเจนนิค ได้สารโมเลกุลเล็ก ระเหยง่าย ที่มีกลิ่นหอม เป็นที่มาของกลิ่นในกาแฟสำเร็จรูปนั่นเอง อย่างไรก็ตาม pyrolytic reaction ไม่ได้ทำให้ปริมาณของ คาเฟอีน และ ไขมัน ลดลงไปด้วย

## 2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสีย้อม (รัชเนีย, 2544)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหิน ผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อม มีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (substantivity) กับเส้นใยแล้ว เกิดพันธะ (bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ,แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force), แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิดสีของสีย้อม สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจาก การเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

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

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

### 2.3.1 การจำแนกประเภทของสีย้อม [14]

#### 2.3.1.1 การจำแนกตามการแตกตัวให้ประจุ

- ประจุลบ (Anionic) ได้แก่สี Direct, Reactive, Acid, Vat, Sulphur
- ประจุบวก (Cationic) ได้แก่สี Basic

- ไม่มีประจุ (Non-ionic) ได้แก่ สี Disperse

### 2.3.1.2 การจำแนกตามเส้นใยที่ใช้ย้อม

- เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เช่น ฝ้าย ลินิน ปอ ป่าน สีที่ใช้ย้อมได้แก่ สี Direct, Reactive, Vat, Sulphur

- เส้นใยโปรตีน (Protein) เช่น ไหม ขนสัตว์ สีที่ใช้ย้อมได้แก่ สี Acid, Basic

- เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic) เช่น โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะคริลิก สีที่ใช้ย้อมได้แก่ สี Disperse, Acid, Basic

### 2.3.1.3 การจำแนกตามสีที่มองเห็น เช่น สีน้ำเงิน สีแดง สีส้ม สีดำ สีเหลือง สีชมพู เป็นต้น

2.3.1.4 การจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ เป็นการจำแนกที่นิยมกันมากที่สุด ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ

1. สีไดเร็กต์ (Direct Dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใย เซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วย พันธะไฮโดรเจน เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถย้อมติดใยฝ้ายโดยตรงไม่ต้องเติมสารช่วยย้อมใดๆ ปัจจุบันมีการใช้เกลือเข้าช่วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้การย้อมดีขึ้น สีไม่ทนต่อการซักน้ำ แดงง่าย ทนแสง

2. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็น ด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่างกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส สีติดทนในทุกสภาวะ

3. สีแวต (Vat Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแวตละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแวตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือ จึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแวตที่ไม่ละลายน้ำอย่างเดิม สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

4. สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

5. สีเอซิด (Acid Dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น

ปอ ป่าน ไนลอน โยขน แกะ ไหม และอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีอะซิติกไม่ทนต่อการซัก ไม่ทนเหงื่อ

6. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตด เส้นใยโพลีเอสเตอร์ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง เป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอก ค่อนข้างดีแต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรสออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) และสีย้อมแอมมีโน แอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (ethanolamine;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

7. สีเบสิก (Basic or Cationic Dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนต่อการซัก และแสง บางทีจะเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่าสีแคคไดออน

8. สีอะโซอิก (Azoic Dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (Coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตด สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

9. สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or Chrome Dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลาย โมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้ จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

10. สีโลหะ (Metalic Dye) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส เมื่อย้อมแล้วต้องทำสารนี้ให้ตกตะกอนภายในเส้นใย ตัวอย่างที่ดีได้แก่ mineral khaki เป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์และโครเมียมรวมกัน

11. สีโอเนียม (Onium Dye) ปกติสีตัวนี้นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสีที่สามารถทำให้ละลายได้ในน้ำ รูปแบบการย้อมคล้ายกับสีแวต คือต้องทำให้สีย้อมกลับคืนรูปเดิมด้วยการออกซิไดซ์กลับคืน

### 2.3.2 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dye) (ชลธิชา, 2545)

#### 2.3.2.1 ประวัติของสีรีแอคทีฟ

ในปี 1884 ได้มีการค้นพบสีย้อมที่สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้โดยตรง ได้แก่ สีแวต และสีซัลเฟอร์ ความพยายามในช่วงต่อมา คือ การทำให้สีที่ไม่ละลายน้ำเหล่านี้สามารถละลายน้ำและติด

กับเส้นใยได้ นอกจากนี้ยังมีการค้นคว้าเพื่อหาวิธียอมให้สีเกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับเส้นใยเซลลูโลส นักค้นคว้าได้พยายามทุกวิถีทาง ตั้งแต่การใช้สารเคมีราคาแพง กระบวนการยอมสีที่สลับซับซ้อน ใช้สารละลายที่อันตราย แต่ความพยายามต่างๆ เหล่านี้กลับไม่เกิดผลทางด้านเทคนิคเลย จวบจนในช่วงต้นของทศวรรษที่ 50 คือในปี พ.ศ. 1952 ได้มีการวางจำหน่ายสีไวโนลซัลโฟน (Vinylsulphone) ที่ทำปฏิกิริยาติดกับเส้นใยจำพวกขนสัตว์ (wool) ต่อมาบริษัทอิมพีเรียลเคมีคัลอินคอร์เปอร์เรชั่น (ICI) ประสบความสำเร็จในการคิดค้นกระบวนการยอมเส้นใยฝ้ายด้วยสีรีแอคทีฟ และได้วางจำหน่ายสีรีแอคทีฟชนิดแรกในปี ค.ศ. 1956 คือ สี Procion

### 2.3.2.2 คุณสมบัติทั่วไปของสีรีแอคทีฟ (พงษ์ศักดิ์, 2555)

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และยอมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่ยอมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี ( $\text{OH}^-$ ) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงค์ (cross link) กับเซลลูโลส ได้สารประกอบชนิดใหม่ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

### 2.3.2.3 โครงสร้างเคมีของสีรีแอคทีฟ

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วย 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่าย คือ

#### S-D-T-X

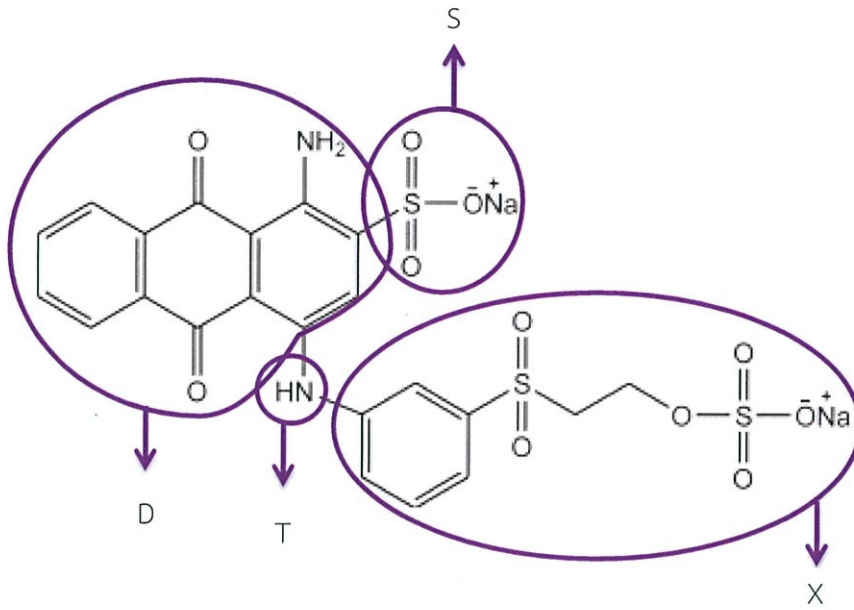
เมื่อ S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิก ( $-\text{SO}_3\text{Na}$ ) ซึ่งอาจมีกลุ่มเดียวหรือมากกว่าหนึ่งกลุ่ม

D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส

T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่างเช่น หมู่  $-\text{NH}$ ,  $-\text{NHCO}$ ,  $-\text{SO}_2$ ,  $-\text{NHSO}_3$ , และ  $-\text{NCH}_3$  เป็นต้น

X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สียอมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี ( $\text{OH}^-$ ) ของเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟอาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี Bridging group ก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic ring ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามี 2 ส่วนที่สำคัญ คือ สารที่ทำให้เกิดสีและกลุ่มรีแอคทีฟ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างสีย้อมรีแอคทีฟ แสดงดังรูปที่ 2.3

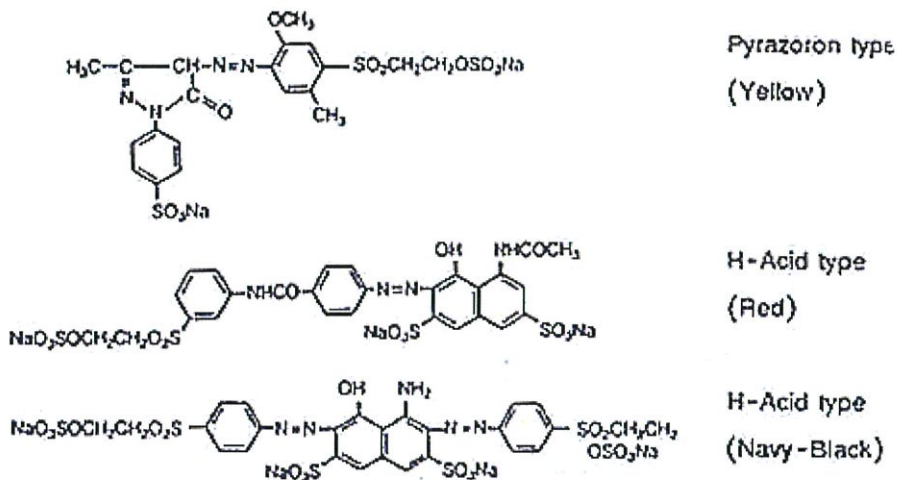


รูปที่ 2.3 โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 19

2.3.2.4 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

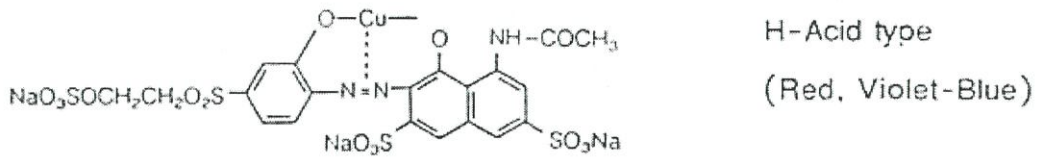
กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีเอซิด โดยแบ่งตามโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

1.) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสีรีแอคทีฟส่วนใหญ่ จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก



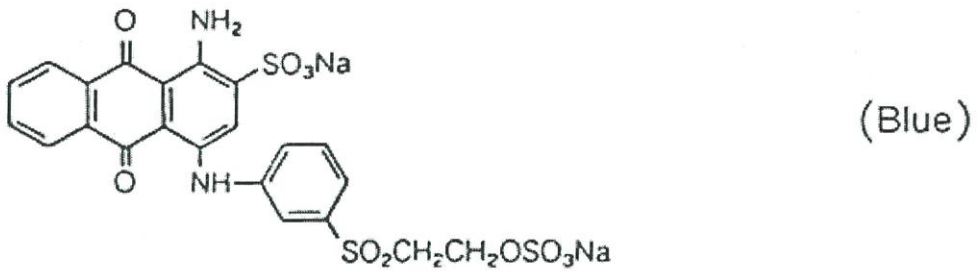
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Unmetallised Azo

2) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.4



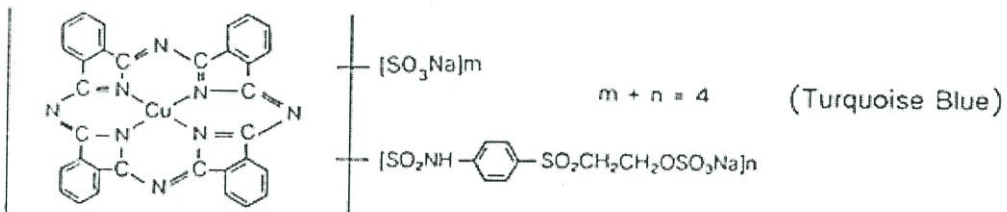
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Metal-Complex Azo

3) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



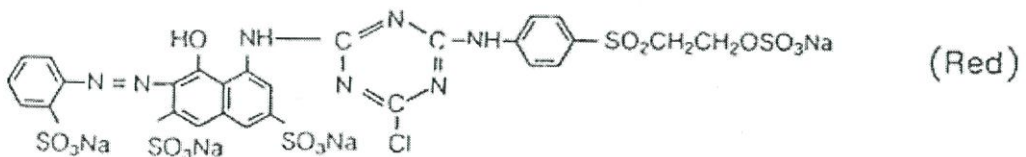
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Anthraquinone

4) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Phthalocyanine

5) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีที่มีกลุ่มรีแอคทีฟแบบ Bifunctional ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสีที่มีกลุ่มโครโมฟอร์แบบ Bifunctional

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า กลุ่มสารที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมรีแอคทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอคทีฟนั้นแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอคทีฟ

Chemical Class	% การกระจายของโทนสี								% ของสีย้อมรีแอคทีฟทั้งหมด
	เหลือง	ส้ม	แดง	ม่วง	ฟ้า	เขียว	น้ำตาล	ดำ	
Unmetallised Azo	97	90	90	63	20	16	57	42	66
Metal-Complex Azo	2	10	9	32	17	5	43	55	15
Anthraquinone				5	34	37		3	10
Phthalocyanine					27	42			8
Miscellaneous	1		1		2				1
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100

ที่มา: ชลธิชา, 2545

จากตารางข้างต้น จะเห็นได้ว่าสีย้อมรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิด Azo (Unmetallised Azo และ Metal-Complex Azo) เป็นส่วนมาก โดยสูงถึงร้อยละ 81 และถ้าไม่รวมสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโทนสีฟ้าและเขียว ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ประเภท Anthraquinone และ Phthalocyanine เป็นส่วนใหญ่แล้ว พบว่าสีย้อมรีแอคทีฟจะมีกลุ่มอะโซเป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม ถ้าสามารถลดสีในน้ำเสียลงได้ การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมรีแอคทีฟในกลุ่มอะโซจึงเป็นงานที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

#### 2.3.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของสีย้อมรีแอคทีฟ

ในกระบวนการฟอกย้อมสีย้อมรีแอคทีฟ มีจุดประสงค์สำคัญคือ การทำให้สีสามารถแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยให้มากที่สุด และเกิดการไฮโดรไลซิสในน้ำน้อยที่สุด ทั้งนี้ไม่เพียงเพื่อเป็นการประหยัดเท่านั้น ยังทำให้เส้นใยไม่ดูดสีที่ไฮโดรไลซ์แล้วเข้าไปในเส้นใย ซึ่งจะทำให้ไม่คงทนเมื่อผ่านกระบวนการใช้น้ำ เพราะถ้าให้สีไฮโดรไลซ์มาก การซักในขั้นสุดท้ายก็ทำให้สะอาดหมดจดได้ยาก จึงจำเป็นต้องซักเอาสีพวกนี้ออกให้หมด เพื่อจะทำให้สีไม่ตกเวลาใช้การไฮโดรไลซ์ของสี คือ การทำปฏิกิริยาของสีกับไฮดรอกไซด์อ่อนในน้ำ มักจะเป็นปฏิกิริยาที่แข่งขันกับการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยสามารถเกิดได้ก็ต่อเมื่อสีสามารถดูดซึมเข้าไปในเส้นใย ดังนั้น

ความเร็วของปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยจึงขึ้นอยู่กับความเร็วในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใยของสี อัตราส่วนของความเร็วในการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย และระหว่างสีกับน้ำ จะมีค่าคงที่สำหรับสีหนึ่ง ๆ แม้ในช่วงค่อนข้างกว้างของ pH ที่เป็นต่าง

ประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยขึ้นกับ

- 1) อัตราส่วนของความเร็วปฏิกิริยา ระหว่างสีกับเส้นใยต่อความเร็วปฏิกิริยาระหว่างสีกับน้ำ
- 2) ความเข้มข้นสัมพัทธ์ระหว่างสีที่ถูกดูดซึมเข้าไปในเส้นใยและสีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ
- 3) สัมประสิทธิ์การแพร่ของสีเข้าไปในเส้นใย
- 4) ปริมาณน้ำ พบว่า ยิ่งปริมาณน้ำน้อยจะเพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย
- 5) พื้นที่ผิวของเส้นใยสำหรับให้สีได้ถูกดูดซึม

จะเห็นว่าคุณสมบัติพื้นฐานของสีมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของสีกับเส้นใย ดังนั้นวิธีการย้อมสำหรับสีแต่ละชนิดจึงแตกต่างกันไป และตัวแปรที่ใช้ควบคุมก็จะแตกต่างกันไป ซึ่งสามารถแบ่งสีรีแอคทีฟได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของตัวแปรที่ใช้ควบคุมการย้อมได้ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 สีรีแอคทีฟที่ใช้ต่างเป็นตัวควบคุม (Alkali-Controllable Reactive Dyes) สีย้อมในกลุ่มนี้ต้องการอุณหภูมิในการย้อมประมาณ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส สีย้อมกลุ่มนี้มีลักษณะที่สำคัญคือ จะมีสีย้อมหลงเหลืออยู่น้อยในน้ำหลังการย้อมซึ่งมีสารละลายเกลือที่เป็นกลางอยู่ และยังไม่ได้เติมด่างสีย้อมเหล่านี้จะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่อมีการเติมด่าง ดังนั้นระดับการทำปฏิกิริยาจะสามารถควบคุมได้ด้วยปริมาณด่างที่เติม ตัวอย่างของสีกลุ่มนี้จะมีกลุ่มรีแอคทีฟพวก Dichlorotriazine, Chlorodifluoropyrimidine, Dichloroquinoxaline และ Vinylsulphone

- กลุ่มที่ 2 สีรีแอคทีฟที่ใช้เกลือเป็นตัวควบคุม (Salt-Controllable Reactive Dyes) สีย้อมในกลุ่มนี้ต้องใช้อุณหภูมิในการย้อมประมาณ 80 องศาเซลเซียส จนถึงน้ำเดือด สีย้อมกลุ่มนี้ จะมีหลงเหลือมากในน้ำหลังการย้อมที่ pH เป็นกลาง ดังนั้น ระดับเกลือที่เติมให้จึงมีความสำคัญมากต่อระดับการทำปฏิกิริยาของสีในการย้อม สามารถใช้เป็นตัวควบคุมการย้อมสีได้ สีย้อมประเภทนี้มักจะมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาต่ำ เช่น สีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟ Trichloropyrimidine, Aminochlorotriazine หรือ Bis (Aminochlorotriazine) ส่วนสีย้อม Aminofluorotriazine (Cibacron F) มีลักษณะที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้เช่นกัน แต่การย้อมสีกลุ่มนี้กลับมีประสิทธิภาพดีเมื่อย้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าโดยใช้กระบวนการย้อมแบบเบต (Batchwise)

- กลุ่มที่ 3 สีรีแอคทีฟที่ใช้อุณหภูมิเป็นตัวควบคุม (Temperature Controllable Reactive Dyes) สีย้อมกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือด ในสถานะที่ไม่มีด่าง แม้ว่าการใช้งานจริงสามารถใช้สภาวะการย้อมเดียวกับในกลุ่มที่ 2 ร่วมกับการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส สีย้อมประเภทนี้มีระดับการทำปฏิกิริยาของแต่ละสีเอง สารช่วยย้อมอื่นๆ ไม่มีความจำเป็นเท่าใดนัก การย้อมให้ได้ผลดีเพียงแต่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของ

อุณหภูมิเท่านั้นที่พอ ในปัจจุบันสีย้อมในกลุ่มนี้มีเพียงสีในกลุ่ม Kayacelon React ซึ่งมีโครงสร้างกลุ่มรีแอคทีฟเป็น Bis (Aminonicotinotriazine) เป็นองค์ประกอบ

### 2.3.3 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีสดใสสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อมและให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้อาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก นอกจากนี้ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีต่างๆในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาดสีย้อม สารช่วยย้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่กับประเภทของการผลิตและการเลือกใช้สารเคมี กระบวนการฟอกย้อมผ้า เป็นกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญทั้งในขั้นตอนการซัก ล้าง ฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างผ้าทอกับผ้าถักก็คือ การฟอกย้อมผ้าถักจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ดังนั้นกระบวนการเตรียมผ้าถักที่สำคัญ คือ การซักล้างทำความสะอาดก่อนทำขั้นตอนต่อไป

#### 2.3.3.1 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

จากข้อมูลของระบบเครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ในปี 2553 พบว่าลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไปมีดังต่อไปนี้

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจัดเป็นฝาคูลุมฝิวน้ำและสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียมักมีค่าบีโอดีประมาณ 100 - 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500 - 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. มีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพต่างสูง โดยมีค่าพีเอชประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอช และค่าสภาพต่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการจัดสิ่งสกปรกเจือปน
3. มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปน้ำเสียในกระบวนการฟอกย้อมจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อมและขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ
4. มีปริมาณ TS (ของแข็งละลายน้ำ) สูง ส่วนใหญ่ เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ
5. ความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมและจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

6. มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7. มีปริมาณ TSS (ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

8. มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	สี หน่วย Pt Co	
ด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ผ้าสัก	9.0	110	370	150	570	16
ผ้าทอ	8.6	400	1200	40	670	41
ด้ายและผ้าอื่น	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

ดัชนีวิเคราะห์	ลักษณะน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด			
	กรมโรงงานอุตสาหกรรม	กรมควบคุมมลพิษ	กรมชลประทาน	กรมเจ้าท่า
pH	5.5-9.0	5.5-9.0	6.5-8.5	5-9
BOD (mg/L)	<60	<60	<20	<20-60
COD (mg/L)	<400	<400	-	-
TS (mg/L)	<50	<50	<30	-
TKN (mg/L)	<100	<100	-	-
ปริมาณสี	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ

ที่มา: ชลธิชา, 2545

#### 2.3.4 มลพิษจากสีย้อม

สารเคมีและสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีอยู่มากมายหลายร้อยชนิด แต่ละชนิดก็มีความเป็นพิษและมลพิษที่แตกต่างกันไป ในช่วงเวลา 30 ปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติความเป็นพิษและมลพิษของสีย้อม และสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอไว้มากมาย

ทั้งที่รวบรวมจากผลการใช้จริงในอุตสาหกรรมและจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ สมบัติความเป็นพิษของ 28 สารที่ใช้มีความสำคัญไม่เพียงเฉพาะต่อความปลอดภัยของผู้ใช้เท่านั้น แต่ยังมีผลถึงมลพิษที่อาจจะเกิดจากการใช้สารนั้นด้วย การมีความรู้เกี่ยวกับความเป็นพิษของสารจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้สารที่มีผลกระทบต่อผู้ใช้และต่อสภาพแวดล้อมน้อยที่สุดโดยทั่วไป สีย้อมเป็นสารที่ได้ชื่อว่ามีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสิ่งพิมพ์ มีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางคือ โดยทางจมูก ด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง และโดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน ความเป็นพิษของสีย้อมหากรับประทานเข้าไปจะเห็นได้จากค่า LD<sub>50</sub> ในตารางที่ 2.4 ซึ่งหมายถึงปริมาณสารที่เมื่อให้กับหนูทดลอง จะมีหนูที่ถูกทดลองตายไป 50% ของจำนวนหนูทดลองที่ใช้ทั้งหมด สารที่มีค่า LD<sub>50</sub> ยิ่งต่ำแสดงว่ายิ่งมีความเป็นพิษสูง โดยความเป็นพิษของสารที่ค่า LD<sub>50</sub> ค่าต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ค่า LD<sub>50</sub> ของสีย้อมสิ่งทอ

ค่า LD <sub>50</sub> (มก./กก.)	ร้อยละของสีย้อมทั้งหมด
มากกว่า 5,000	82
2,000 – 5,000	10
ต่ำกว่า 250	น้อยกว่า 1

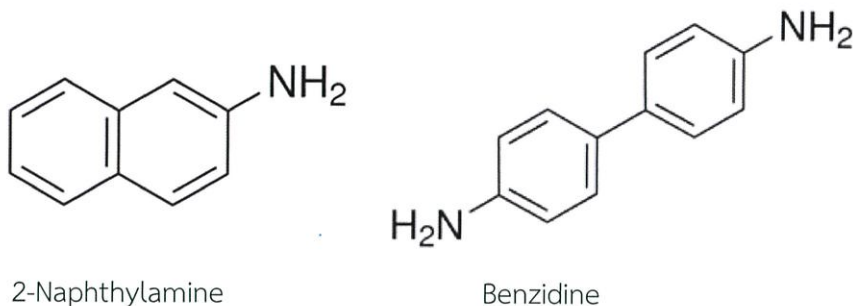
ที่มา: ชลธิชา, 2545

ตารางที่ 2.5 ความเป็นพิษของสารที่ค่า LD<sub>50</sub> ต่างๆ

ระดับความเป็นพิษ	ความเป็นพิษ	ปริมาณช่วงของค่า LD <sub>50</sub> (มก./กก.)	ปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคนน้ำหนัก 70 กก.
1	ต่ำมาก	มากกว่า 15,000	มากกว่า 1 กก.
2	ต่ำ	5,000 - 15,000	350 กรัม – 1 กก.
3	ปานกลาง	1,000 – 5,000	35 กรัม – 350 กรัม
4	สูง	300 – 1,000	3.5 กรัม – 35 กรัม
5	สูงมาก	50 – 300	0.35 กรัม – 3.5 กรัม
6	สูงมากเป็นพิเศษ	ต่ำกว่า 50	น้อยกว่า 0.35 กรัม

ที่มา: ชลธิชา, 2545

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่า สีย้อมโดยทั่วไปไม่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าสารวัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อม มีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีหลายตัวเป็นสารที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ตัวอย่างเช่น 2-Naphthylamine และ Benzidine ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อมที่มีความเป็นพิษสูง

สำหรับผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อมหรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อมนั้น พบว่าสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างค่าความเป็นพิษของสีย้อมต่อปลา

ค่า LD <sub>50</sub> (มก./กก.)	ร้อยละของสีย้อมทั้งหมด
น้อยกว่า 1	2
1 – 10	1
10 – 100	27
มากกว่า 500	31

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542

อย่างไรก็ดี ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งปัจจุบัน ไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อมแต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจากสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็น จึงทำให้โรงงานมีความจำเป็นต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้ง แม้ว่าสีนั้นจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

### 2.3.5 การบำบัดสีในน้ำทิ้ง

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิด

ความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานพอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนวิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้

#### 2.3.5.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้มทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอสิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.3.5.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment) กระบวนการน้ำอศัยจุลินทรีย์ในการลดสีโดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

- ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กินดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง

- ระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ดัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกัน เพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดี ลดลงประมาณร้อยละ 30-50

2.3.5.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) การดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของ

สารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้น ต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลาง ก่อนปล่อยทิ้งด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการ ที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอช ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

2.3.5.4 การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบ อินทรีย์เป็นพวกวงแหวน กับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนเนชั่น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมี ของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีน หรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษ ต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

2.3.5.5 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology) กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทดีสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีซัลเฟอร์ สีแควต และสีอะโซอิกที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดีสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2. ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เหมาะสำหรับใช้กำจัดอออนสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

3. ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่นเหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้

พัฒนามาใช้Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคลีลิกส์ (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

4. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีย้อมสีรีแอคทีฟที่ใช้อยู่ในใยผ้า เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สาร อิเลคโตรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเลคโตรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

2.3.5.6 เทคโนโลยีใหม่ๆ (New Technology) เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุด ตัวอย่าง เช่น

1. ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงานประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ที่กำหนดไว้แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกันดังนั้น เทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

2. ระบบที่มีพื้นฐานของอิเลคโตรไลซิสที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีน และไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันนัลไว้แลกเปลี่ยนไอออน หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

สีย้อมส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้ มีบางประเภทเท่านั้นที่ละลายน้ำไม่ได้ ได้แก่ สีสียเพอร์ส สีซิลเพอร์ และสีแวต สมบัติด้านการละลายน้ำของสีย้อมมีความสำคัญต่อความยากง่ายต่อการกำจัดออกจากน้ำทิ้ง โดยถ้าเป็นสีที่ละลายน้ำไม่ได้ การกำจัดโดยวิธีตกตะกอนจะสามารถทำได้โดยง่าย แต่ถ้าเป็นสีที่ละลายน้ำได้ การกำจัดให้หมดไปเป็นเรื่องที่ทำได้ค่อนข้างยาก (จุฑารัตน์, 2546) สีแต่ละประเภทจึงมีวิธีการกำจัดที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งด้วยวิธีการต่างๆ

ชนิดของสีย้อม	การเจือจาง	การตกตะกอน	การดูดซับด้วยคาร์บอน	ชีวภาพ	กายภาพเคมีและชีวภาพ	โอโซน	การดูดซับด้วยสไลต์
แอสิด	+	X	+	X	+	+	X
เบสิด	+	X	++	+	+	+	+
ไดเร็กต์	+	-	-	-	+	-	+
รีแอคทีฟ	+	X	+	X	+	++	X
แวต	X	+	X	X	+	+	-
ซิลเพอร์	X	+	X	X	+	+	-

ดิสเพอร์ส	X	+	X	X	+	+	X
หมายเหตุ							
++ หมายถึง ให้ผลดีมาก							
+ หมายถึง ให้ผลดี							
X หมายถึง ใช้ไม่ได้							

ที่มา : ศิริพรรณ สหายรักษ์, 1999

## 2.4 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ (รวีวรรณ และคณะ, 2555)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดที่พื้นผิวสัมผัส (Interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและก๊าซ ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของเหลว ของเหลวกับของเหลว สารที่พื้นผิวเกิดการดูดซับขึ้น เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับอาจเป็นแรงที่ไม่เจาะจง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงที่มีลักษณะเจาะจงซึ่งเป็นแรงที่อยู่ในรูปของพันธะเคมี

### 2.4.1 พฤติกรรมการดูดซับของสาร

พฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) การดูดซับแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) และการดูดซับแบบเจาะจง (Specific Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ เกิดขึ้นเมื่อมีการดูดซับโดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนๆ และเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีทิศทางและยังพบว่าไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับจะทำได้ง่ายและการดูดซับอาจเกิดซ้อนกันแบบหลายชั้น (Multilayer)

การดูดซับทางเคมี เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมมักจะแข็งแรง มีพันธะกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องและมีการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้ามหรือเกิดเนื่องจากการแทนที่ประจุที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับด้วยไอออนของตัวถูกดูดซับ

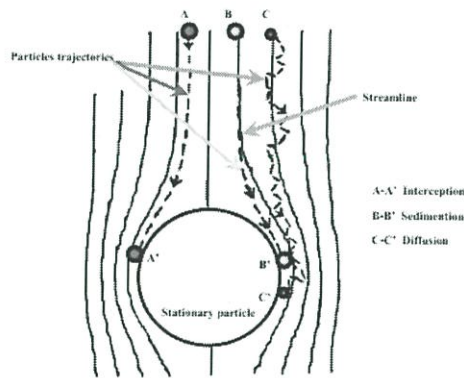
การดูดซับแบบเจาะจง เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันนั้นอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไป พฤติกรรมการดูดซับชนิดนี้จะมีพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ในการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการดูดซับกายภาพ การดูดซับเคมี การดูดซับแลกเปลี่ยน หรือการดูดซับแบบเจาะจงขึ้นอยู่กับชนิดของคู่ตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับนั้น

#### 2.4.2 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการดูดซับ

ขั้นตอนสำคัญที่เกิดขึ้นในการดูดซับมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าหาคาร์บอนหรือสารดูดซับ ในกรณีของคาร์บอนแบบผง การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีการกวนน้ำจนทำให้เกิดความปั่นป่วน แต่ในกรณีของคาร์บอนแบบเกล็ดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีกลไกเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในเครื่องกรองน้ำ

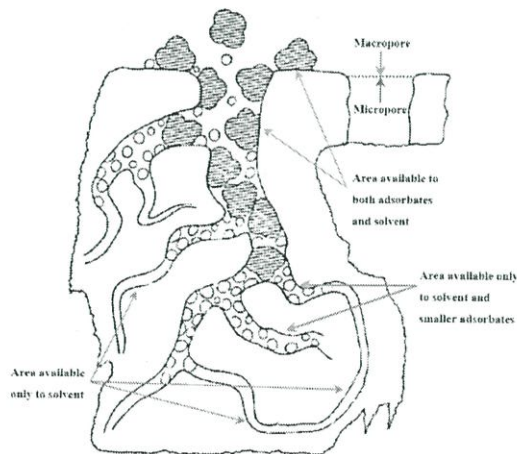


รูปที่ 2.10 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์

2. Film Diffusion เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงคาร์บอน ซึ่งตามปกติมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องแทรกตัวผ่านฟิล์มน้ำให้ได้จึงจะเข้าถึงผิวคาร์บอนได้

3. Pore Diffusion เนื่องจากคาร์บอนมีพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ที่โพรงหรือช่องว่างภายในโมเลกุลของตัวถูกละลาย จึงต้องแทรกตัวเข้าไปถึงช่องว่างภายในคาร์บอนจึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

4. โมเลกุลต้องเกาะติดบนผิวคาร์บอนโดยไม่หลุด



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวหรือดูดซับ

อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิวของคาร์บอนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบคาร์บอนจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาคาร์บอน ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนาเป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาคาร์บอนได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณี Pore Diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ด้วยเหตุนี้อัตราเร็วในการดูดติดผิวของ คาร์บอนผงจึงขึ้นอยู่กับ Pore Diffusion เพราะระบบคาร์บอนผงมักมีความปั่นป่วนสูง (มีการกวน น้ำในถังผสม) แต่อัตราเร็วของการดูดติดผิวของคาร์บอนแบบเกร็ดมักขึ้นอยู่กับ Film Diffusion ทั้งนี้เนื่องจากการใช้คาร์บอนแบบเกร็ดมีลักษณะการใช้งานที่คล้ายกับการใช้ถังกรองทราย ซึ่งมีความปั่นป่วนเกิดขึ้นภายในถังอยู่ในระดับต่ำ

2. ขนาดและพื้นที่ผิวของคาร์บอน คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคาร์บอน คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางลบ กล่าวคือ อัตราการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของคาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าคาร์บอนเกร็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์ โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorptive Capacity) นั่นคือ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย อนึ่งเนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของคาร์บอนได้มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดของคาร์บอนจึงมีบทบาทในการกำหนดพื้นที่ผิวคาร์บอน ทั้งแบบผงและแบบเกร็ดจึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายถึงการมีความสามารถในการดูดผิวใกล้เคียงกันด้วย (แต่อัตราไม่เท่ากัน)

3. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของคาร์บอน เมื่อมีการดูดติดผิวเกิดขึ้นโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำ แล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดติดผิว สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย มักสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดผิวอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้ จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดผิวและความสามารถในการละลายน้ำ

4. ขนาดของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของคาร์บอน ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของคาร์บอน จากการวิจัยพบว่า การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย (พอดีเขาไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารและคาร์บอนจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเขาไปบ้าง

5. พีเอช พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิวด้วย

6. อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ Exothermic ระบบคาร์บอนดูดซับมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบต่างๆ โดยลดค่า บีโอดีได้ร้อยละ 50-80 และสารแขวนลอย ร้อยละ 50-80

#### 2.4.4 การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ (นางสาวชลธิชา, 2545)

การเกาะหรือการดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้ จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่จับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent ตัวอย่างของการดูดซับ ได้แก่ การดูดซับของโมเลกุลสีบนถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยการดูดซับของโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ (เช่น Van Der Waals Force) หรือด้วยแรงเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน

สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้ (Adsorbent) มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ, แมกนีเซียมออกไซด์, ถ่านกระดูก (Bone Char), แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

2. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ (มักเป็นประเภทที่เรียกว่า Macroporous Resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับของถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อได้เปรียบมากกว่าคือสามารถรีเจนเนอเรตได้ง่ายกว่ามากและ รีเจนเนอเรตมักเป็นสารราคาถูกลง เช่น เกลือแกง สำหรับในประเทศไทย ความเหมาะสมในการใช้ เรซินดูดซับอาจมีมากกว่าถ่านกัมมันต์เมื่อคำนึงถึงข้อจำกัดในการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration)

3. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) อันที่จริงคาร์บอนชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้แต่เป็น สารดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์

ขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงดังกล่าวมีขนาดตั้งแต่  $20\text{\AA}$  ถึง  $20,000\text{\AA}$

#### 2.4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) (พิสุทธิ, 2557)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ ( Adsorption isotherm ) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซ หรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวของแข็ง จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิใด ๆ โดยทั่วไปปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับในรูปของโมเลกุลบนสารดูดซับ 1 กรัม จากสารละลาย อาจคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{(C_0 - C_e) V}{M}$$

- เมื่อ
- $a$  = เป็นจำนวนโมลของตัวถูกละลาย
  - $C_0$  = เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย
  - $C_e$  = เป็นความเข้มข้นสุดท้ายของตัวถูกละลาย
  - $V$  = เป็นปริมาณของตัวถูกละลาย
  - $M$  = เป็นมวลของตัวดูดซับ

หากพิจารณาที่สภาวะสมดุล สามารถเขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{M}$$

- เมื่อ
- $q_e$  = เป็นจำนวนโมลของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล
  - $C_e$  = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุล

##### 2.4.5.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

สมการของ Langmuir ขึ้นกับ ความสมดุลระหว่างการกัณฑ์ตัวและการระเหยของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เป็นไอโซเทอร์มที่ง่าย ซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งการเกิดการดูดซับมาจากสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

- โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ที่จำกัดของผิวตัวดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับ เหมาะกับโมเลกุลที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer)
- พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

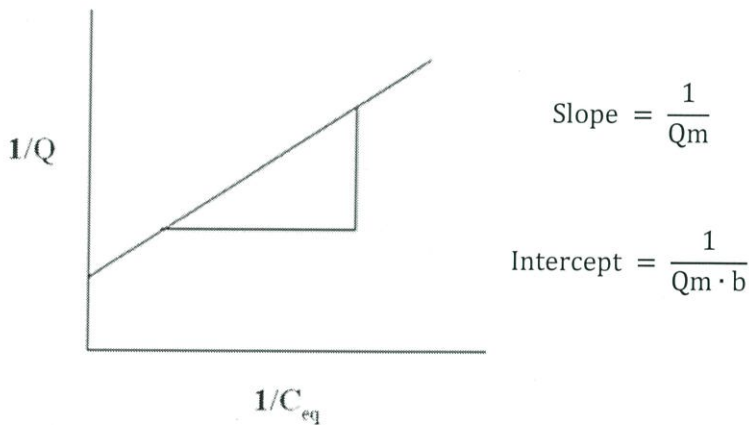
- โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้  
จากสมมติฐานต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการ Langmuir ได้ดังนี้

$$Q = \frac{Q_m b C_{eq}}{(1 + b C_{eq})}$$

$$\frac{C_{eq}}{Q} = \frac{1}{Q_m \cdot b} + \frac{C_{eq}}{Q_m}$$

- เมื่อ  $C_{eq}$  = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/L)  
 $Q$  = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)  
 $Q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)  
 $b$  = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

นำสมการไปเขียนกราฟซึ่ง  $b$  และ  $Q_m$  สามารถหาได้จาก slope และ intercept ดังรูป



รูปที่ 2.12 Langmuir Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

#### 2.4.5.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

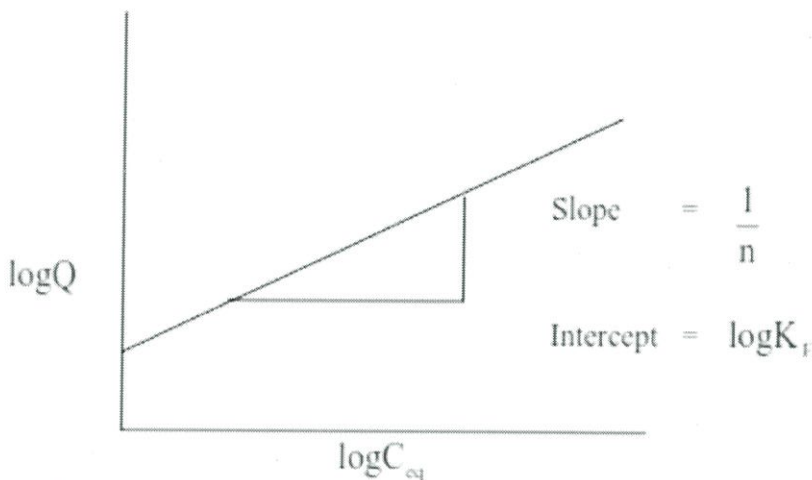
สมการของ Freundlich ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ มักอธิบายการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์ และเรซินสังเคราะห์ ฟรุนดิชไอโซเทอร์ม เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากแลงค์เมียร์ ไอโซเทอร์มที่เกิดบนผิวหน้าซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับ โดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบ Multilayer แสดงดังสมการ

$$\frac{1}{Q} = \left( \frac{1}{Q_m \cdot b} \times \frac{1}{C_{eq}} \right) + \left( \frac{1}{Q_m} \right)$$

- เมื่อ  $K$  = ค่าคงที่ แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)  
 $n$  = ค่าคงที่ แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

จากสมการนำไปเขียนกราฟเส้นตรงได้ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.13 Freundlich Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

## 2.5 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์ (ชลธิชา และคณะ, 2554)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อน และการเปียงเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้างแต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือ แกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงอันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง โดยทั่วไปแล้วพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์ เกิดขึ้นเสมอที่พื้นผิวและการจัดเรียงของอะตอมอยู่ใน

ลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่า ตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้เกิดรูพรุนหรือโครงสร้างภายในมีเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม (angstrom: Å) ถึง 20,000 อังสตรอม ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูงและมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) สูงด้วยเช่น การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ วิธีวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์จะทำได้ โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ลักษณะของสารดูดซับ (nature of adsorbate) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อุณหภูมิ (temperature) และเวลาในการสัมผัส (contact time)

### 2.5.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติในการดูดสีในของเหลวของถ่านเป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 15 แต่คุณสมบัติในการดูดแก๊ส เพิ่งมีผู้บันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1785 แต่ก็ไม่มีผู้สนใจในคุณสมบัติเหล่านี้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1811 มีนักวิทยาศาสตร์ท่านหนึ่งพบว่าถ่านที่ได้จากการเผากระดูกสัตว์ สามารถดูดติดสีได้มากกว่าถ่านซึ่งได้ มาจากถ่านไม้จึงนิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาวสะอาดบริสุทธิ์กันมาก และได้มีการพัฒนาต่อมาจนกระทั่งปี ค.ศ. 1822 มีผู้พบว่าถ่านที่ได้จากการเผาของผสมระหว่างเลือดสัตว์กับขี้เถ้า (potash) มีคุณสมบัติในการดูดสีมากกว่าถ่านกระดูกประมาณ 20 - 50 เท่า แต่ไม่สามารถจะผลิตได้มากเพียงพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานได้ ต่อมา มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Ostreyko ชาวโปแลนด์ คิดค้นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่โดยเผาถ่านในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่งใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับเป็นผู้ริเริ่มให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อต่างๆ เช่น เอฟโพนิท (Eponit) ผลิตขึ้นในยุโรปในปี ค.ศ.1909 นอริท (Norit) ผลิตในปี ค.ศ.1911 และคาร์โบราฟฟิน (Carboraffin) ผลิตในปี ค.ศ. 1915 และในอเมริกาได้ผลิตฟิลท์ชาร์ (Filtchar) ขึ้นในปี ค.ศ 1913 และได้มีการปรับปรุงและเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ไปเรื่อยๆ ถ่านที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ ได้มีการศึกษาถึงการนำไปใช้ในการดูดสีฟอกสีในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้ได้ดีกว่าถ่านกระดูกมาก

คุณสมบัติในการดูดกลิ่นและแก๊สของถ่านกัมมันต์ เริ่มเป็นที่สนใจกันในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งมีการนำไปใช้ ในการทำหน้าที่กักป้องกันแก๊สพิษ จากจุดนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจในคุณสมบัติการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการทดลองโดยวิธีต่างๆพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตใช้ ในการฟอกสีน้ำตาลนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำหน้าที่กักป้องกันแก๊สพิษ เพราะมีลักษณะพองและเบาและต้องใช้ เป็นจำนวนมากทำให้มีผู้พยายามผลิตถ่านชนิดใหม่ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น สำหรับใช้ดูดแก๊สโดยเฉพาะ ซึ่งต่อมา เมื่อสงครามสิ้นสุดลง การค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จและมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การดูดไอของสารละลาย (solvent) ดูดไอเบนซีน (benzene)

จากแก๊สอื่นๆ โดยถ่านที่ผลิตจากไม้ซี้เลื่อย ฟิท ลิกไนท์ และกากที่เหลือจากการทำเยื่อกระดาษจากใยเซลลูโลส จะได้ถ่านที่มีลักษณะพองและเบาเหมาะสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ฟอกของเหลว ส่วนกะลามะพร้าวจะได้ถ่านที่ใช้ในการดูดซับแก๊สได้ดี

### 2.5.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

#### ก. แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- การกระตุ้นทางเคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

- การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดส์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

#### ข. แบ่งตามขนาดรูพรุน

- รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร (nm) มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย

- รูพรุนขนาดกลาง (transitional pores or mesopores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15 -100 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic reaction)

- รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสีและผลิตยา

#### ค. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

- ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดแก๊สพิษหรือไอระเหย

#### ง. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- สำหรับดูดซับแก๊ส (gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือ ถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

- สำหรับดูดซับสี (colour adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านขานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากถ่านหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล

- สำหรับดูดซับโลหะ (metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยก ทอง เงิน แพลทินัม และแร่

#### จ. แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

- ประเภทเป็นผง (powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลายได้หลายชนิด

- ประเภทเป็นเม็ด (pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

1) Pellet activated carbon มีรูปร่างขึ้นอยู่กับเครื่องอัด ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ และใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันแก๊ส และไอพิษต่างๆ

2) Granular activated carbon มีรูปร่างไม่แน่นอน ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์

จ. แบ่งตามค่าความเป็นกรดต่างเมื่อละลายน้ำ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้ว มีสมบัติเป็นกรด โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชัน ที่อยู่บนพื้นผิวเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl)

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้ว มีสมบัติเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชัน ที่อยู่บนพื้นผิว ได้แก่ ควินิน (quinine) ฟีนอล (phenol) และ คาร์บอกซิเลท (carboxylate)

### 2.5.3 การผลิตถ่านกัมมันต์ (processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ลักษณะ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์เซชัน และขั้นตอนการกระตุ้น

#### 2.5.3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ชี้อเลื่อย กะลา มะพร้าว แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง พลาสติก ถ่านหิน กากกาแฟ และพีท เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์ สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือ เริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์เซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

#### ก. การทำให้เป็นถ่าน หรือ การคาร์บอนไนซ์เซชัน (carbonization)

การคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) รูปแบบหนึ่ง ที่จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (tar) และแก๊ส อาจกล่าวได้ว่าการคาร์บอนไนซ์เซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น ทำได้ง่าย โดยการเผาในที่อับอากาศที่อุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส คาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการทำให้โครงสร้างมีรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ และถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

มีสีดำตลอด (uniformly black)

เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวเป็นมันเงา (shiny surface)

ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)

ปราศจากผงฝุ่นและซีเมนต์

ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันนี้ มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะว่าการทำให้เกิดถ่านชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการพัฒนาโครงสร้างไปในทิศทางเดียวกับการเกิดคาร์บอนไนซ์เซชัน หรือ ก็คือการทำการกระตุ้นนั่นเอง วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำหรับเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ ต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

สารระเหยต่ำ

ค่าคาร์บอนคงตัวสูง

มีความพรุนสูง

มีความแข็ง ไม่เปราะ ทนต่อการขัดสี

ซึ่งในธรรมชาติไม่พบคุณสมบัติที่ต้องการทั้งหมด ดังนั้นการทำการคาร์บอนไนซ์ให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนเป็นการไล่ทาร์ แล้วเป็นโค้ก การคาร์บอนไนซ์เซชัน ให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ ทำได้โดยปรับสภาวะของปฏิกิริยาไพโรไลซิสให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือ

- อุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นการกลั่นสลายของสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะอ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกง่าย ทำให้กลุ่มโมเลกุล วงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆจำนวนมาก โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ โดยการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา ส่วนโครงสร้างโมเลกุล หรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่อุณหภูมิห้อง เช่น น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ สิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการนี้ คือ อุณหภูมิสุดท้ายของการคาร์บอนไนซ์เซชัน เพราะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะเคมีในวัตถุดิบออกมาเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิสูง ถ่านชาร์จะมีการจัดระเบียบของโครงสร้างมากกว่า เช่น ถ่านหินเกรดสูงจะหดตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน เป็นผลทำให้ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนเล็กๆ ที่เกิดขึ้นในชั้นแรกของของการคาร์บอนไนซ์ลดลง และเมื่อดำเนินการมีความแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชัน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการลดลงของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจะมากขึ้น เมื่อค่าคาร์บอนคงตัวลดลง

- อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสถานะในการให้ความร้อนถูกแบ่งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที อันเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยอย่างรวดเร็ว ถ้าอัตราการให้ความร้อนสูง ปริมาณสารระเหยจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ผลก็คือ จะได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอนเซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อย ทำให้เกิดช่องว่างมากเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำปฏิกิริยากะตุ้น ตัวกระตุ้นก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

- ตัวกลางของปฏิกิริยา (medium of reaction)

ตัวกลางของปฏิกิริยาจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลาง เช่น แก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณที่เป็นถ่านจะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า พบว่าการคาร์บอนเซชันโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในเตาเผาแบบฟลูอิดเบดจะใช้พลังงานต่ำ เพราะความร้อนจากการเผาไหม้ของสารระเหยจะให้ความร้อนกับเตาฟลูอิดเบด จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการคาร์บอนเซชันก็เพื่อจะให้ได้ถ่านที่มีรูพรุน และการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัตถุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้น การคาร์บอนเซชันจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ 2 ช่วง คือ ช่วงอ่อนตัว (softening period) และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ในช่วงการอ่อนตัวควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เพื่อให้แก๊สหลุดออกมาจากโพรงภายในได้ โดยไม่สลายตัว หรือเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งอัดแน่นภายในโพรง

ข. กระบวนการกระตุ้น (activation) (นาร์ตัน และคณะ, 2556)

กระบวนการกระตุ้น (Activation) คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ของผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระตุ้นไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด สาเหตุหนึ่งก็เนื่องมาจากวิธีการกระตุ้นมีมากมาย นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการกระตุ้นยังอยู่ที่ลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่น ๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย สารจำพวกถ่านหรือถ่านกัมมันต์นั้นจะเป็นสารพวก Amorphous carbon สาร Amorphous นี้ประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอน และนอกจากนี้รูปร่างอะตอมของคาร์บอนยังเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบอีกด้วย การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง โดยอาศัยแก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำยวดยิ่ง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊ส

ออกซิเจนร่วมกับการใช้ความร้อน อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 750-1000°C ในที่ อับอากาศ โดยใช้เวลาและความดันที่เหมาะสม ขนาดของรูพรุนจะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือไม่ต้องล้างสารเคมี สามารถนำไปใช้งานได้ทันที นอกจากนี้ยังสามารถ กระตุ้นด้วยวิธีทั้งสองร่วมกันเพื่อเพิ่มจำนวนรูพรุนบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้น

- วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการกระตุ้นถ่านด้วยการใช้สารเคมี เช่น  $H_3PO_4$ ,  $H_2SO_4$ ,  $ZnCl_2$ ,  $CaCl_2$ ,  $K_2CO_3$ ,  $KOH$  เป็นต้น สารเคมีสามารถแทรกซึมไปทั่ว ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายได้เร็วขึ้นแล้วนำไปเผาที่ อุณหภูมิ 600-700°C ในที่อับอากาศหรือมีอากาศน้อย สารเคมีที่ใช้กระตุ้นจะแทรกเข้าไปในเนื้อถ่าน โดยจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ การกระตุ้นโดยวิธีนี้มีข้อเสีย คือ ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ออกจากถ่านให้หมดเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

ในการผลิตถ่านกัมมันต์วิธีกระตุ้นทางเคมีด้วย  $ZnCl_2$  มีหลักการที่สำคัญของการนำถ่านกัมมันต์ผสมกับเกลือคลอไรด์ แล้วนำไปเผาอุณหภูมิที่สูง จึงทำให้อินทรีย์วัตถุสลายตัว คลอไรด์ซึ่งความ คงทนสูงกว่าจะยังคงอยู่รอบๆ ถ่านและแทรกอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดได้จำกัดเมื่อนำ มาสกัดเกลือคลอไรด์ออก จะเกิดช่องว่าง (ซึ่งเป็นที่ๆ เกลือคลอไรด์เคยอยู่) หรือเกิดรูพรุนในถ่านขึ้น โลหะคลอไรด์ที่เคยใช้กันมี แคลเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ ซึ่งละลายน้ำได้ดี ระยะเวลา นิยมใช้ซิงค์คลอไรด์ โดยหลักการแล้ว เกลือคลอไรด์ทุกชนิดจะทนต่อการเผาไหม้จากคุณสมบัติของ การดูดสีและดูดกลิ่นนั้นที่ได้จากซิงค์คลอไรด์นั้นจะสูงกว่าโลหะคลอไรด์ชนิดอื่นๆ เมื่อโยง ความสัมพันธ์ของเกลือต่างๆ ต่อการพองตัวของเซลลูโลสแล้วจะพบว่า ซิงค์คลอไรด์จะมีประสิทธิภาพ สูงกว่าเกลือชนิดอื่นๆ ดังนั้น ซิงค์คลอไรด์จึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในเซลลูโลสของไม้หรือวัสดุอื่นที่มี เซลลูโลสได้ดีกว่าเกลืออื่นๆ เมื่อนำไปเผาเป็นถ่านซิงค์คลอไรด์ยังคงกระจายอยู่ทั่วๆ ไปในถ่านได้มาก และค่อนข้างสม่ำเสมอมากกว่าเกลืออื่นๆ เมื่อสกัดซิงค์คลอไรด์ออกจะเกิดรูพรุนขึ้นในถ่านสูงและ ขนาดรูพรุนค่อนข้างสม่ำเสมอ

## 2.5.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

### 2.5.4.1 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้น มีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ผลึกแกรไฟต์ ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซิน (benzene ring) หรือกลุ่มของ คาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมา อิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่ง เป็นไพอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อทำให้ โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) แต่ละ แผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม การสลับตำแหน่ง (displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (layer) จะเกิดง่ายเพราะแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (defect) ในโครงสร้าง ณ

จุดนี้ได้ง่าย โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และ เวลาในการให้ความร้อน

#### 2.5.4.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไอซ์เซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่า มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี สามารถจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกได้เป็น

ก. แมคโครพอร์ (macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 - 2,000 อังสตรอม ปริมาตร อยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

ข. มีโซพอร์ (mesopores) หรือทรานซิชันนัปพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15 - 2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20 - 100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gels) อะลูมินาเจล (alumina gels) อะมิโนซิลิเกตอะตาลีซิสต์ (aminosilicate catalyst)

ค. ไมโครพอร์ (micropores) ขนาดรัศมีรูน้อยกว่า 15 - 16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมาก โดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจาก พื้นที่การดูดซับ และพลังงานดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่างๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (zeolite)

#### 2.5.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่าน

ก. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

ข. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ ขนาดของโมเลกุล ประจุไฟฟ้าของโมเลกุล และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

ค. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย

ง. ลักษณะของสารละลาย เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ เป็นต้น

#### 2.5.4.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละอุตสาหกรรมจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

- ก. ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับแก๊สหรือไอ เช่น
- ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้ทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
  - ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ
  - ใช้แยกเบนซีน (benzene) ออกจากแก๊สอุตสาหกรรม
  - ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้ว เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้น ที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่างๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมักอุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
  - กำจัดสิ่งเจือปนออกจากแก๊ส เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
  - กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ (organic sulfur) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์และสิ่งเจือปนอื่นๆจากโรงงานอุตสาหกรรม
  - กำจัดกลิ่นในอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นน้อยลง
  - ใช้ดูดกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์
- ข. ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
  - ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกเอาสบู และเปอร์ออกไซด์ ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
  - แยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจลาติน เพ็กติน ซ็อกโกแลต น้ำผลไม้ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
  - ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องตีแม่เหล็กอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้ได้เครื่องดื่มที่มีรสชาติดีขึ้น
  - ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยาและเคมีภัณฑ์ อื่นๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (streptomycin) คาเฟอีน (caffeine) โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate) รวมทั้งกรดต่างๆ
  - ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดสีรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
  - ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือพาสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst carrier) เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst support) สำหรับซิงค์อะซิเตท (zinc acetate) ในโรงงานผลิตไวนิลคลอไรด์ (vinyl acetate)

- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้อาณุกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮโดรซิลอะมิโนฟีนิลาโซนิคแอซิด (hydroxylaminophenylarsonic acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบา และพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่กินยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีแก๊สมากในกระเพาะอาหารอีกด้วย

## 2.5.5 การทดสอบลักษณะของถ่านกัมมันต์

### 2.5.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

การใช้ถ่านกัมมันต์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต้องทำการศึกษาการทดลองในสภาวะจริง โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ สภาวะที่ใช้งาน ลักษณะของถ่านกัมมันต์ เมื่อพิจารณาถึงการดูดซับสารปนเปื้อนของถ่านกัมมันต์พบว่า เนื่องจากถ่านกัมมันต์ เป็นสารที่มีพื้นผิวมีรูพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่สำหรับการดูดซับสารปนเปื้อนได้มาก นอกจากนี้ยังประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์คือ

1. คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ เช่น การกระจายของรูพรุนและพื้นที่ผิวแรงทางกายภาพในการดูดซับสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของรูพรุนเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุในการกรอง การกระจายขนาดของรูพรุนเป็นตัวกำหนดความสามารถในการที่สารปนเปื้อนจะมาจับบนถ่านกัมมันต์ สารปนเปื้อนสามารถจับบนพื้นผิวได้ดี เมื่อรูมีขนาดใหญ่พอที่จะให้อนุภาคของสารปนเปื้อนแทรกเข้าไปได้ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เหมาะสำหรับการกรองสารที่มีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ เช่น โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์

### 2. คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุดิบหรือปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนในโครงสร้าง

นอกจากการใช้แรงในทางกายภาพดูดซับแล้ว อันตรกิริยาทางเคมีหรือแรงทางไฟฟ้า ระหว่างผิวของถ่านกัมมันต์กับสารปนเปื้อนอาจควบคุมได้โดยการดูดซับทางเคมีหรือการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น คุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์อาจควบคุมสภาวะที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกระบวนการกระตุ้นที่แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิวที่แตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการดูดซับ ทางเคมีของพื้นผิวแตกต่างกันด้วย เช่น สารคลอโรฟอร์ม ถูดูดซับได้ดีบนถ่านกัมมันต์ ที่มีปริมาณออกซิเจนบนพื้นผิวน้อย แต่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมมาต่างกันก็อาจจะมีสามารถในการดูดซับสารเหมือนกัน

### 3. องค์ประกอบทางเคมี และความเข้มข้นของสารปนเปื้อน

สารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่สามารถดูดซับได้ด้วยถ่านกัมมันต์ ตามกฎของการละลายยอมสรุปได้ว่า สารประกอบอินทรีย์กับถ่านกัมมันต์มีสมบัติทางไฟฟ้าเคมีที่คล้ายคลึงกัน จึงสามารถจับกับถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าแตกตัวในน้ำและสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยเท่าไร ก็ยิ่งถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้ดีเท่านั้น

### 4. อุณหภูมิและความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย

ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์จากสารละลายของถ่านกัมมันต์มักเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความเป็นกรดของสารละลายขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีของการดูดซับเกี่ยวข้อง

กับอุณหภูมิต่ำและความเป็นกรดของสารละลาย จึงสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์บนถ่านกัมมันต์ได้โดยลดอุณหภูมิหรือเพิ่มความเป็นกรดของสารละลาย

#### 5. อัตราการไหลของสารละลายหรือระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ต้องการเวลาสำหรับการดูดซับอย่างเพียงพอ ถ้าถ่านกัมมันต์มีเวลาสัมผัสกับสารละลายน้อยเกินไปการดูดซับจะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าใช้ระยะเวลานานเกินไปก็จะทำให้เกิดการเสียเวลาไปโดยเปล่าประโยชน์ วิธีการเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสทำได้โดยการเพิ่มระยะทางของการสัมผัสหรือลดความเร็วของการไหล

ตัวแปรทางลักษณะ เช่น พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน เลขไอโอดีน เป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับบอกถึงความสามารถ ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมาก สามารถดูดซับสารละลายได้ปริมาณสูง ปริมาตรรูพรุนเป็นตัวกำหนดความจุหรือปริมาณสารที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ ขนาดของรูพรุนเป็นตัวกำหนดขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้บนถ่านกัมมันต์ และเลขไอโอดีนนั้นบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และความสามารถในการบำบัดเพื่อคืนสภาพของถ่านกัมมันต์

#### 2.5.5.2 การทดสอบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

##### ก. การดูดซับไนโตรเจน

การศึกษาลักษณะทางพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ นิยมใช้เทคนิคการดูดซับแก๊สและไอน้ำมากที่สุด โดยเริ่มจากหาสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่แล้วนำมาวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนหรือพื้นที่ผิวด้วยวิธีการต่างๆซึ่งกระบวนการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของสาร เช่น ว่างของแข็ง-ของแข็ง แก๊ส-ของแข็ง ของเหลว-ของแข็ง การดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่บริเวณผิวสัมผัสของแข็งนั้นเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือการดูดซับสารเคมี (chemisorption) กับการดูดซับทางกายภาพ (physisorption) โดยการดูดซับทั้ง 2 แบบ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารในของไหลไปจับอยู่บนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยแรงดึงดูดซึ่งผิวของแข็ง (adsorption) กระทำต่อโมเลกุลสารปนเปื้อน (adsorbate) ในของไหล

การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลของแรงแวนเดอร์วาลส์ อันเป็นแรงเนื่องจากความแตกต่างทางไฟฟ้าเล็กน้อยระหว่างโมเลกุลของสารปนเปื้อนกับถ่านกัมมันต์ ทำให้โมเลกุลของสารปนเปื้อนถูกจับยึดบนถ่านกัมมันต์ การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) หรือสามารถดูดซับโมเลกุลบนพื้นที่ผิวที่ปกคลุมด้วยโมเลกุลแล้วชั้นหนึ่งได้อีกหลายชั้น จนสมดุลกับความเข้มข้นของโมเลกุลในสารละลายความเข้มข้นยิ่งสูงยิ่งทำให้การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้น แต่ถ้าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับผิวถ่านกัมมันต์ จะเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งจะเกิดได้เพียงชั้นเดียวและไม่มีการย้อนกลับ แต่อาจจะสามารถแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากผิวถ่านกัมมันต์ได้โดยการใช้แรงเข้าไปสลายพันธะเคมีระหว่างผิวของถ่านกัมมันต์กับโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ที่ถูกดูดซับ

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทำได้โดยการอาศัยกราฟไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สบนผิวของถ่านกัมมันต์ภายใต้อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm) โดยการปล่อยให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับสารต่างๆ แล้วหาปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นในสารละลายแตกต่างกันหรือความดันสัมพัทธ์แตกต่างกัน นำปริมาณแก๊สที่ได้มาเทียบกลับเป็นจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยของแก๊สที่เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ แล้วเทียบเป็นพื้นผิวสำหรับการดูดซับแก๊สจำนวนที่เกิดการดูดซับเต็มชั้นเดียวดังกล่าว การวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธีนี้เป็นการวัดโดยไม่ทำลายพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ พื้นที่ผิวที่ได้เป็นพื้นที่ผิวโดยรวม ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์เต็มหนึ่งชั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของกราฟไอโซเทอมของการดูดซับ Brunauer Deming Deming และ Teller (BDDT) ซึ่งได้จำแนกรูปแบบการดูดซับทางกายภาพไว้ 5 ชนิด โดยอาศัยสมบัติและธรรมชาติของการดูดซับควบคู่กันและได้มีการสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับหาปริมาณแก๊สขึ้นเป็นจำนวนมาก แต่สมการที่มีอยู่นั้นยังไม่สามารถใช้กับการดูดซับของแก๊สบนผิวของแข็งทุกแบบได้ สมการเหล่านี้สามารถใช้เฉพาะการดูดซับช่วงหนึ่งเท่านั้น

ทฤษฎีการดูดซับที่สำคัญคือทฤษฎีการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งสามารถใช้อธิบายการดูดซับของแก๊สบนพื้นผิวได้ดีในกรณีที่มีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวซึ่งตรงกับการดูดซับชนิดที่ 1 ของ BDDT แต่พบว่าการดูดซับบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ไม่ได้เป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์ เพราะมีลักษณะกราฟไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวตรงกับกราดูดซับชนิดที่ 2 ของ BDDT สมการที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์เต็มหนึ่งชั้น คือสมการของ Brunauer Deming Deming และ Teller (BDDT) ซึ่งเป็นสมการที่ปรับปรุงสมมติฐานในทฤษฎีของแลงเมียร์ที่คลาดเคลื่อนไปจากสภาวะจริง

ข. ทฤษฎีการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

แลงเมียร์พิจารณาการดูดซับว่า หลังจากเกิดการดูดซับขึ้นบนพื้นผิวบางส่วนแล้วการดูดซับต่อไปจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวส่วนที่ยังไม่เกิดการปกคลุมเท่านั้นหรือพิจารณาการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (mono-layer) โดยมีสมการสำหรับแบบจำลองของแลงเมียร์คือ

$$\frac{P}{W} = \frac{1}{KW_m} + \frac{P}{W_m}$$

เมื่อ  $P$  = ความดันของตัวดูดซับ

$K$  = ค่าคงที่ของแลงเมียร์

$W$  = น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ

$W_m$  = น้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มหนึ่งชั้น

ค. ทฤษฎีการดูดซับของ BET (BET adsorption isotherm)

Brunauer, Emmett และ Teller ได้พัฒนาสมการการดูดซับของแลงเมียร์ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่า การดูดซับเกิดขึ้นเต็ม 1 ชั้น โดยขยายสมมติฐานว่า สารที่ถูกดูดซับสามารถจับตัวบนสารที่ถูกดูดซับบนชั้นที่ 1 เกิดเป็นชั้นๆ ถัดๆ ไป ในขณะที่พื้นผิวของแข็งยังถูกปกคลุมไม่เต็มชั้นที่ 1

$$\frac{1}{W((P_0/P)) - 1} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

- เมื่อ
- P = ความดันของการดูดซับ
  - P<sub>0</sub> = ความดันอิ่มตัว
  - W = น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ
  - W<sub>m</sub> = น้ำหนักของสารที่ถูกปกคลุมเต็มหนึ่งชั้น
  - C = ค่าคงที่

ในปัจจุบันการใช้สมการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สที่ปกคลุมเต็มหนึ่งชั้น บนพื้นผิวด้วยสมการความสัมพันธ์ของ BET แล้วนำปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนเป็นจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้น คูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สปกคลุมหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดไปหารด้วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่นำมาทดสอบ จะได้พื้นที่จำเพาะของถ่านกัมมันต์ สมการของ BET นี้ใช้ได้ในช่วงความดันสัมพันธ์ไม่เกิน 0.2

ง. ขนาดของรูพรุน

การกระจายของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) ของถ่านกัมมันต์หาได้จากการวิเคราะห์สมการดูดซับของแก๊สที่อุณหภูมิคงที่ในช่วงของการดูดซับทางกายภาพ โดยนิยมใช้สมการสำหรับการดูดซับและการคายที่อุณหภูมิคงที่ของเคลวิน (Kelvin) ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ของความดันไอที่สมดุลบนผิวโค้งกับความดันไอที่สมดุลบนผิวราบของของเหลวชนิดเดียวกัน โดยมีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\ln p}{P_0} = \frac{2Y}{rRT} \cos \theta$$

- เมื่อ
- P = ความดันไอที่สมดุลของของเหลวในบริเวณแคบๆ รัศมี r
  - P<sub>0</sub> = ความดันอิ่มตัวหรือความดันสมดุลของของเหลวเดียวกันบนผิวราบ
  - Y = ความตึงผิว
  - V = ปริมาตรของของเหลวหนึ่งโมล
  - θ = มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับผนังรูพรุน
  - θ ซึ่งที่ความดันสัมพันธ์ใดๆ มีปริมาตรรูพรุน, V<sub>p</sub> โดย

$$V_p = \frac{W}{P_l}$$

เมื่อ  $V_p$  = ปริมาตรรูพรุนหรือปริมาตรของสารที่ถูกดูดซับ

$W$  = น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ

$P_l$  = ความหนาแน่นของสารของของเหลว

ปริมาตรของรูพรุนสามารถหาได้จากน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับเมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 1 ปริมาตรรูพรุนนี้สัมพันธ์กับพื้นที่ผิว ซึ่งถ้ารูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลมมี  $r$  ปริมาตรกับพื้นที่ผิวสัมพันธ์กันโดย

$$r = \frac{2kV}{A}$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ของการเปลี่ยนหน่วย

ถ้าเพิ่มปริมาณการดูดซับหรือการคายที่ละน้อยและหาพื้นที่ผิวได้เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจะได้ความสัมพันธ์กับ  $r$  ได้พบว่าสมการของ Kelvin ซึ่งใช้ได้ดีสำหรับการหารูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1.5 – 100 นาโนเมตรเท่านั้น รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร นิยมหาขนาดของรูพรุนด้วยวิธีการดูดซับของปรอทมากกว่า

จ. การดูดซับไอโอดีน (iodine number)

เลขไอโอดีน เป็นตัวเลขที่บอกถึงความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับไอโอดีนที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยการหาปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ 1 กรัม โดยไอโอดีนสามารถจับกับพื้นผิวของรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร ค่าเลขไอโอดีนเป็นค่าตัวเลขหนึ่งที่บอกถึงปริมาณพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ไม่ใช่พื้นที่ผิวที่แท้จริง เพราะไม่ได้รวมถึงพื้นที่ผิวภายในรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 1 นาโนเมตร พื้นที่ผิวจากการดูดซับไอโอดีนต่างไปจากพื้นที่ผิวที่แท้จริงมากหรือน้อยแตกต่างกันตามแต่ชนิดของถ่านกัมมันต์

ในปี ค.ศ.1963 John W.Hassler ได้เสนอแนะวิธีการหาเลขไอโอดีนไว้ว่า ต้องเตรียมสารละลายไอโอดีน 2.7 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 4.1 กรัมในน้ำ 1 ลิตร และต้องเก็บไว้ภายใต้อุณหภูมิห้องและมีดกก่อนนาสารละลายไอโอดีนนี้ มาให้ปริมาณการดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์ต้องทดสอบความเข้มข้นของไอโอดีนโดยต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 2.56 กรัม/ลิตร

ปัจจุบัน ASTM ได้กำหนดวิธีการมาตรฐานเพื่อหาเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ไว้ใน Destination: D 4607-94 ซึ่งใช้ค่าสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ของไอโอดีนบนถ่านกัมมันต์จำนวน 3 จุด ในการวิเคราะห์ โดยใช้การดูดซับของสารละลายไอโอดีนมาตรฐานบนถ่านกัมมันต์ปริมาณต่างกัน 3 ค่าน้ำหนัก ภายใต้สภาวะเดียวกัน เมื่อการดูดซับถึงจุดสมมูล กรองเอาถ่านกัมมันต์ออกแล้วทำการไตเตรตหาปริมาณไอโอดีนที่เหลือในสารละลาย จากนั้นหาปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูด

ซึบด้วยถ่านกัมมันต์ ปริมาณต่างกัน แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมของการดูดซับไอโอดีนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์กับปริมาณไอโอดีนที่เหลือในสารละลายในหน่วยความเข้มข้นเป็น นอร์มัลลิตี (N) เลขไอโอดีน คือปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับลงบนถ่านกัมมันต์ 1 กรัม แล้วเหลือความเข้มข้นของไอโอดีนในสารละลาย 0.02 N ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอโอดีนมาตรฐานสำหรับการทดสอบต้องอยู่ในช่วง  $0.1 \pm 0.001$  N

### 2.5.5.3 การตรวจสอบลักษณะทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

#### ก. ความสำคัญของลักษณะทางพื้นผิว

ลักษณะทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีผลต่อความแข็งแรง ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนมากจะยุบตัวได้ง่าย มีความแข็งแรงของโครงสร้างน้อย ทำให้ไม่ทนทานสำหรับการใช้งานภายใต้ความดันสูงหรือการที่ของไหลซึ่งเป็นตัวกลางมีอัตราการไหลเร็ว นอกจากนี้การพิจารณาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการผลิตช่วยให้สามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต สามารถใช้เป็นเงื่อนไขในการเลือกสภาวะสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ได้อย่างเหมาะสม

#### ข. ลักษณะทางพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ใช้หลักการของการเกิดภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบสะท้อนโดยใช้สัญญาณของอิเล็กตรอนแบบสะท้อนกลับหรืออิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งได้จากการบังคับอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน แล้วเก็บสัญญาณอิเล็กตรอนด้วยหัววัดซินทินเลชัน (scintillation) จากนั้นแปลงสัญญาณภาพในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แล้วแสดงสัญญาณภาพบนจอโทรทัศน์ในระบบซิงโครไนซ์ (synchronize) ข้อมูลจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด สามารถจำแนกรายละเอียดได้ในช่วง 1.5-3.0 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนี้มีประโยชน์ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวที่เป็นของแข็งที่นำไฟฟ้า สำหรับถ่านกัมมันต์และสารอื่นๆ ที่ไม่นำไฟฟ้าต้องเคลือบด้วยสารตัวนำเพื่อป้องกันการสะสมของประจุบนพื้นผิว ในการทดสอบถ่านกัมมันต์นี้ใช้ไอออนของทองคำเคลือบผิว โดยใช้เครื่องมือเคลือบไอออน (Ion coater) ของทองคำลงบนพื้นผิว

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาพบว่าม้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่สอดคล้องกับงานวิจัยดังนี้

ธัญลักษณ์ ชูพันธ์ และคณะ, 2556 ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีีย้อมมาลาโคท์กรีนของตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกากกาแฟ และทำการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 3 : 1 (w/w) โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีีย้อมมาลาโคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ รวมทั้งศึกษา

ประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ผลิตได้มีคุณสมบัติทางกายภาพในการเป็นตัวดูดซับดีกว่าถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับสี้อมมาลาโคล์กรีน คือ pH 5, ระยะเวลาดูดซับ 180 นาที, ความเข้มข้นของสารละลายสี้อม 50 mg/L และปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมมาลาโคล์กรีนที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 9.28 mg/g และ 9.84 mg/g ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองไอโซเทอร์มพบว่า กระบวนการดูดซับสอดคล้องตามสมการดูดซับของ Langmuir Isotherm ( $R^2 = 0.9128$ )

พลอยไพลิน จันทรโอ และคณะ, 2554 ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสง โดยใช้กรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 50%โดยมวล ในการกระตุ้น และศึกษาการดูดซับสารละลาย Congo red ด้วยตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน สูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดแต่ละชนิด จากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นโดยกรดฟอสฟอริกจะมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เมื่อเตรียมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวล 1:2 และเวลาในการกระตุ้น 60 นาที สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นโดยกรดซัลฟิวริกจะมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเมื่อเตรียมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวล 1:2 และเวลาในการกระตุ้น 90 นาที และพบว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลย์ในระยะเวลา 120 นาที

A. Namanea *et al.*, 2005 ได้ศึกษาผลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้  $ZnCl_2 + H_3PO_4$  เป็นสารกระตุ้น และแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยเตรียมความเข้มข้นสาร 1 โมลต่อลิตร และนำไปคาร์บอนซีให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยทำการเปรียบเทียบการดูดซับฟีนอล สี้อม Acid blue และสี้อม Basic yellow ด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์ และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอล สี้อม Acid blue และสี้อม Basic yellow จากการทดลองผลที่ได้มีแนวโน้มว่าการดูดซับมีความเหมาะสมทั้งกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชและไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

ยุพดี เส้นขาว, 2557 ได้ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสีย โดยใช้มะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพทางเคมีและที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริกเป็นตัวดูดซับ และศึกษาสมบัติของตัวดูดซับด้วยการหาค่าการดูดซับไอโอดีน รวมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ดังนี้ ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 กรัม, ระยะเวลาสัมผัส 5, 10, 30, 60, 120 และ 240 นาที และความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองแบบกะพบว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพ ส่วนมะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพต่างก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้ใกล้เคียงกับมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพตามลำดับ

Katsiri Laowachirasuwan, 2552 ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยศึกษาผลของชนิดของสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่างปริมาณสารกระตุ้นต่อ

ปริมาณกากกาแฟ อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนเซชัน และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ คือ ใช้  $ZnCl_2$  เป็นสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่าง  $ZnCl_2$  ต่อกากกาแฟเป็น 3:1 อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนเซชัน คือ  $500\text{ }^{\circ}C$  และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น เท่ากับ 2 ชั่วโมง ที่สภาวะดังกล่าวจะได้ค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ  $1,218.18\text{ m}^2/g$  ปริมาตรรูพรุนรวม เท่ากับ  $0.86\text{ cm}^3/g$

Umar Isah A. *et al.*, 2015 ได้นำเปลือกมะพร้าวมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และศึกษาในเรื่อง จลนพลศาสตร์ สมดุล และอุณหพลศาสตร์ ของการดูดซับสีฟอกย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยทำการทดสอบแบบแบทช์ ซึ่งได้ศึกษาสภาวะดังนี้ ระยะเวลาสัมผัส 10-50 นาที ความเข้มข้นสีย้อม 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 3-12 และอุณหภูมิ 28-80 องศาเซลเซียส ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร จากการหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากเครื่อง UV/visible spectrophotometer

ชลธิชา ประจักษ์สุตร์ และคณะ, 2554 ได้นำกากกาแฟที่เหลือจากการชงเป็นกาแฟสดมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วย  $ZnCl_2$  โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของ  $ZnCl_2$  ที่ใช้ในการกระตุ้นในช่วงความเข้มข้น 5, 10 และ 15 %wt, เวลาในการกระตุ้น 8, 12 และ 24 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิในการคาร์บอนเซชัน  $400, 450$  และ  $500\text{ }^{\circ}C$  จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นของ  $ZnCl_2$  15 %wt เวลาในการกระตุ้น 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชัน  $500\text{ }^{\circ}C$  เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการทดสอบโดยการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจนและคำนวณจากสมการของ BET พบว่าได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุด เท่ากับ  $831\text{ m}^2/g$  และ  $0.61\text{ cm}^3/g$  ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้  $Cu(II)$  ที่ช่วงความเข้มข้น 25, 50, 75 และ 100 ppm พบว่าที่ความเข้มข้นของ  $Cu(II)$  100 ppm ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้สูงสุด เท่ากับ 18.36%

พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ และวีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, 2553 ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมด้วยการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับจากธรรมชาติ ซึ่งตัวดูดซับที่ใช้ คือ ตัวดูดซับที่ได้จากธรรมชาติโดยตรง ตัวดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้จากวัสดุธรรมชาติ โดยจะกล่าวถึงเรื่องปัจจัยและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การดูดซับแบบกะและแนวโน้ม การนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม

จะเห็นได้ว่า จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีนักวิจัยเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ แต่ชนิดของกากกาแฟ และแหล่งที่ได้มา มีความแตกต่างกัน ดังนั้นในโรงงานพิเศษนี้จึงสนใจใช้กากกาแฟที่เป็นของเสียภายในร้านขายกาแฟ โดยเลือกการกระตุ้นด้วยสารเคมี คือ  $ZnCl_2$  และนอกจากนี้ได้มีการทดสอบถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยนำไปดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เตาเผา (Muffle Furnace) รุ่น 6000 ยี่ห้อ Thermolyne บริษัท Barstead จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องกรองลดความดัน (filter pressure) ยี่ห้อ EYELA (Tokyo rikakikai co., ltd) รุ่น Aspirator A-35 ประเทศเยอรมัน
3. เครื่องเขย่า (Shaking machine) ยี่ห้อ Gallenkamp รุ่น Orbital shaker ประเทศเยอรมัน
4. เครื่องวัดพีเอช รุ่น c860 ยี่ห้อ Consort ประเทศเบลเยียม
5. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 บริษัท SANYO จำกัด
6. Hot plate ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น 11-502-49H ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องยูวี-วิสซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น GENESYS 10SUV-VIS บริษัท Science Engineer International จำกัด ประเทศไทย
8. ตู้อบสาร (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UM400 ประเทศเยอรมัน
9. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น BSA224S-CW ยี่ห้อ Sartorius ประเทศเยอรมัน
10. ขามระเหย ประเทศไทย
11. ถุงซิปล็อค ประเทศไทย
12. เดซิเคเตอร์ (Desiccator) ประเทศจีน
13. ตะแกรงร่อน ขนาด 50 เมช ASTM E 11 บริษัท Endecotts Ltd ประเทศอังกฤษ
14. ถ้วยครุชเชิล พร้อมฝา ประเทศเยอรมัน
15. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
16. ปีกเกอร์
17. ซ้อนตักสาร
18. ขวดวัดปริมาตร
19. แท่งแก้วคนสาร
20. กรวยกรอง
21. กระบอกตวง

### 3.1.2 สารเคมี

1. กากกาแฟ
2. ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (เกรดการค้า)
3. สีย้อม Reavtive Blue 19 บริษัท เคซีบี เทคโนโลยี จำกัด
4. NaOH เข้มข้น 0.1 โมลาร์
5. HCl เข้มข้น 0.1 โมลาร์
6. ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

## 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

1. นำกากกาแฟที่เหลือทิ้งจากร้านค้าไปตากให้แห้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
2. คัดแยกขนาดกากกาแฟด้วยตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช

### 3.2.2 ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

1. ชั่งกากกาแฟที่ผ่านการคัดแยกขนาด แล้วนำมาแช่ด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนของสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อกากกาแฟเท่ากับ 3:1 ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง (Katsiri Laowachirasuwan, 2552)
2. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.2.3 ขั้นตอนการทำกากกาแฟให้เป็นถ่านกัมมันต์ (Carbonization)

#### 3.2.3.1 การหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้น

1. นำชามระเหยไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอชามระเหยเย็นในเดซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักชามระเหยพร้อมจดบันทึก
2. ชั่งกากกาแฟ 2.0 กรัม ใส่ชามระเหย แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
3. ชั่งน้ำหนักหลังอบ พร้อมจดบันทึก

#### 3.2.3.2 การหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิต ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว

1. อบถั่วครุชชีเบลพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอถั่วครุชชีเบลพร้อมฝาให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักพร้อมทั้งจดบันทึก
2. ชั่งกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ 2.00 กรัม ใส่ถั่วครุชชีเบลที่มีฝาปิด

3. นำไปคาร์บอนไนซ์ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ (A. Namanea, *et al.*, 2005)
4. ชั่งน้ำหนักถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์จนน้ำหนักคงที่ และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์
5. วิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ผลผลิต ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว
6. นำถ่านกัมมันต์มาล้างโดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน ล้างด้วยน้ำร้อนจนค่าพีเอชของน้ำที่ล้างใกล้เป็นกลาง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนจนน้ำที่ล้างเป็นกลาง และล้างรอบสุดท้ายด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (พลอยไพลิน และคณะ, 2554)
7. นำถ่านไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์

### 3.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

3.2.4.1 ส่องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะนวัตกรรมจัดการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 3.2.5 ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี Reactive Blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ

#### 3.2.5.1 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ่นปริมาณ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ตามลำดับ
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม Reactive Blue 19 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชของสารละลายสีย้อมเป็น 4 (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ,สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์)
3. แบ่งสารละลายสีย้อม Reactive Blue 19 (จากข้อ 2) ใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด และเทใส่ขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ในข้อ 1
4. นำไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
5. นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. ทำชุดควบคุม (Control) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่เติมถ่านกัมมันต์
7. ทำแบลงค์ (Blank) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์

8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

9. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.5.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นในปริมาณที่เหมาะสม (จากข้อ

3.2.5.1) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด

2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม Reactive Blue 19 ให้มีความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชของสารละลายสีย้อมเป็น 4 (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์)

3. นำสารละลายสีย้อม Reactive Blue 19 แต่ละความเข้มข้น (จากข้อ 2) ใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด ตามลำดับ และเทใส่ขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ในข้อ 1

4. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

5. นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

6. ทำชุดควบคุม (Control) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่เติมถ่านกัมมันต์

7. ทำแบลนด์ (Blank) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์

8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

9. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.5.3 ศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นในปริมาณที่เหมาะสม (จากข้อ

3.2.5.1) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด

2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม Reactive Blue 19 ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม (จากข้อ 3.2.5.2) และปรับพีเอชของสารละลายสีย้อมเป็น 2, 4, 7, 9 และ 11 ตามลำดับ (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์)

3. นำสารละลายสีย้อม Reactive Blue 19 แต่ละพีเอช (จากข้อ 2) ใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด ตามลำดับ และเทใส่ขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ในข้อ 1

4. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

5. นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

6. ทำชุดควบคุม (Control) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่เติมถ่านกัมมันต์

7. ทำแบลงค์ (Blank) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทน น้ำเสียสังเคราะห์

8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

9. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

#### 3.2.5.4 ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นในปริมาณที่เหมาะสม (จากข้อ 3.2.5.1) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด

2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม Reactive Blue 19 ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม (จากข้อ 3.2.5.2) และปรับพีเอชของสารละลายสีย้อมที่เหมาะสม (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์)

3. นำสารละลายสีย้อม Reactive Blue 19 (จากข้อ 2) ใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด และเทใส่ขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ในข้อ 1

4. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 30, 60, 120, 150, และ 180 นาที

5. นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

6. ทำชุดควบคุม (Control) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่เติมถ่านกัมมันต์

7. ทำแบลงค์ (Blank) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทน น้ำเสียสังเคราะห์

8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

9. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.2.6 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นปริมาณ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ตามลำดับ
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม Reactive Blue 19 ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. แบ่งสารละลายสีย้อม Reactive Blue 19 (จากข้อ 2) ใส่ขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด และเทใส่ขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ในข้อ 1
4. นำไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที
5. นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกสารละลายกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. ทำชุดควบคุม (Control) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่เติมถ่านกัมมันต์
7. ทำแบลงค์ (Blank) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์
8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร
9. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
10. นำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich

### 3.2.7 ขั้นตอนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ระหว่างถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

นำถ่านกัมมันต์ทางการค้ามาทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟที่เหลือทิ้ง โดยกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 โดยศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ซึ่งเป็นสีที่นิยมใช้ในการย้อมผ้าฝ้าย

#### 4.1 ผลของการศึกษาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ตารางที่ 4.1 เป็นการหาผลผลิตที่ได้ ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยการเก็บตัวอย่างกากกาแฟที่ผ่านการคั่วบดแล้วจากร้านค้า โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่าง ครั้งละ 2 กรัม จำนวน 3 ครั้ง นำกากกาแฟไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักหลังอบจะทราบเปอร์เซ็นต์ความชื้น จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักหลังเผา จะทราบเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ และนำค่าของเปอร์เซ็นต์ความชื้น และเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ของเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว (ภาคผนวก ค.) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

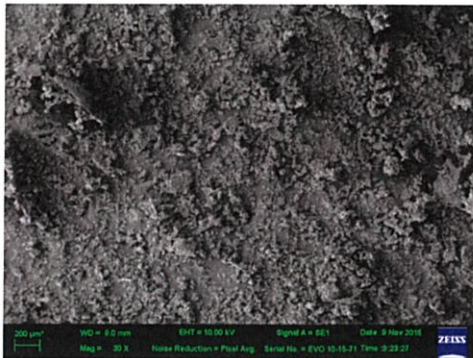
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ความชื้น ผลผลิตที่ได้ เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

ครั้งที่	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้	เปอร์เซ็นต์ปริมาณเถ้า	เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารระเหย	เปอร์เซ็นต์ปริมาณคาร์บอนคงตัว
1	2.27	55.5585	53.2985	42.1815	88.8830
2	2.23	50.6794	48.4194	47.0606	98.6412
3	2.27	54.6390	52.3790	43.1010	90.7220
เฉลี่ย	2.26	53.6256	51.3656	44.1144	92.7487

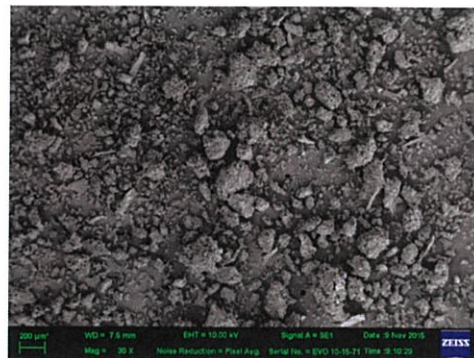
#### 4.2 ผลของการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) จากรูปที่ 4.1 พบว่า การกระจายตัวของกากกาแฟมีลักษณะการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูป ก ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยสารละลาย

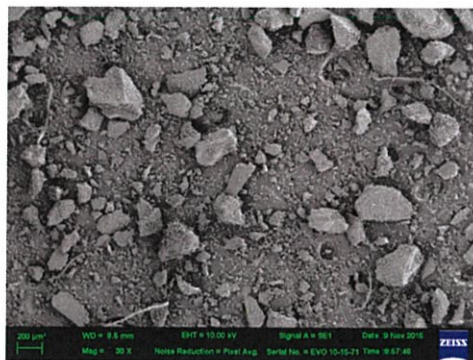
ซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีลักษณะการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่อนุภาคมีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อย ดังแสดงในรูป ข และลักษณะการกระจายตัวของถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีลักษณะการกระจายตัวแบบจับกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูป ค



ก



ข



ค

#### รูปที่ 4.1 ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

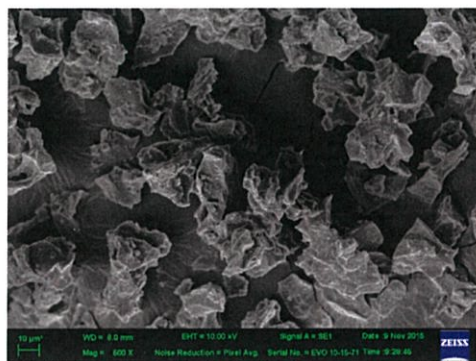
ก.กากกาแฟ

ข.ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

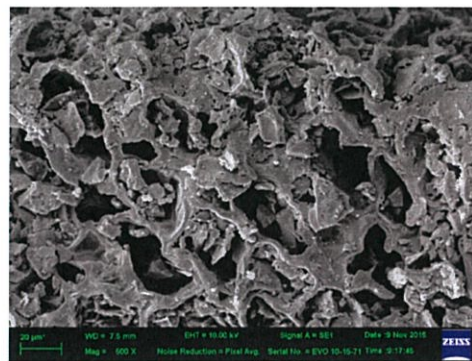
ค.ถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) จากรูปที่ 4.2 พบว่า ลักษณะของกากกาแฟมีรูพรongหลายเหลี่ยม มีลักษณะเป็นเม็ดเห็นได้อย่างชัดเจน พื้นที่ผิวค่อนข้างเรียบ โครงสร้างไม่มีรูพรongเปิด ดังแสดงในรูป ก ในทางทฤษฎีถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activated carbon) มักจะมีรูพรongขนาดใหญ่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีลักษณะพื้นที่ผิวที่มีโครงสร้างรูพรongเปิดขนาดใหญ่ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนซีให้เป็นถ่าน จะทำให้อินทรีย์วัตถุสลายตัว ซิงค์คลอไรด์ซึ่งความคงทนสูงกว่าจะยังคงอยู่รอบๆด้านและแทรกอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดได้จำกัด เมื่อนำมาล้างซิงค์คลอไรด์ออก จะเกิดช่องว่าง หรือเกิดรูพรongในถ่านขึ้น ซึ่งเป็นที่ๆ

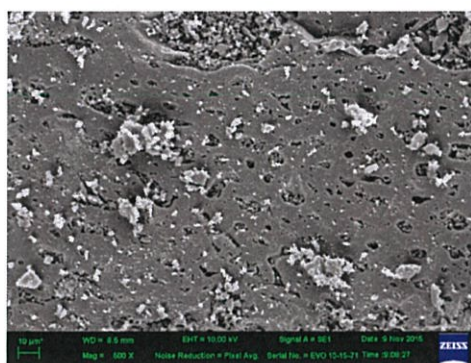
ซิงค์คลอไรด์เคยอยู่ (นภารัตน์ และคณะ, 2556) ดังแสดงในรูป ข และถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีลักษณะพื้นที่ผิวที่มีโครงสร้างรูพรุนเปิดขนาดเล็ก จำนวนมาก ดังแสดงในรูป ค



ก



ข



ค

รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นที่ผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

ก.กากกาแฟ

ข.ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

ค.ถ่านกัมมันต์ทางการค้า

#### 4.3 ประสิทธิภาพของการดูดซับสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ โดยกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

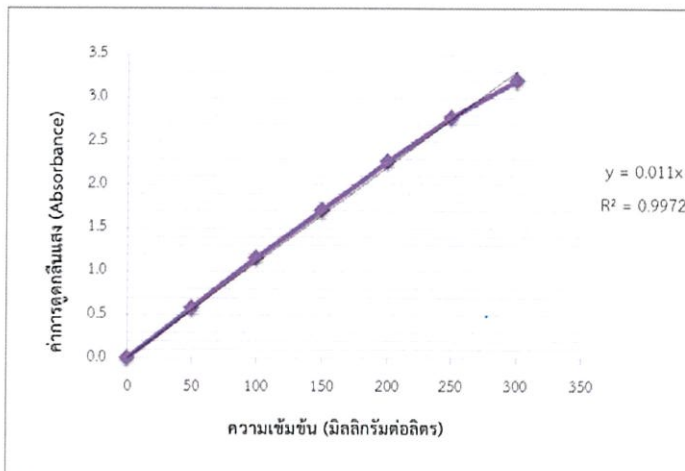
##### 4.3.1 การหาความยาวคลื่นแสง

จากข้อมูลค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดสำหรับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 คือ ค่าความยาวคลื่นที่ 595 นาโนเมตร [Umar Isah A. *et al.*, 2015 ]

##### 4.3.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีฟอกย้อม Reactive Blue 19

จากค่าความยาวคลื่นแสงที่ 595 นาโนเมตร ที่สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (จากข้อ 4.3.1) นำมาหาค่าการดูดกลืนแสงของสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ที่ความเข้มข้น 0, 50, 100, 150,

200, 250 และ 300 ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อสร้าง Standard curve ได้ผลดังรูปที่ 4.3

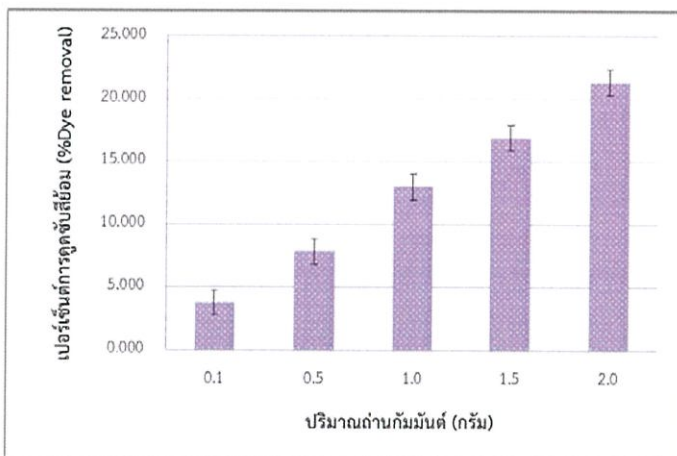


รูปที่ 4.3 กราฟมาตรฐานของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสี Reactive Blue 19 และค่าการดูดกลืนแสง

#### 4.3.3 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ โดยกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

ก. ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับ pH เป็น 4 (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์) ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ปริมาณ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ตามลำดับ แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ผลดังรูปที่ 4.4

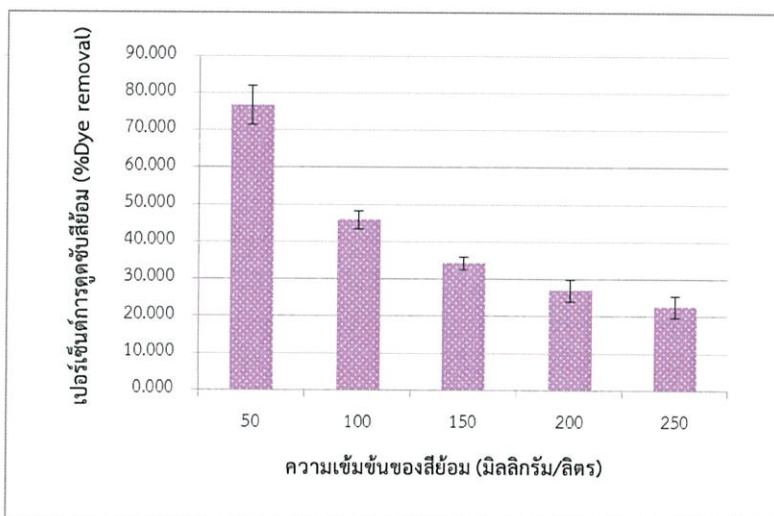


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์กับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่มากขึ้น จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 เพิ่มขึ้น ซึ่งจากในรูปจะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นไม่มีจุดตกลงของกราฟ และที่ปริมาณถ่าน 2.0 กรัม จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมสูงที่สุด คือ 21.35% ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยของรวินิภา ศรีมูล (2557) พบว่าปริมาณถ่านที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.5 กรัม จึงทำการทดลองที่ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 แต่ผลจากการทดลองในครั้งนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าที่ 2.0 กรัม เป็นปริมาณถ่านที่เหมาะสมที่สุด แต่เนื่องจากระยะเวลาในการทดลองมีจำกัด และต้องนำผลที่ได้ไปหาสภาวะอื่นต่อไป จึงใช้ปริมาณถ่าน 2.0 กรัม เป็นปริมาณถ่านที่เหมาะสม

#### ข. ความเข้มข้นของสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับ pH เป็น 4 (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ,สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์) ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ปริมาณถ่านที่เหมาะสม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ผลดังรูปที่ 4.5



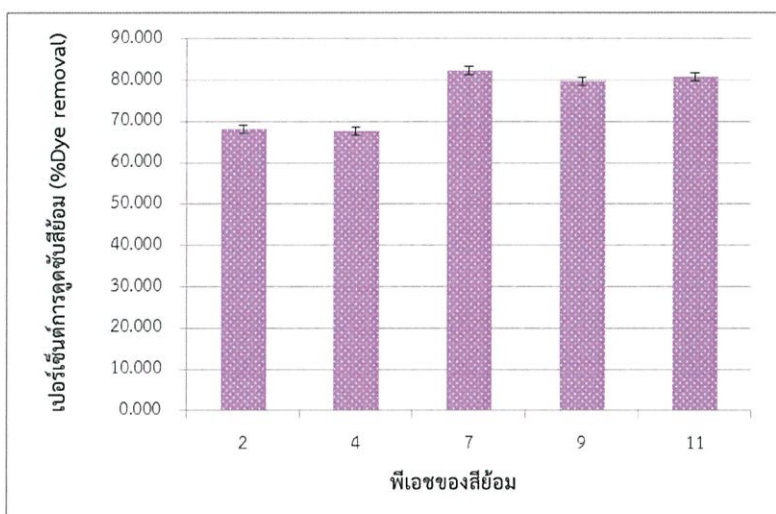
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ลดลง ซึ่งจากในรูปจะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับสีย้อมสูงสุด คือ 76.68% สอดคล้องกับงานวิจัยของ พรสวรรค์ และวีระวัฒน์ (2553) ที่กล่าวว่า การ

เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายในขณะที่ตัวดูดซับคงที่นั้น ทำให้ร้อยละของการดูดซับสีย้อมมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณสีย้อมที่มีอยู่ทั้งหมดในสารละลายที่เพิ่มขึ้น

ค. พีเอชของสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอช เป็น 2.0 , 4.0 , 7.0 , 9.0 และ 11.0 ตามลำดับ (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl ) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ,สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์) ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ปริมาณถ่านที่เหมาะสมแล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ผลดังรูปที่ 4.6



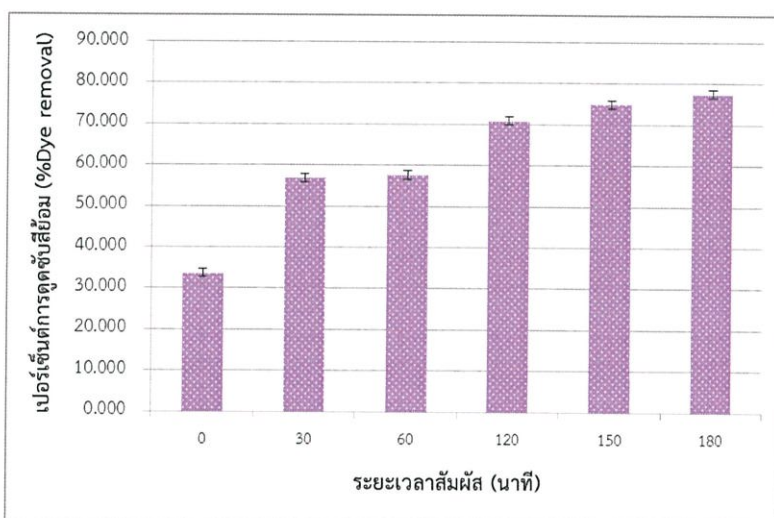
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสีย้อมกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม

จากรูปที่ 4.6 เมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 มาปรับค่าพีเอชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับค่าพีเอชเป็น 7 มีสภาพที่เหมาะสมในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ดีสุด คือ 82.25% สอดคล้องกับงานวิจัยของพรสวรรค์ และวีระวัฒน์ (2553) ที่กล่าวว่า ตัวดูดซับที่มีประจุบวกบนพื้นผิวจะสามารถดึงดูดโมเลกุลของสารที่มีประจุลบได้ดี ดังนั้นการดูดซับสีย้อมกรด จึงเกิดได้ดีในสารละลายที่มีพีเอชต่ำ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีพีเอชเป็นกลาง จึงดูดซับสีย้อมได้ดีในสารละลายที่มีพีเอชเป็นกลาง แต่เมื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าในแต่ละพีเอชให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการดูดซับ และการปรับพีเอชให้เป็นพีเอชที่ดีที่สุด จะต้องเสีย

ค่าใช้จ่ายในการเติมกรด-เบส โดยไม่จำเป็น จึงเลือกใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ที่พีเอช 6.19 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

#### ง. ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชที่เหมาะสม (โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ , สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์) ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่ปริมาณถ่านที่เหมาะสมแล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0, 30, 60, 120, 150, และ 180 นาที ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ผลดังรูปที่ 4.7

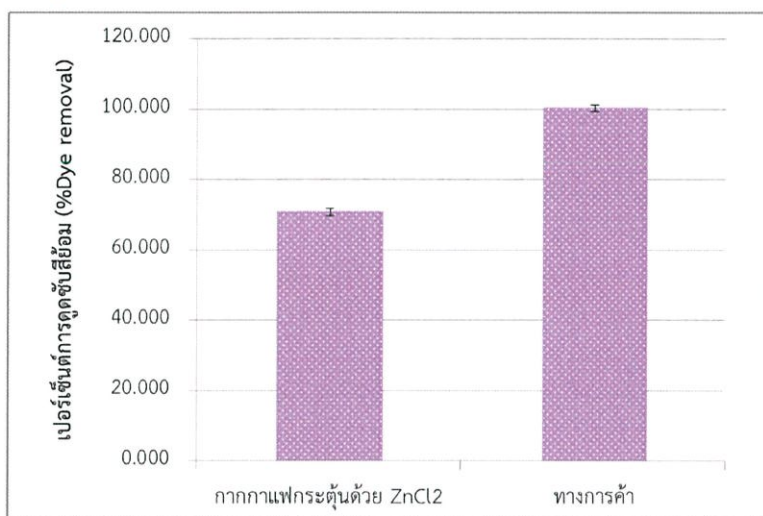


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีฟอกย้อม

จากรูปที่ 4.7 จะพบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสที่มากขึ้น จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าช่วงระยะเวลาที่ 0-30 นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีฟอกย้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ช่วงระยะเวลาที่ 30-60 นาที มีการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีฟอกย้อมเพียงเล็กน้อย และเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงระยะเวลา 180 นาที โดยที่ระยะเวลา 180 นาที จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีฟอกย้อมสูงสุด คือ 77.49% และถ้าใช้ระยะเวลาสัมผัสที่มากขึ้นผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับก็อาจจะมากขึ้นตามไปด้วยจนเข้าสู่ภาวะสมดุล เมื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 120, 150 และ 180 นาที ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีฟอกย้อมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัสที่ 120 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ เพื่อประหยัดเวลาในการทดลอง

#### 4.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการดูดซับสี Reactive Blue 19 ด้วย ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (ค่าพีเอชประมาณ 6-7) โดยนำถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มาเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ปริมาณถ่านตัวอย่างละ 2 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 นาที เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การดูดซับได้ผลดังรูปที่ 4.8

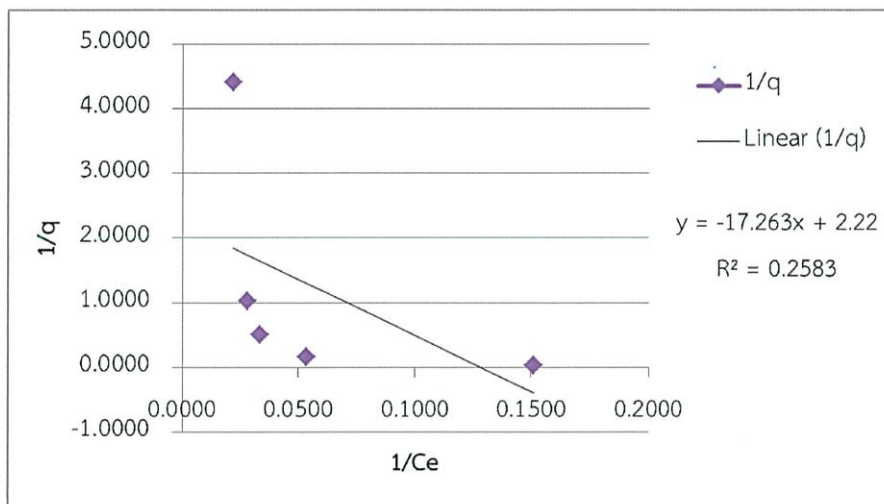


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมระหว่างถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์กับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

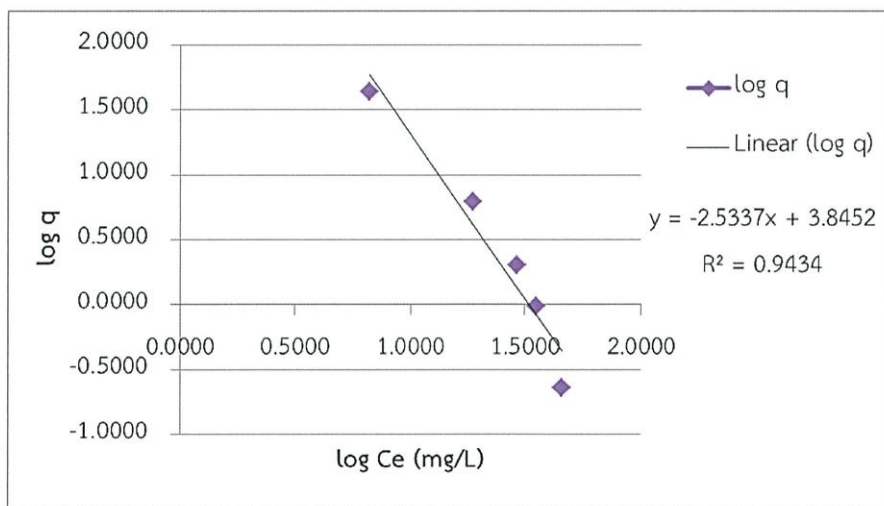
จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าเมื่อนำถ่านกัมมันต์ทางการค้ามาใช้ในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีฟอกย้อมที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ โดยจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมที่ 100% และ 70.87% ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากงานวิจัยนี้ได้ทำการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้เช่นกัน ในขั้นตอนการนำถ่านกัมมันต์มาล้างสารละลายซิงค์คลอไรด์ออกด้วยน้ำกลั่น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จึงยังคงมีการดูดซับโลหะหนักไว้ในรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 น้อยลง จึงทำให้ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า

#### 4.4 ผลของการศึกษา Adsorption Isotherm

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (ค่าพีเอชประมาณ 6-7) โดยกำหนดปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 นาที จะได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19  
แบบ Langmuir Isotherm



รูปที่ 4.10 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19  
แบบ Freundlich Isotherm

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 ผลการศึกษา Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่า การดูดซับจะสอดคล้องกับ Freundlich model มากกว่า Langmuir model เนื่องจากมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9434 ซึ่งสูงกว่าค่า  $R^2$  ของ Langmuir model โดยมีค่าเท่ากับ 0.2583 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพฤติกรรมของการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟสอดคล้องกับ Freundlich Isotherm ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

สำหรับการคำนวณค่าคงที่ของสมการ Freundlich ซึ่งได้แก่ค่า  $n$  และ  $K_f$  โดยหาได้จากความชันและจุดตัดแกน  $y$  ในการพล็อตกราฟระหว่าง  $\text{Log } C_e$  และ  $\text{Log } q$  ความหมายของค่าคงที่  $n$  จะแสดงถึง ความแข็งแรงของการดูดซับ (Strength of Adsorption) ถ้ามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี ถ้าค่า  $n$  มีค่าน้อยกว่า 1 หรือใกล้เคียง 1 หมายถึง การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นและแสดงว่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมาก นั่นคือถ้าสารที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นสูง ตัวดูดซับจะมีแนวโน้มในการดูดซับสารนั้นได้ดี ส่วนค่า  $K_f$  คือค่าคงที่ของการดูดซับซึ่งจะใช้แสดงถึงความจุในการดูดซับ (mg/g) ถ้าค่า  $K_f$  สูงแสดงว่าตัวดูดซับมีความจุในการดูดซับสูงด้วย จากการคำนวณค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ได้ผลดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ต่างๆของ Langmuir Isotherm ในการดูดซับสีดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

สมการ Langmuir	ค่าคงที่ของสมการ		
	$Q_m$ (mg/g)	$R^2$	$b$ (ml/g)
$y = -17.263x + 2.22$	-0.0579	0.2583	-7.7758

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ต่างๆของ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

สมการ Freundlich	ค่าคงที่ของสมการ		
	$n$	$R^2$	$K_f$ (mg/g)
$y = -2.5337x + 3.8452$	-0.3947	0.9434	$7.0016 \times 10^3$

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ Freundlich ในการดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จากการศึกษาสมการ Langmuir และ Freundlich ด้วยการพล็อตกราฟในสมการเชิงเส้นตรง จะได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.2472 และ 0.9369 ตามลำดับ และเมื่อนำมาวิเคราะห์ พบว่า การดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ จะมีพฤติกรรมสอดคล้องกับ Freundlich model มากกว่า Langmuir model เนื่องจากค่า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น และเมื่อพิจารณา ค่าคงที่  $K_F$  ซึ่งแสดงถึง ความจุในการดูดซับ (mg/g) พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟมีความจุในการดูดซับ เท่ากับ  $7.0016 \times 10^3$  สำหรับค่าคงที่  $n$  พบว่า มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า ถ้าสารที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นสูง ตัวดูดซับจะมีแนวโน้มในการดูดซับสารนั้นได้ดี

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อกากกาแฟ 3:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ได้แก่ ลักษณะพื้นที่ผิว ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน เส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุน และศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของสีย้อม พีเอช และระยะเวลาสัมผัส รวมทั้งศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 1. ผลการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าและพื้นที่ผิวมีรูพรุนเปิดขนาดใหญ่กว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีรูพรุนเปิดขนาดเล็กจำนวนมาก

#### 2. ผลการศึกษาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ และระยะเวลาสัมผัส ส่วนค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีผลต่อการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์แต่ละปัจจัยมีค่าดังนี้ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 กรัม ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาสัมผัส 120 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 70.87 % และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ทางการค้ามาเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 ในสภาวะเดียวกัน จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า เท่ากับ 100%

#### 3. ผลการศึกษาศึกษาไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

จากการทดลองพบว่าการดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 จะมีพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับ Freundlich model โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9434 แสดงว่า การดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นๆ เช่น กะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน เป็นต้น เพื่อนำไปพัฒนาคุณภาพในการดูดซับสีฟอกย้อมในน้ำเสีย
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีอื่นเป็นสารกระตุ้น เช่น  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$ ,  $KOH$ ,  $NaOH$  เป็นต้น
3. ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ควรมีการศึกษาใช้น้ำเสียจากสีย้อมไหมจริง เพื่อเป็นการประยุกต์และการออกแบบในการใช้งานจริง
4. หากต้องการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดจริง ควรศึกษาความคุ้มค่าด้วยวิธีการคายซับ (ภาคผนวก ข) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2556. คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของ โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ กันยายน 2556 หน้า 1-1
- กัณติรีย์ ศรีพงศ์พันธุ์. 2547. มลพิษทางน้ำ. (พิมพ์ครั้งที่ 3) กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัย ศิลปากร.การจำแนกประเภทของสีย้อม.
- [Online].[https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc\\_upload/20130226130929.pdf](https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20130226130929.pdf) สืบค้นวันที่ 05/11/58
- จิตติพร. กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์. โรงเรียนเทพบดินทร์วิทยาเชียงใหม่. องค์ประกอบทาง เคมีของกาแฟดิบและการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการผลิต. [Online]. [http://science.thepbodint.ac.th/topmenu.php?c=listknowledge&q\\_id=88](http://science.thepbodint.ac.th/topmenu.php?c=listknowledge&q_id=88). สืบค้น วันที่ 04/09/58.
- จุฑารัตน์ อรรถธรรม. 2546. ประสิทธิภาพการกำจัดสีจากการย้อมใหม่โดยใช้ถ่านกัมมันต์และถ่าน ไม้เป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. ขอนแก่น : โรงพิมพ์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 74หน้า.
- ชลธิชา ประจักษ์สุตร์ และคณะ. 2554. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟคั่วบด. ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 77หน้า.
- ชลธิชา ไม่เสื่อมสุข. 2545. ผลของภาวะออกซิเจนต่อการดูดซับสีรีแอคทีฟบนถ่านกัมมันต์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 136หน้า.
- ดร.พรพรรณ แสนภูมิ และคณะ. 2557. การปรับปรุงกากกาแฟด้วยเอนไซม์เพื่อใช้เป็นปุ๋ยไบโอ ดีกส์ในอาหารสัตว์ คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร. 38หน้า.
- ธัญลักษณ์ ชูพันธ์และคณะ. 2556. การกำจัดสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 161หน้า.
- นภารัตน์ จิวาลักษณ์ และคณะ. 2556. การเตรียมและการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. 68หน้า.
- พงษ์ศักดิ์ ขาวอินทร์. 2555. การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ฟื้นฟูสภาพได้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 137หน้า.
- พรสวรรค์ อิศวแสงรัตน์ และ วีระวัฒน์ คลอวุฒิมินทร์. 2553. การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจาก ธรรมชาติ. วิศวกรรมลาดกระบัง. 27 (4) : 61 – 66.

- พลอยไพลิน จันทรโอ และคณะ. 2554. ศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสงด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟิวริก. วิศวกรรมบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 69หน้า.
- พิศุทธิ์ เพ็ชรมนกุล. 2557. พื้นฐานกระบวนการถ่ายเทมวลสารและการแยกทางกายภาพในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาฯ. กรุงเทพฯ
- ไพฑิพย์ อีร์เวชญาณ. 2547. การกำจัดสีย้อมชนิดเบสิกจากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมโดยใช้แคลบ (ระยะที่ 1-2) หน่วยงานสายวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี ยุพดี เส้นขาว. 2557. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หลักสูตรวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์. 22 (2) : 184 - 201.
- รวินิภา ศรีมูล และ วิทยา คณาวงษ์. 2557. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก. 7 (1) : 31-37.
- รวีวรรณ ยงเมืองน้อย และคณะ. 2555. ประสิทธิภาพการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ตะเคียบใช้แล้วโดยวิธีกระตุ้นทางเคมีที่ใช้สารละลายเกลือสมุทรและเกลือสินเธาว์. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 74หน้า.
- รัชนิย์ รุกขชาติ. 2544. สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- รัตนาวดี พรหมเสนา. 2557. “วิกฤติน้ำเสียอ้อมน้อย” จากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ
- วรชวรธรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการกตะกอนทางเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วรสิทธิ์ ชินรังสิกุล. 2552. ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการบริโภคกาแฟสดของผู้บริโภค. คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 53หน้า.
- วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM). [Online].  
[www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-icroscopysem-.html](http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-icroscopysem-.html)  
 สืบค้นวันที่ 06/11/58.
- Aromathailand. 2557. ลักษณะเมล็ดกาแฟ. [Online].  
<http://www.aromathailand.com/2015/knowledge-sharing-detail.php?knowid=19>.  
 สืบค้นวันที่ 04/09/58.
- A. Namane, A. Mekarzia, K. Benrachedi, N. Belhaneche-Bensemra, A. Hellal. “Determination of the adsorption capacity of activated carbon made from coffee grounds by chemical activation with  $ZnCl_2$  and  $H_3PO_4$ ”, Journal of Hazardous Materials, 119 (2005) 189–194.

- katsiri Laowachirasuwan. 2552. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย. "preparation and characteristics of activated carbons from coffee residue by chemical activation method". Department of general science. school of science. university of the thai chamber of commerce, 29 (2) : 116 – 131.
- Umar Isah A., Giwa Abdulraheem, Salisu Bala, Sallahudeen Muhammad, Mustapha Abdullahi. "Kinetics, equilibrium and thermodynamics studies of C.I. Reactive Blue 19 dye adsorption on coconut shell based activated carbon", International Biodeterioration & Biodegradation, 102 (2015) 265-273.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### ก-1 การเตรียมสารละลาย

ก-1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ชั่งสีย้อม Reactive Blue 19  $0.05 \pm 0.0005$  กรัม ใส่ลงขวดปรับปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร ในขวดปรับปริมาตร
3. เขย่าจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ก-1.2 สารละลายซิงค์คลอไรด์ 1 โมลต่อลิตร

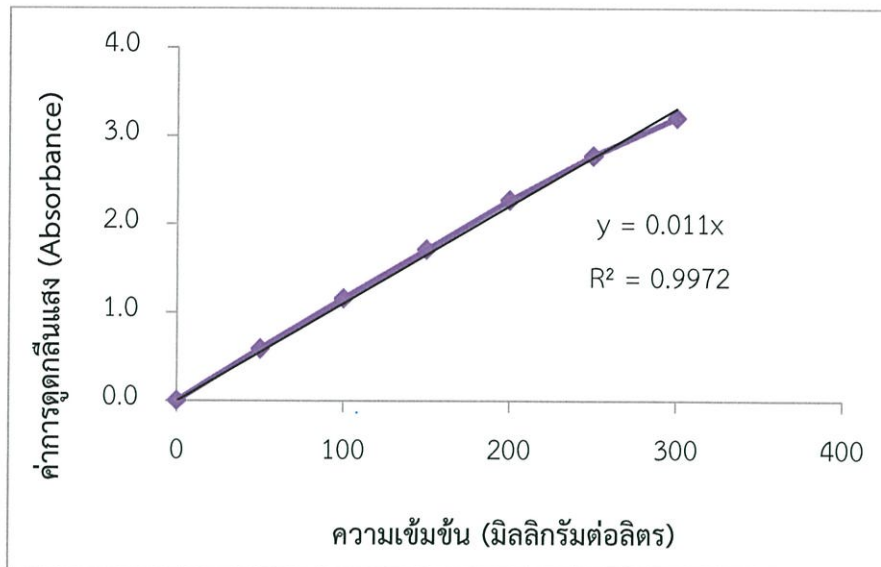
1. ชั่งสารซิงค์คลอไรด์  $136.29 \pm 0.0005$  ใส่ลงขวดปรับปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปรับปริมาตร ในขวดปรับปริมาตร
3. เขย่าจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

### ก-2 การสร้างกราฟมาตรฐานสีย้อม Reactive Blue 19

จากการนำสารละลายสีย้อมมาตรฐานความเข้มข้น 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-1 ผลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)
50	0.586
100	1.159
150	1.712
200	2.271
250	2.776
300	3.206



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Blue 19

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าที่ตีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าที่ตีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ตีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก.ล	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 °C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ

## ภาคผนวก ค

### ค-1 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

#### ตารางที่ ค-1 เปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้น

ครั้งที่	น้ำหนักก่อนอบ(g)	น้ำหนักหลังอบ(g)	น้ำหนักที่หายไป(g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น
1	2.0005	1.9551	0.0454	2.27
2	2.0024	1.9578	0.0446	2.23
3	2.0084	1.9628	0.0456	2.27
		เฉลี่ย		2.26

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{A-B}{B} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ค-1 ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} &= \frac{2.0005 - 1.9551}{1.9551} \times 100 \\ &= 2.27\% \end{aligned}$$

### ค-2 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิต

#### ตารางที่ ค-2 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกากกาแฟที่ทำให้เป็นถ่าน

ครั้งที่	น้ำหนัก ภาชนะ (g)	น้ำหนักกาก กาแฟก่อนเผา (g)	น้ำหนักกากกาแฟ และภาชนะหลังเผา (g)	น้ำหนักกากกาแฟ หลังเผา (g)	เปอร์เซ็นต์ ผลผลิต
1	29.8693	13.4964	37.3677	7.4984	55.5585
2	29.7067	16.0949	37.8635	8.1568	50.6794
3	32.8667	14.1939	40.6221	7.7554	54.6390
			เฉลี่ย		53.6256

### วิธีการคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิต} = \frac{A-B}{C} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยพร้อมถ่านหลังเผา (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยก่อนเผา (กรัม)

C = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ค-2 ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิต} &= \frac{37.3677 - 29.8693}{13.4964} \times 100 \\ &= 55.5585\% \end{aligned}$$

### ค-3 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เถ้า

ตารางที่ ค-3 เปอร์เซ็นต์ปริมาณเถ้าของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน

ครั้งที่	น้ำหนัก ภาชนะ (g)	น้ำหนักกาก กาแฟก่อนเผา (g)	น้ำหนักกากกาแฟ และภาชนะหลังเผา (g)	น้ำหนักกากกาแฟ หลังเผา (g)	เปอร์เซ็นต์เถ้า
1	29.8693	13.4964	37.3677	7.4984	53.2985
2	29.7067	16.0949	37.8635	8.1568	48.4194
3	32.8667	14.1939	40.6221	7.7554	52.3790
เฉลี่ย					51.3656

### วิธีการคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์เถ้า} = T - V$$

เมื่อ T = เปอร์เซ็นต์ของปริมาณของแข็งรวม

V = เปอร์เซ็นต์ของปริมาณสารที่เผาไหม้ได้

โดย คำนวณ T จาก

$$T = 100 - M$$

เมื่อ T = เปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งรวม

M = เปอร์เซ็นต์ความชื้น

คำนวณ V จาก

$$V = \frac{W1-W2}{W1} \times 100$$

เมื่อ V = เปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เผาไหม้ได้

W1 = น้ำหนักกากกาแฟก่อนเผา (g)

W2 = น้ำหนักกากกาแฟหลังจากเผา (g)

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ค-3 ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} T &= 100 - 2.26 \\ &= 97.74 \\ V &= \frac{13.4964 - 7.4984}{13.4964} \times 100 \\ &= 44.4415 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ปริมาณเถ้า} &= 97.74 - 44.4415 \\ &= 53.2985\% \end{aligned}$$

#### ค-4 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารระเหย

ตารางที่ ค-4 เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารระเหยของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน

ครั้งที่	น้ำหนัก ภาชนะ (g)	น้ำหนักกากกาแฟ ก่อนเผา(g)	น้ำหนักกากกาแฟ และภาชนะหลังเผา (g)	น้ำหนักกากกาแฟ หลังเผา (g)	เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ สารระเหย
1	29.8693	13.4964	37.3677	7.4984	42.1815
2	29.7067	16.0949	37.8635	8.1568	47.0606
3	32.8667	14.1939	40.6221	7.7554	43.1010
			เฉลี่ย		44.1144

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารระเหย} = \left[ \frac{A-B}{A} \times 100 \right] - \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น}$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ค-4 ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารระเหย} &= \left[ \frac{13.4964 - 7.4984}{13.4964} \times 100 \right] - 2.26 \\ &= 42.1815\% \end{aligned}$$

ค-5 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ตารางที่ ค-5 เปอร์เซ็นต์ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากกาแฟที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน

ครั้งที่	น้ำหนัก ภาชนะ (g)	น้ำหนักกาก กาแฟก่อนเผา (g)	น้ำหนักกากกาแฟ และภาชนะหลังเผา (g)	น้ำหนักกากกาแฟ หลังเผา (g)	เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ คาร์บอนคงตัว
1	29.8693	13.4964	37.3677	7.4984	88.8830
2	29.7067	16.0949	37.8635	8.1568	98.6412
3	32.8667	14.1939	40.6221	7.7554	90.7220
			เฉลี่ย		92.7487

วิธีการคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - (A - B)$$

เมื่อ A = เปอร์เซ็นต์ปริมาณถ้ำ

B = เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารระเหย

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ค-5 ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ปริมาณคาร์บอนคงตัว} &= 100 - (53.2985 - 42.1815) \\ &= 88.8830\% \end{aligned}$$

## ค-6 ผลการทดลองหาปริมาณถ่านที่เหมาะสม

ตารางที่ ค-6.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ซั้งได้					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
0.1	0.0998	0.0999	0.1000	0.1001	0.1005	0.1003
0.5	0.5003	0.4999	0.4998	0.4996	0.5003	0.5000
1.0	1.0005	1.0000	1.0000	1.0001	0.9999	1.0000
1.5	1.5001	1.4999	1.5002	1.5005	1.4999	1.5002
2.0	1.9998	1.9998	2.0002	2.0001	2.0002	2.0005

ตารางที่ ค-6.2 ค่าการดูดกลืนแสง

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์	ค่าดูดกลืนแสง					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
0.1	0.043	2.279	0.041	2.247	0.044	2.261
0.5	0.042	2.147	0.037	2.171	0.038	2.173
1.0	0.040	2.019	0.037	2.037	0.037	2.077
1.5	0.043	1.958	0.041	1.954	0.037	1.958
2.0	0.05	1.864	0.041	1.842	0.037	1.864
control	2.324		2.284		2.311	

ตารางที่ ค-6.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ผลรวม	เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.1	3.787	3.415	4.068	11.269	3.756
0.5	9.423	6.567	7.616	23.607	7.869
1.0	14.845	12.434	11.727	39.006	13.002
1.5	17.599	16.243	16.876	50.718	16.906
2.0	21.945	21.147	20.943	64.035	21.345
				188.635	62.878

## ค-7 ผลการทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสม

ตารางที่ ค-7.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์

ความ เข้มข้นสี ย้อม	ปริมาณ ถ่าน	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ซั่งได้					
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
		Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
50	2.0000	2.0000	1.9996	2.0000	1.9999	1.9998	1.9996
100	2.0000		2.0000		2.0004		2.0005
150	2.0000		1.9995		1.9996		1.9995
200	2.0000		2.0000		1.9999		2.0004
250	2.0000		1.9995		1.9998		2.0003

ตารางที่ ค-7.2 ค่าความเข้มข้นสีย้อมที่แท้จริง

ความเข้มข้นสีย้อม	ความเข้มข้นสีย้อมที่เตรียมได้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
50	50.8	50.8	49.2
100	100.8	100.4	98.0
150	151.2	151.2	148.4
200	199.6	200.8	201.2
250	250.8	248.4	250.0

ตารางที่ ค-7.3 ค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้นสี ย้อม	ค่าดูดกลืนแสง					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	control	ตัวอย่าง	control	ตัวอย่าง	control	ตัวอย่าง
50	0.620	0.162	0.633	0.183	0.614	0.22
100	1.214	0.697	1.180	0.653	1.189	0.721
150	1.762	1.186	1.786	1.200	1.675	1.179
100	2.290	1.658	2.298	1.713	2.306	1.799
250	2.941	2.230	2.758	2.235	2.864	2.292
Blank	0.049		0.037		0.044	

ตารางที่ ค-7.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

ความเข้มข้นของ สีย้อม	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ผลรวม	เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
50	81.774	76.935	71.336	230.045	76.682
100	46.623	47.797	43.061	137.481	45.827
150	35.471	34.882	32.239	102.592	34.197
200	29.738	27.067	23.894	80.699	26.900
250	25.842	20.305	21.508	67.654	22.551
				618.472	206.157

## ค-8 ผลการทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม

## ตารางที่ ค-8.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์

ค่าพีเอช	ปริมาณถ่าน	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ซั่งได้					
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
		Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
2	2.0000	1.9995	1.9996	2.0000	2.0000	2.0004	2.0003
4	2.0000		1.9999		1.9996		1.9998
7	2.0000		2.0000		1.9996		2.0004
9	2.0000		1.9998		1.9997		1.9998
11	2.0000		2.0003		1.9996		1.9997

## ตารางที่ ค-8.2 ค่าพีเอชที่แท้จริง

พีเอช	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2	2.29	2.32	2.45
4	4.54	4.48	4.38
7	6.89	7.08	7.12
9	9.08	9.42	9.72
11	10.85	10.94	11.02

## ตารางที่ ค-8.3 ค่าดูดกลืนแสง

พีเอชสีย้อม	ค่าดูดกลืนแสง					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	control	ตัวอย่าง	control	ตัวอย่าง	control	ตัวอย่าง
2	0.616	0.232	0.628	0.236	0.632	0.261
4	0.638	0.246	0.642	0.255	0.64	0.25
7	0.637	0.24	0.58	0.12	0.576	0.096
9	0.599	0.15	0.591	0.104	0.61	0.242
11	0.582	0.121	0.593	0.175	0.579	0.171
Blank	0.043		0.049		0.038	

ตารางที่ ค-8.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

พีเอชของสีย้อม	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ผลรวม	เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
2	69.318	70.223	64.715	204.256	68.085
4	68.182	67.913	66.875	202.970	67.657
7	69.074	87.759	89.931	246.763	82.254
9	82.137	90.694	66.557	239.388	79.796
11	86.598	78.752	77.029	242.379	80.793
				1135.756	378.585

## ค-9 ผลการทดลองหาระยะเวลาสัมพัทธ์เหมาะสม

ตารางที่ ค-9.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์

ปริมาณถ่านกัมมันต์	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ซั่งได้					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
2.0000	1.9996	1.9998	1.9996	2.0004	1.9995	2.0004
2.0000	2.0004	2.0000	2.0004	2.0005	2.0000	2.0004
2.0000	1.9998	2.0001	2.0000	2.0004	2.0001	2.0001
2.0000	1.9995	1.9995	1.9996	2.0002	2.0005	2.0000
2.0000	2.0005	1.9995	2.0003	2.0003	1.9998	2.0003
2.0000	2.0002	1.9998	2.0002	2.0002	1.9998	1.9998

ตารางที่ ค-9.2 ค่าดูดกลืนแสง

ระยะเวลาสัมผัส	ค่าดูดกลืนแสง					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
0	0.039	0.457	0.039	0.452	0.04	0.452
30	0.037	0.274	0.038	0.326	0.038	0.321
60	0.038	0.253	0.037	0.307	0.037	0.348
120	0.039	0.222	0.039	0.219	0.037	0.22
150	0.039	0.187	0.035	0.196	0.035	0.196
180	0.04	0.182	0.039	0.172	0.035	0.182
control	0.613		0.63		0.632	

ตารางที่ ค-9.3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับ

ระยะเวลาสัมผัส	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ			ผลรวม	เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	31.811	34.444	34.810	101.065	33.688
30	61.338	54.286	55.222	170.845	56.948
60	64.927	57.143	50.791	172.861	57.620
120	70.147	71.429	71.044	212.620	70.873
150	75.856	74.444	74.525	224.826	74.942
180	76.835	78.889	76.741	232.465	77.488
				1114.681	371.560

วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} = \left[ \frac{\text{ค่าดูดกลืนแสงก่อน(control)} - \text{ค่าดูดกลืนแสงหลัง(ตัวอย่าง)}}{\text{ค่าดูดกลืนแสงก่อน(control)}} \times 100 \right]$$

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ค-9.3 ระยะเวลาสัมผัส 0 นาที ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} &= \left[ \frac{2.324 - 2.236}{2.324} \times 100 \right] \\ &= 3.787\% \end{aligned}$$

#### ค-10 ผลการทดลองไอโซเทอร์มการดูดซับ

ตารางที่ ค-10.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์	ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ซั่งได้					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
0.1	0.0996	0.1004	0.0995	0.1003	0.0999	0.1003
0.5	0.5001	0.5002	0.5000	0.5001	0.5001	0.5000
1.0	1.0000	1.0002	0.9999	1.0002	1.0000	1.0000
1.5	1.5000	1.5003	1.4999	1.5002	1.5000	1.5002
2.0	2.0005	1.9998	2.0004	1.9999	2.0005	2.0000

ตารางที่ ค-10.2 ค่าการดูดกลืนแสง

ปริมาณ ถ่านกัมมันต์	ค่าดูดกลืนแสง					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง	Blank	ตัวอย่าง
0.1	0.043	0.605	0.045	0.607	0.041	0.604
0.5	0.042	0.470	0.043	0.472	0.042	0.472
1.0	0.045	0.354	0.047	0.360	0.044	0.358
1.5	0.043	0.289	0.045	0.291	0.046	0.293
2.0	0.043	0.179	0.043	0.181	0.045	0.177
control	0.628		0.645		0.632	

ตารางที่ ค-10.3 คำนวณผลไอโซเทอร์ม

น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	ความ เข้มข้น เริ่มต้น ( $C_0$ )	ความ เข้มข้น หลังจาก ดูดซับ ( $C_e$ )	$q$	$1/C_e$	$1/q$	$\log C_e$	$\log q$
0.0996	100	49.50	6.000	43.0374	0.1514	0.0232	0.8199	1.6338
0.0995	100	50.30	7.545					
0.0999	100	50.10	6.273					
0.5001	100	49.50	18.182	6.15373	0.0534	0.1625	1.2725	0.7891
0.5	100	50.30	19.636					
0.5001	100	50.10	18.364					
1	100	49.50	29.000	2.01370	0.0341	0.4966	1.4678	0.3040
0.9999	100	50.30	30.182					
1	100	50.10	28.909					
1.5	100	49.50	34.727	0.9445	0.0283	1.0588	1.5482	-0.0248
1.4999	100	50.30	36.273					
1.5	100	50.10	35.000					
2.0005	100	49.50	44.727	0.2037	0.0220	4.9082	1.6573	-0.6909
2.0004	100	50.30	46.091					
2.0005	100	50.10	45.455					

ตารางที่ ค-10.4 ค่าคงที่ต่างๆของ Langmuir Isotherm ในการดูดซับสีดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

สมการ Langmuir	ค่าคงที่ของสมการ		
	$Q_m$ (mg/g)	$R^2$	$b$ (ml/g)
$y = -17.263x + 2.22$	-0.0579	0.2583	-7.7758

วิธีการคำนวณ  $Q_m$ 

$$\begin{aligned} \text{จาก Slope} &= 1/Q_m \\ -17.263 &= 1/Q_m \\ \text{ดังนั้น } Q_m &= -0.0579 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

วิธีการคำนวณ  $b$ 

$$\begin{aligned} \text{จาก Intercept} &= 1/(Q_m \times b) \\ 2.22 &= 1/(-0.0579 \times b) \\ \text{ดังนั้น } b &= -7.7758 \text{ ml/g} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค-10.5 ค่าคงที่ต่างๆของ Freundlich Isotherm ในการดูดซับสีดูดซับสีฟอกย้อม Reactive Blue 19 ของถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

สมการ Freundlich	ค่าคงที่ของสมการ		
	n	$R^2$	$K_F$ (mg/g)
$y = -2.5337x + 3.8452$	-0.3947	0.9434	$7.0016 \times 10^3$

วิธีการคำนวณ  $n$ 

$$\begin{aligned} \text{จาก Slope} &= 1/n \\ -2.5337 &= 1/n \\ \text{ดังนั้น } n &= -0.3947 \end{aligned}$$

วิธีการคำนวณ  $K_F$ 

$$\begin{aligned} \text{จาก Intercept} &= \log K_F \\ 3.8452 &= \log K_F \\ \log K_F &= 3.8452 \log 10 \\ \text{ดังนั้น } K_F &= 10^{3.8452} \\ &= 7.0016 \times 10^3 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

ค-11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ ค-11.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณถ่านกัมมันต์ ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	587.296	4	146.824	130.916	.000
Within Groups	11.215	10	1.122		
Total	598.511	14			

วิธีของ Duncan

treatmen t	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
1	3	3.75667				
2	3		7.86867			
3	3			13.00200		
4	3				16.90600	
5	3					21.34500
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ค-11.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6051.259	5	1210.252	132.775	.000
Within Groups	109.381	12	9.115		
Total	6160.639	17			

วิธีของ Duncan

treatment	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
5	3	22.55167				
4	3	26.89967	26.89967			
6	3		28.48300			
3	3			34.19733		
2	3				45.82700	
1	3					76.68167
Sig.		.103	.533	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ค-11.3 ผลการวิเคราะห์พีเอชของสีย้อม ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	625.069	4	156.267	2.469	.112
Within Groups	632.904	10	63.290		
Total	1257.973	14			

ตารางที่ ค-11.4 ผลการวิเคราะห์ ระยะเวลาสัมผัส ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3996.981	5	799.396	68.512	.000
Within Groups	140.016	12	11.668		
Total	4136.997	17			

วิธีของ Duncan

treatment	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1	3	33.68833			
2	3		56.94867		
3	3		57.62033		
4	3			70.87333	
5	3			74.94167	74.94167
6	3				77.48833
Sig.		1.000	.814	.170	.379

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

## ภาคผนวก ง

ง-1 เตาเผาที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์



รูปที่ ง-1 เตาเผา (Muffle Furnace) รุ่น 6000 ยี่ห้อ Thermolyne บริษัท Barstead จำกัด  
ประเทศสหรัฐอเมริกา

ง-2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ ง-2 เครื่องยูวี-วิสซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น GENESYS 10S UV-Vis  
Spectrophotometer ยี่ห้อ Thermo ประเทศสหรัฐอเมริกา

ที่มา: [http://www.npchemsupply.com/store/product/view/เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง\\_สเปกโตรโฟโตมิเตอร์\\_GENESYS\\_10S\\_UV\\_Vis\\_Spectrophotometer\\_Thermo-27071896-en.html](http://www.npchemsupply.com/store/product/view/เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง_สเปกโตรโฟโตมิเตอร์_GENESYS_10S_UV_Vis_Spectrophotometer_Thermo-27071896-en.html)

## ส่วนประกอบหลักของ UV-Vis spectrophotometer มีอยู่ 5 ส่วนคือ

### 1. แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย สำหรับความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจะใช้หลอดดีวเทอเรียม (deuterium lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งให้แสงในช่วง 185-375 nm หลักการคือทำให้อะตอมดีวเทอเรียมที่อยู่ในสภาวะเร้าคายพลังงานออกมา ส่วนหลอดทังสเตน (tungsten filament lamp) จะให้ความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงแสงที่มองเห็นได้คือตั้งแต่ 320-2500 nm หลักการจะคล้ายกับหลอดไฟทังสเตนธรรมดาคือให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปจนกระทั่งหลอดทังสเตนร้อนและเปล่งรังสีออกมา

### 2. ส่วนเลือกความยาวคลื่น (Wavelength selector)

เป็นส่วนที่ใช้แยกความยาวคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเปแสงที่มีหลายๆความยาวคลื่น (polychromatic wavelength) ให้เป็นแถบแสงในช่วงแคบๆหรือเป็นความยาวคลื่นเดียว (monochromatic wavelength) เครื่องมือสมัยก่อนจะใช้ปริซึมหรือ ฟิลเตอร์สำหรับแยกความยาวคลื่นแต่ปัจจุบันเปลี่ยนมาใช้โมโนโครเมเตอร์ (monochromater) แบบเกรตติง (grating) สะท้อนแสงซึ่งมีลักษณะเป็นร่องเล็กๆขนานกันจำนวนมาก แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะตกกระทบบนผิวหน้าของร่อง แล้วสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เฉพาะความยาวคลื่นที่เราเลือกเท่านั้นจึงจะผ่าน ช่องแสงออก (exit slit) ไปสู่สารตัวอย่าง

### 3. ภาชนะใส่สาร (Cell หรือ Cuvette)

ภาชนะใส่สารตัวอย่างสำหรับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะเรียกว่า เซลล์หรือคิวเวต (Cuvette) มีหลายแบบหลายขนาดด้วยกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน หลักการสำคัญในการเลือกใช้ก็คือ การวัดในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตจะต้องใช้เซลล์ที่ทำจากควอตซ์ (quartz) เท่านั้น เนื่องจากแก้วสามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ ส่วนเซลล์ที่ทำจากแก้วจะใช้วัดในช่วงแสงที่มองเห็นได้ นั้นหมายความว่าถ้าเราต้องการวัดสารในช่วงแสงที่มองเห็นได้ก็ควรจะใช้เซลล์ที่ทำจากแก้ว การใช้เซลล์ควอตซ์ไม่ได้มีผลให้การวัดแสงดีขึ้น แต่จะสิ้นเปลืองเปล่าประโยชน์เพราะควอตซ์มีราคาแพงกว่าแก้วมากส่วนการทำมาสะอาดเซลล์เพียงแค่ออกด้วยน้ำกลั่นหรือกลั่นด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมตามด้วยน้ำกลั่นก็เพียงพอ ห้ามขัดถูเพราะจะทำให้เซลล์มีรอยขีดข่วน

### 4. ตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector)

เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ ปัจจุบันเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ส่วนใหญ่ นิยมใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ 2 ชนิด คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube; PMT) และหลอดโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (photodiode arrays; PDA) หลอด PMT ประกอบไปด้วยแคโทด (cathode) ที่ฉาบผิวด้วยสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้เมื่อถูกแสงจำนวน 9 ชุด เรียกว่าไดโนด (dynode) แต่ละไดโนด

จะมีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อแสงตกกระทบกับไดโอดตัวที่หนึ่ง สารที่ฉาบผิวจะเกิดอิเล็กตรอนขึ้น แล้ววิ่งไปกระทบไดโอดตัวที่สอง สามสี่ จนครบทั้งเก้าตัว ดังนั้นปริมาณอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่าแล้วจึงชนแอโนดให้กระแสฟ้าออกมาเข้าเครื่องขยายสัญญาณต่อไป หลอด PDA ตัวจับสัญญาณชนิดนี้สามารถจับสัญญาณได้ครอบคลุมทั้งสเปกตรัมโดยใช้ไดโอดนี้มาเรียงต่อกันเป็นแถว ซึ่งสามารถวัดครอบคลุมสเปกตรัมได้ตั้งแต่ 200-1100 nm ตัวตรวจจับสัญญาณนี้ประกอบไปด้วยโฟโตไดโอด และตัวเก็บประจุ (capacitor) ประมาณ 200-4000 ตัวเรียงต่อกันเป็นแถว หลักการเริ่มต้นด้วยการให้ประจุไฟฟ้าไปทำลายประจุที่เก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุ ทำให้ต้องใส่ประจุเพิ่มเข้าไปใหม่ซึ่งเป็นช่วงของการสแกนแต่ละครั้งนั่นเอง ปริมาณของประจุที่ต้องใส่เข้าไปใหม่ จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มแสงที่วัดได้ของแต่ละไดโอด ดังนั้นจากการวัดปริมาณแสงที่แตกต่างกันตลอดช่วงความยาวคลื่นจะได้เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนของสารนั้นออกมา

#### 5. ส่วนบันทึกและแปรผลสัญญาณ (Recorder and Processor)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ และแปรผลสัญญาณให้ออกมาในมาตราส่วนแบบล็อก (log scale)

#### วิธีใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์อย่างง่าย (Application)

1. เปิดสวิตช์ใช้ไฟฟ้าเพื่ออุ่นเครื่องนานประมาณ 30 นาที
2. ปิดแสงจากภายในหรือภายนอกไม่ให้ตกกระทบตัวไวแสง โดยการปิดฝาครอบช่องใส่คิวเวต และปิดช่องแสงออก
3. เลือกความยาวคลื่นแสงที่ต้องการวัดโดยปรับปุ่มเลือกความยาวคลื่น
4. ปรับเครื่องเป็น 100%T หรือตั้งค่าการดูดกลืน ให้เป็นศูนย์ด้วยปุ่มปรับศูนย์ (ปุ่ม Calibrate)
5. ใส่สารละลายอ้างอิง (Reagent blank) ลงในช่องใส่คิวเวต แล้วปิดฝาช่องใส่คิวเวต
6. ปรับ 100%T หรือค่าการดูดกลืนให้เป็นศูนย์ด้วยปุ่มปรับศูนย์การปรับในขั้นตอนนี้ต้องกระทำทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงที่ใช้วัด
7. ใส่สารตัวอย่างลงในช่องใส่คิวเวต ปิดฝาช่องใส่คิวเวต
8. อ่านค่า %T หรือ Absorbance
9. หลังเสร็จการใช้งาน ปิดสวิตช์ แล้วปล่อยให้เครื่องเย็นสัก 15 นาที แล้วค่อยคลุมด้วยถุงคลุมเครื่องมือเพื่อป้องกันฝุ่น

### ง-3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

#### ง-3.1 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ ง-3 เครื่อง Carl Zeiss EVO MA10 SEM

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับการดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

## ภาคผนวก จ

### จ-1 ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>)

#### 1. การชั่งเคมีภัณฑ์ (Chemical Identification)

ชื่อเคมี IUPAC : Zinc chloride

ชื่อพ้องอื่นๆ : Zinc dichloride; Butter of zinc; Zinc butter; Tinning flux; Zinc chloride, solution

สูตรโมเลกุล : ZnCl<sub>2</sub>

สูตรโครงสร้าง : Cl<sup>-</sup> Zn<sup>2+</sup> Cl<sup>-</sup>

รหัส IMO :



รหัส UN/ID NO. : 2331 , 1840

รหัส EC NO. : 030-003-00-2

รหัส CAS NO. : 7646-85-7

รหัส RTECS : ZH 1400000

รหัส EUEINECS/ELINCS : 231-592-0

#### 2. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD50(มก./กก.) : 350 (หนู)

IDLH(ppm) : 9

PEL-TWA(ppm) : 0.18

TLV-TWA(ppm) : 0.18

TLV-STEL(ppm) : 0.36

พรบ. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 (ppm) เฉลี่ย 8 ชั่วโมง : 0.18

สารเคมีอันตราย : √

#### 3. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ : ผลึก,ผง

สี : ขาว

กลิ่น : ไม่มีกลิ่น

นน.โมเลกุล : 136.3

จุดเดือด(°ซ.) : 732

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(<sup>0</sup>ซ.): 293

ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1) : 2.910

ความดันไอ(มม.ปรอท) : 1 ที่ 428 <sup>0</sup>ซ.

ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) : 4.7

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : 432

ความเป็นกรด-ต่าง(pH) : 5 ที่ 20 <sup>0</sup>ซ.

แฟกเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm = 5.58 มก./ม<sup>3</sup> หรือ 1 มก./ม<sup>3</sup> = 0.18 ppm ที่ 25 <sup>0</sup>ซ.

ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ :

- สารนี้สามารถละลายได้ใน เมทานอล, เอทานอล, ไดเอทิลอ็อกไซค์ และไดเมทิลอ็อกไซค์

#### 4. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ :	- การหายใจเข้าไป สารนี้จะไปทำลายเนื้อเยื่อของเยื่อเมือก และทางเดินหายใจ ส่วนบน ทำให้เกิดการกล้ำเนื้อกระดูก การอักเสบและบวมของกล่องเสียงและหลอดลม ปอดบวม เจ็บหน้าอก น้ำท่วมปอด ทำให้เกิดอาการไอ แผลไหม้ จาม หายใจติดขัด หายใจถี่เร็ว ปวดศีรษะ ผิวน้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เป็นไข้ คลื่นไส้ และอาเจียนได้
สัมผัสทางผิวหนัง :	- การดูดซึมของสารผ่านทางผิวหนังจะก่อให้เกิดอันตรายได้ สารนี้จะไปทำลายเนื้อเยื่อหรือเยื่อของผิวหนังทำให้ผิวหนังแตก
กินหรือกลืนเข้าไป :	- การกลืนหรือกินเข้าไปจะทำให้การกัดกร่อนต่อปาก ลำคอ และทางเดินอาหาร ทำให้เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน ถ่ายเป็นเลือด ลำคอบวม พบเลือดในปัสสาวะ และอาจหมดสติได้
สัมผัสสุกตา :	- การสัมผัสสุกตา จะทำให้เกิดการกัดกร่อนต่อตา ทำให้ตาแดง และเกิดแผลไหม้ของกระจกตาได้
การก่อมะเร็ง : ความผิดปกติ,อื่น ๆ :	- การสัมผัสเรื้อรัง จะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเจริญเติบโตที่ผิดปกติของทารกในครรภ์

#### 5. การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- อย่าหายใจเอาฝุ่นของสารเข้าไป
- อย่าสัมผัสสุกตา ผิวน้ำ และเสื้อผ้า
- หลีกเลี่ยงการสัมผัสเป็นระยะเวลานาน

- ให้อ่างทำความสะอาดร่างกาย ให้ทั่วถึงภายหลังทำการเคลื่อนย้าย
- ชื่อทางการขนส่ง : Zine Chloride Anhydrous
- ประเภทอันตราย : 8
- รหัส UN/NA : UN2331
- ประเภทบรรจุภัณฑ์ : กลุ่ม III

#### 6. การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ให้เคลื่อนย้ายออกจากบริเวณที่มีการหกรั่วไหล
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA) ถุงมือยาง และรองเท้าบูทยาง
- ให้ดูดซับส่วนที่หกรั่วไหลด้วยปูนขาวแห้ง โซดาไฟ แล้วเก็บใส่ในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด และเก็บไว้เพื่อนำไปกำจัด
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด
- ล้างบริเวณสารหกรั่วไหล หลังจากสารเคมีถูกเก็บกวาดเรียบร้อยแล้ว

#### 7. อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE)

 <p>หน้ากากป้องกันการ หายใจ</p>	 <p>ถุงมือ</p>	 <p>ชุดป้องกันสารเคมี</p>	 <p>แว่นตานิรภัย</p>
--	---	--	---

#### 8. การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป :	- ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์
กินหรือกลืนเข้าไป :	- ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป หากผู้ป่วยยังมีสติอยู่ ให้บ้วนล้างปากด้วยน้ำ
สัมผัสถูกผิวหนัง :	- ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์ ให้ซักทำความสะอาดเสื้อผ้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ และให้ทิ้งรองเท้าที่เปื้อนสารเคมี
สัมผัสถูกตา :	- ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที โดยใช้นิ้วถ่างแยกเปลือกตาออกขณะที่ทำการล้าง นำส่งไปพบแพทย์ทันที

## 9. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- สารนี้เป็นอันตรายต่อแหล่งน้ำดื่ม
- จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์หากมีการใช้และจัดการกับสารอย่างเหมาะสม

## จ-2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

### 1. การชี้แจงเคมีภัณฑ์ (Chemical Identification)

ชื่อเคมี IUPAC : Sodium hydroxide

ชื่อพ้องอื่นๆ : Caustic soda ; Lye; Sodium hydrate; Soda lye; White Caustic; Lye, caustic; Augus Hot Rod;

สูตรโมเลกุล : NaOH

สูตรโครงสร้าง :  $\text{Na}^+ \text{OH}^-$

รหัส IMO :



รหัส UN/ID NO. : 1823

รหัส EC NO. : 011-002-00-6

รหัส CAS NO. : 1310-73-2

รหัส RTECS : WB 4900000

รหัส EUEINECS/ELINCS : 215-185-5

### 2. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD50(มก./กก.) : 40 (หนู)

IDLH(ppm) : 6.11

PEL-C(ppm) : 1.22

TLV-C(ppm) : 1.22  $\text{mg}/\text{m}^3$

พรบ. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 (ppm) เฉลี่ย 8 ชั่วโมง : 1.22

สารเคมีอันตราย : ✓

พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 : ชนิดที่ 1

หน่วยงานที่รับผิดชอบ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม

### 3. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ : ของแข็ง

สี : ขาว

กลิ่น : ไม่มีกลิ่น

นน.โมเลกุล : 40.00

จุดเดือด(0ซ.) : 1390

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.) : 318

ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) : 2.13

ความดันไอ(มม.ปรอท) : เล็กน้อย

ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) : >1.4

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : 111 ที่ 20 °ซ.

ความเป็นกรด-ด่าง(pH) : 13 - 14 ที่ 20 °ซ.

แฟกเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm = 1.635 มก./ม<sup>3</sup> หรือ 1 มก./ม<sup>3</sup> = 0.611 ppm ที่ 25 °ซ.

#### 4. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ :	- การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำให้เกิดการทำลายต่อทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้เกิดอาการจาม ปวดคอ หรือน้ำมูกไหล ปอดอักเสบอย่างรุนแรง หายใจติดขัด หายใจถี่เร็ว
สัมผัสทางผิวหนัง :	- การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้ และเกิดเป็นแผลพุพองได้
กินหรือกลืนเข้าไป :	- การกลืนหรือกินเข้าไป ทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ กระทบอาหาร ทำให้เป็นแผลเป็น เลือดออกในกระเพาะอาหาร อาเจียน ท้องร่วง ความดันเลือดลดต่ำลง อาจทำให้เสียชีวิต
สัมผัสถูกตา :	- การสัมผัสถูกตา จะมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลแสบไหม้ อาจทำให้มองไม่เห็นถึงขั้นตาบอดได้
การก่อมะเร็ง : ความผิดปกติ,อื่น ๆ :	- การสัมผัสสารติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อ - สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อ

#### 5. การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด ป้องกันการเสียหายทางกายภาพ
- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- เก็บห่างจากความร้อน, ความชื้น, สารที่เข้ากันไม่ได้
- เก็บห่างจากอะลูมิเนียม, แมกนีเซียม
- ภาชนะบรรจุของสารที่เป็นถึงเปล่า แต่มีกากสารเคมีตกค้างอยู่ เช่น ฟุ่น ของแข็ง อาจเป็นอันตรายได้
- อย่าผสมสารนี้กับกรดหรือสารอินทรีย์

- ให้สังเกตค่าเตือนและข้อควรระวังทั้งหมดที่ให้ไว้สำหรับสารนี้
- ชื่อในการขนส่ง : Sodium Hydroxide
- รหัส UN : 1832
- ประเภทอันตราย : 8
- ประเภทบรรจุหีบห่อ : กลุ่ม II
- รายงานข้อมูลสำหรับผลิตภัณฑ์/ขนาด : 300 ปอนด์

#### 6. การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ระบายอากาศบริเวณสารหกรั่วไหล
- ป้องกันบุคคลเข้าไปในบริเวณสารรั่วไหล
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เหมาะสม
- ให้ดูดซับส่วนที่หกรั่วไหลด้วยทราย, แร่เวอร์มิคิวไลต์ หรือวัสดุดูดซับอื่น
- เก็บส่วนที่หกรั่วไหลในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเพื่อนำไปกำจัด โดยวิธีไม่ทำให้เกิดฝุ่น
- ป้องกันไม่ให้สารเคมีที่หกรั่วไหล ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำ แม่น้ำ และแหล่งน้ำอื่น ๆ
- สารที่หลงเหลืออยู่ สามารถทำให้เจือจางด้วยน้ำหรือทำให้เป็นกลางด้วยกรด เช่น อะซีติก, ไฮโดรคลอริก, ซัลฟูริก
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

#### 7. อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE)

 หน้ากากป้องกันการ หายใจ	 ถุงมือ	 หน้ากากกระบังหน้า
---	---	---

#### 8. การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป :	- ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจลำบากให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์
กินหรือกลืนเข้าไป :	- ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ให้ดื่มน้ำหรือนมปริมาณมากๆ ห้ามไม่ให้สิ่งใดเข้าปาก ผู้ป่วยที่หมดสติ นำส่งไปพบแพทย์
สัมผัสผิวหนัง :	- ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบ

	แพทย์ทันที ชักทำความสะอาดเสื้อผ้าและรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่
สัมผัสถูกตา :	- ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาโดยทันทีด้วยน้ำปริมาณมากๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ๆ นำส่งไปพบแพทย์ทันที

### 9. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- สารนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- สารนี้เป็นพิษต่อปลา และแพลงก์ตอน ซึ่งส่งผลเป็นอันตรายเนื่องจากเปลี่ยนแปลงพีเอช อาจทำให้ปลาตายได้

### จ-3 ไฮโดรคลอริก (HCl)

#### 1. การข้บ่งเคมีภัณฑ์ (Chemical Identification)

ชื่อเคมี IUPAC : Hydrochloric acid

ชื่อเคมีทั่วไป : Hydrochloride

ชื่อพ้องอื่นๆ : Muriatic acid; Chlorohydric acid; Spirits of salts; Hydrogen chloride (acid); Hydrogen chloride; Hydrogen Chloride Gas only

สูตรโมเลกุล : HCl

สูตรโครงสร้าง : H — Cl

รหัส IMO :



รหัส UN/ID NO. : 1789

รหัส EC NO. : 017-002-00-2

รหัส CAS NO. : 7647-01-0

รหัส RTECS : MW 4025000

รหัส EUEINECS/ELINCS : 231-595-7

#### 2. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD50(มก./กก.) : 900 ( กระจาย )

LC50(มก./ม<sup>3</sup>) : 4655 (หนู)

IDLH(ppm) : 50

PEL-C(ppm) : 5

TLV-TWA(ppm) : 5

TLV-C(ppm) : 5

สารเคมีอันตราย : √

พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 : ชนิดที่ 3

### 3. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ : ของเหลว , ก๊าซ

สี : ไม่มีสี

กลิ่น : ฉุน

นน.โมเลกุล : 36.46

จุดเดือด(<sup>0</sup>ซ.) : 53

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(<sup>0</sup>ซ.) : -74

ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) : 1.18

ความหนืด(mPa.sec) : 0.0148

ความดันไอ(มม.ปรอท) : 190 ที่ 25 <sup>0</sup>ซ.

ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) : 1.3

แฟกเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm = 1.49 มก./ม3 หรือ 1 มก./ม3 = 0.67 ppm ที่ 25 <sup>0</sup>ซ.

ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ :

- สารนี้สามารถละลายได้ในเอทานอล

### 4. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ :	- การหายใจเอาไอระเหยของสารนี้เข้าไปจะก่อให้เกิดอาการไอ หายใจติดขัด เกิดการอักเสบของจมูก ลำคอ และทางเดินหายใจส่วนบน และในกรณีที่รุนแรง จะก่อให้เกิดอาการน้ำท่วมปอด ระบบหายใจล้มเหลว และอาจเสียชีวิตได้
สัมผัสทางผิวหนัง :	- การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเกิดผื่นแดง ปวดและเกิดแผลไหม้ การสัมผัสกับสารที่มีความเข้มข้นสูงจะก่อให้เกิดแผลพุพอง และผิวหนังเปลี่ยน
กินหรือกลืนเข้าไป :	- การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง จะก่อให้เกิดอาการปวด และเกิดแผลไหม้ในปาก คอ หลอดอาหาร และทางเดินอาหาร อาจก่อให้เกิดอาการ คลื่นไส้ และท้องร่วง และอาจทำให้เสียชีวิตได้
สัมผัสถูกตา :	- การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคืองและอาจก่อให้เกิดการทำลายได้ อาจทำให้เกิดแผลไหม้อย่างรุนแรง และก่อให้เกิดทำลายตาอย่างถาวรได้
การก่อมะเร็ง :	- การสัมผัสกับไอระเหยของสารเป็นระยะเวลานานจะก่อให้เกิดการก่อมะเร็ง

<p>ความผิดปกติ,อื่น ๆ :</p>	<p>ต่อกัน และทำให้เกิดฤทธิ์กัดกร่อน เช่นเดียวกับฤทธิ์ของการสัมผัสกรด</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ในบุคคลที่มีอาการผิดปกติทางผิวหนัง หรือเป็นโรคทางตา จะมีความไวต่อการเกิดผลกระทบบางชนิด</li> <li>- ไม่เป็นสารก่อมะเร็งตาม NTP จัดเป็นสารก่อมะเร็งประเภท 3 ตามบัญชีรายชื่อของ IARC</li> </ul>
-----------------------------	---

#### 5. การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด และป้องกันการเสียหายทางกายภาพ
  - เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
  - เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
  - เก็บในบริเวณที่มีพื้นป้องกันการรด และมีระบบระบายออกที่ดี
  - เก็บห่างจาก การสัมผัสโดยตรงกับแสง ความร้อน น้ำ และสารที่เข้ากันไม่ได้
  - อย่าทำการฉีดล้างภายนอกภาชนะบรรจุหรือนำเอาภาชนะไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น
  - เมื่อต้องการเจือจางให้ทำการค่อย ๆ เติมกรดปริมาณน้อย ๆ ลงในน้ำ อย่าใช้น้ำร้อนหรืออย่าทำการเติมน้ำลงในกรดเพราะจะทำให้ไม่สามารถควบคุมจุดเดือดของสารได้
  - เมื่อทำการเปิดภาชนะบรรจุสารที่ทำจากโลหะให้ใช้อุปกรณ์ที่ป้องกันการเกิดประกายไฟ เพราะในการเปิดอาจเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น
- ได้
- ภาชนะบรรจุของสารที่เป็นถังเปล่า แต่มีกากสารเคมีตกค้างอยู่ เช่น ไอร์อะเฮย ของเหลว อาจเป็นอันตรายได้
  - ให้สังเกตคำเตือนและข้อควรระวังทั้งหมดที่ให้ไว้สำหรับสารนี้
  - ชื่อทางการขนส่ง : Hydrochloric acid
  - รหัส UN : 1789
  - ประเภทอันตราย : 8
  - ประเภทการบรรจุหีบห่อ : กลุ่ม III

#### 6. การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ให้จัดให้มีการระบายอากาศในบริเวณที่มีการหกรั่วไหล
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม ให้กั้นแยกเป็นพื้นที่อันตราย และกั้นบุคคลที่ไม่มีหน้าที่เกี่ยวข้องและไม่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันออกจากบริเวณหกรั่วไหล
- ให้เก็บของเหลวที่หกรั่วไหลและนำกลับมาใช้ใหม่ถ้าสามารถทำได้

- ทำให้สารเป็นกลางโดยใช้สารที่เป็นเบส เช่น โซดาไฟ ปูนขาว และทำการดูดซับส่วนที่หก รั่วไหลด้วยวัสดุที่เฉื่อย เช่น แร่หินทราย(Vermiculite) ทรายแห้ง ดิน และเก็บใส่ในภาชนะบรรจุสำหรับกากของเสียเคมี

#### 7. อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE)

			
ถุงมือ	ชุดป้องกันสารเคมี	แว่นตานิรภัย	รองเท้าบูท

#### 8. การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป :	- ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์
กินหรือกลืนเข้าไป :	- ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียนให้ผู้ป่วยดื่มน้ำ หรือนมปริมาณมาก ๆ ถ้าสามารถหาได้ห้ามไม่ให้สิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ นำส่งไปพบแพทย์ทันที
สัมผัสถูกผิวหนัง :	- ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก ชักทำความสะอาดเสื้อผ้า และรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ นำส่งไปพบแพทย์
สัมผัสถูกตา :	- ถ้าสัมผัสถูกตาให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที กระพริบตาถี่ ๆ นำส่งไปพบแพทย์ทันที

#### 9. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

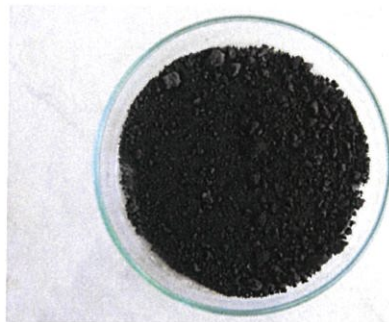
- เมื่อรั่วไหลลงสู่ดินคาดว่าสารนี้จะไม่เกิดการสลายตัวทางชีวภาพ และสารนี้อาจดูดซึมเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้
- สารนี้จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ จะเกิดอันตรายจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

## ภาคผนวก ฉ

### ฉ-1 การทำถ่านกัมมันต์



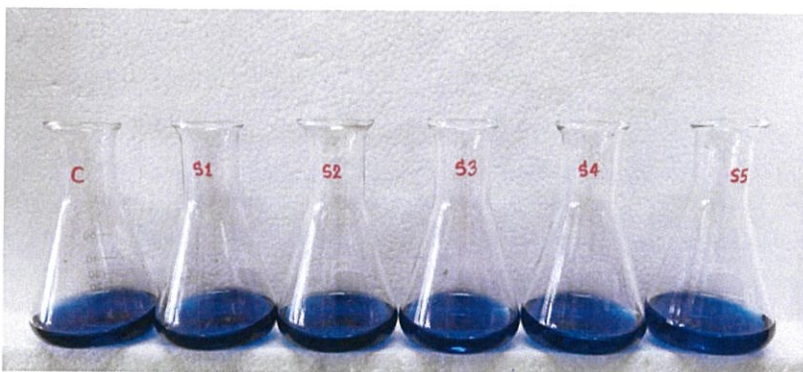
รูปที่ ฉ-1 กากกาแฟก่อนเผา



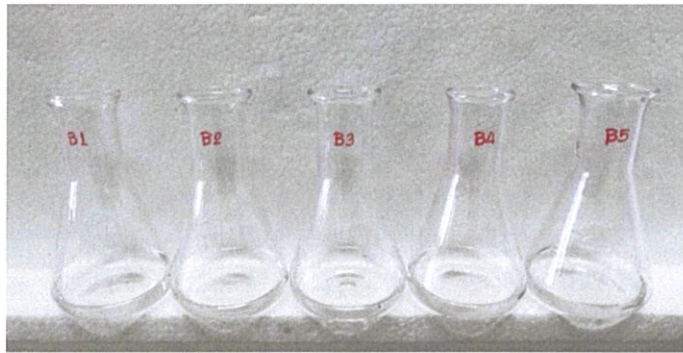
รูปที่ ฉ-1 กากกาแฟหลังเผา (ถ่านกัมมันต์)

### ฉ-1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อม

#### ฉ-1.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์



รูปที่ ฉ-3 สีของคอนโทรลและตัวอย่างหลังการดูดซับ

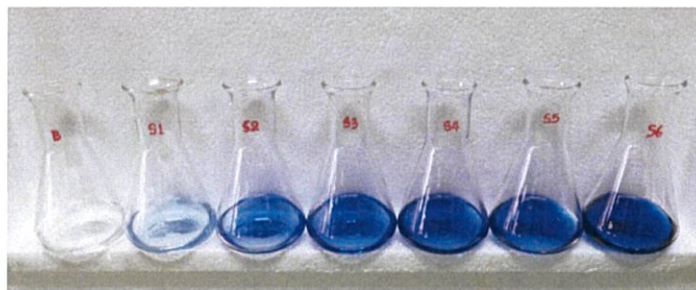


รูปที่ ฉ-4 สีของแบลงค์หลังการดูดซับ

### ฉ-1.2 ความเข้มข้นสีข้ม



รูปที่ ฉ-5 สีของคอนโทรล

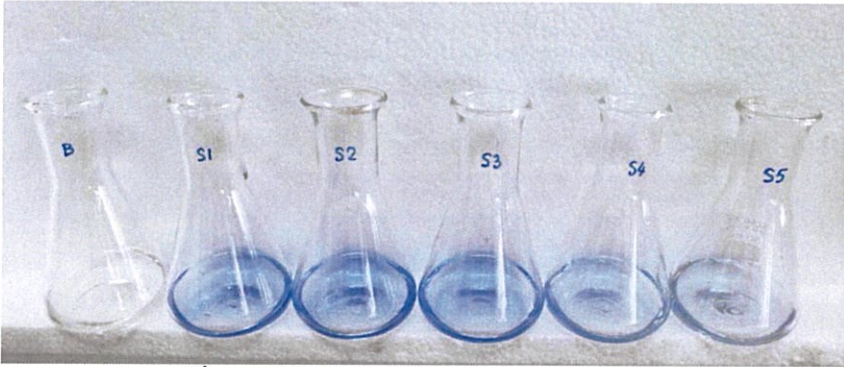


รูปที่ ฉ-6 สีของแบลงค์และตัวอย่างหลังการดูดซับ

### ฉ-1.3 พีเอชของสีข้ม

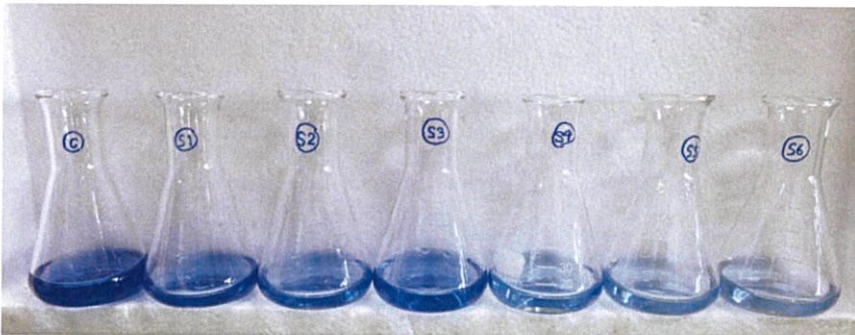


รูปที่ ฉ-7 สีของคอนโทรล



รูปที่ ฉ-8 สีของแบลงค์และตัวอย่างหลังการดูดซับ .

### ฉ-1.3 ระยะเวลาสัมผัส



รูปที่ ฉ-9 สีของคอนโทรลและตัวอย่างหลังการดูดซับ



รูปที่ ฉ-10 สีของแบลงค์หลังการดูดซับ

## ภาคผนวก ข

วิธีการศึกษาความสามารถในการนำถ่านมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ) (ัญลักษณ์ และคณะ, 2556)

1. นำถ่านกัมมันต์จากการทดลองใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
  2. เติมน้ำสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงขวดรูปชมพู่
- ในข้อ 1
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
  4. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
  5. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสี้อม Reactive Blue 19 ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร
  6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ พร้อมเตรียมกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์เป็นชุดควบคุม
  7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 อีก 3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนจากสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมเตรียมน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม
  8. คำนวณเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการคายซับสี้อม Reactive Blue 19