

การกำจัดสีย้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชา

ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

**REMOVAL OF MALACHITE GREEN USING WASTE TEA  
ACTIVATED CARBON BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION**

ชื่อย่อ

ผู้พิมพ์

นาย

โมรารรรถ

นิลอบ

อินทรฤทธิ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การกำจัดสีเขียวมรกตโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชา  
ที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

REMOVAL OF MALACHITE GREEN USING WASTE TEA  
ACTIVATED CARBON BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION

สัญลักษณ์	ชูพันธ์
นาย	โมรารรรถ
นิลบล	อินทรฤทธิ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

**REMOVAL OF MALACHITE GREEN USING WASTE TEA  
ACTIVATED CARBON BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION**

<b>MISS TANYALAK</b>	<b>CHOOPUN</b>
<b>MISS NATTAYA</b>	<b>MORAWAN</b>
<b>MISS NILOBON</b>	<b>INTARARIT</b>

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

โครงการพิเศษ	การกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ REMOVAL OF MALACHITE GREEN USING WASTE TEA ACTIVATED CARBON BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรัชฎักษณ์ ชูพันธ์ นางสาวนตยา โมรารวรรณ นางสาวนิโลบล อินทรฤทธิ์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนของตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากชาและทำการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 3:1 (w/w) โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับ รวมทั้งศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ผลิตได้มีคุณสมบัติทางกายภาพในการเป็นตัวดูดซับดีกว่าถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า แต่สำหรับความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีค่าเท่ากับ 3.84 และ 3.97 mg/g ตามลำดับด้านค่าไอโอดีน นัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีค่าเท่ากับ 93.33 และ 616.60 ตามลำดับนอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน คือ pH 5, ระยะเวลาดูดซับ 180 นาที, ความเข้มข้นของสารละลายสีข้อม 50 mg/L และปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 9.28 mg/g และ 9.84 mg/g ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองไอโซเทอร์มพบว่า กระบวนการดูดซับสอดคล้องตามสมการการดูดซับของ Langmuir Isotherm ( $R^2=0.9128$ ) และสุดท้ายคือ ความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่ โดยเปรียบเทียบสารละลายคาบซัน 2 ชนิด คือ น้ำกลั่นและกรดไนตริก 0.1 โมลาร์ พบว่า มีเปอร์เซ็นต์การคายซันเท่ากับ 2.7% และ 3.2% ตามลำดับ

คำสำคัญ : กากชา ถ่านกัมมันต์ การกระตุ้น การดูดซับ

<b>Title</b>	REMOVAL OF MALACHITE GREEN USING WASTE TEA ACTIVATED CARBON BY ZINC CHLORIDE ACTIVATION
<b>Students</b>	Miss Tanyalak Choopun Miss Nattaya Morawan Miss Nilobon Intararit
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Environmental Chemistry
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Miss Glinsukol Suwannarat

### ABSTRACT

The intent of this special project is to determine the removal efficiency of Malachite green dye using the waste tea activated carbon which are activated with Zinc Chloride in a ratio of 3:1 (w/w) as the adsorbent. The properties of producible activated carbon, and activated carbon for trading were compared. Studied factors focuses on the affect of adsorption from Malachite green dye with producible activated carbon, removal efficiency of Malachite green dye, the isotherm of adsorption, and desorption of the waste tea activated carbon. Results showed that the physical property of the waste tea activated carbon is not an effective absorbent compared to activated carbon for trading. However, the waste tea activated carbon is efficient adsorbing Methylene blue at 3.84 and 3.97 mg/g for producible activated carbon, and activated carbon for trading. The Iodine number for them are 93.33 and 616.60. In addition, the optimal condition for absorbing Malachite green dye is a pH of 5, with a contact time at 180 minutes, initial concentration of 50 mg/L, and 0.5 grams of absorbent dosage. The removal efficiency of Malachite green dye using producible activated carbon, and activated carbon for trading is 9.28 mg/g. and 9.84 mg/g, respectively. The conducted experiment corresponded with the Langmuir Isotherm model ( $R^2=0.9128$ ) when determining absorbtion efficiency. Whereas, the desorption of the waste tea activated carbon by distilled water and Nitric acid 0.1 Molar is 2.7% and 3.2%, respectively.

**Keywords** : Waste tea, Activated Carbon, Activation, Adsorption

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากท่านคณาจารย์ เจ้าหน้าที่หลายฝ่าย และหน่วยงานต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการจัดทำโครงการพิเศษครั้งนี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือดังมีรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณัฐคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือและการเอาใจใส่ในทุกๆ ด้าน รวมทั้งให้กำลังใจและความห่วงใยแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และอาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นกรรมการสอบ โครงการพิเศษ ตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงมาด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท ยูนิ-เพรสซิเดนท (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ที่พักอาศัยที่เสียทั้งจากกระบวนการผลิตในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ บริษัท P.K.S. 2000 จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์สีเขียวมมาลาไคท์กรีนในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และหน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องการบริการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างในโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณคุณคุณปราณี บุญวัฒน์ คุณชัชชัย ลัทธิลักขณา คุณสาคร สอนพงษ์ คุณณัฐพล ไกรธรรม และคุณอรุณา จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมีที่ใช้ในโครงการพิเศษ ให้คำปรึกษาและช่วยติดต่อประสานงานในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนการทำงานโครงการพิเศษ และขอบคุณเพื่อนๆ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ทุกคนที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวชัญญลักษณ์ ชูพันธ์

นางสาวนาตยา โมราวรรณ

นางสาวนิโลบล อินทรฤทธิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	XI
คำย่อและสัญลักษณ์	XIV
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 ถ่านกัมมันต์	3
2.1.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์	3
2.1.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์	4
2.1.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	7
2.1.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์	13
2.1.5 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	17
2.2 กากชา	18
2.3 อุตสาหกรรมฟอกย้อม	19
2.3.1 กระบวนการฟอกย้อม	19
2.3.2 การย้อมสี	21
2.3.3 สีย้อม	21
2.3.4 ประเภทของสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	26
2.3.5 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	27

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.6 ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	28
2.3.7 มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อม	28
2.3.8 วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย	29
2.4 การดูดซับ	30
2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ	30
2.4.2 ขั้นตอนของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	32
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์	33
2.4.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	34
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	43
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	43
3.1.1 อุปกรณ์	43
3.1.2 สารเคมี	43
3.2 วิธีการทดลอง	44
3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ	44
3.2.2 การเตรียมตัวดูดซับ	44
3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า	46
3.2.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมมาลาโคทกรี้นของถ่านกัมมันต์	47
3.2.5 การศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ)	50
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	53
4.1 ผลการศึกษาปริมาณความชื้น ถ้ำ สารระเหยและคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกากขาที่ผลิตได้	53
4.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า	53

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	53
4.2.2 ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของ ถ่านกัมมันต์	56
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู	57
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน	58
4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีข้อมมมาลาโคท์กรีนด้วยถ่าน กัมมันต์ที่ผลิตได้	59
4.3.1 ผลการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ	58
4.3.2 ผลการศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม	60
4.3.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ	61
4.3.4 ผลการศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม	62
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีข้อม มมาลาโคท์กรีน	62
4.4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมมมาลาโคท์กรีน	62
4.4.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ	63
4.5 ผลการศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ)	65
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	67
5.1 สรุปผลการวิจัย	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	69
<b>ภาคผนวก ก</b> ผลการทดลองปริมาณความชื้น ถ้ำ สารระเหยและคาร์บอนคงตัวของถ่าน กัมมันต์จากกากชา	74
<b>ภาคผนวก ข</b> การดูดซับเมทธิลีนบลู	79
<b>ภาคผนวก ค</b> การดูดซับไอโอดีน	86

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก การเตรียมกราฟมาตรฐานสีข้อมมาลาไคท์กรีน	100
ภาคผนวก จ ผลการทดลองการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน	103
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	130
ภาคผนวก ช ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าต่อระยะเวลาดูดซับ	160

# สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง	5
ตารางที่ 2.2	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด	5
ตารางที่ 2.3	อุณหภูมิที่เหมาะสมและชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพสำหรับแก๊สชนิดต่างๆ	11
ตารางที่ 2.4	สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น	11
ตารางที่ 2.5	คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์บางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด	16
ตารางที่ 2.6	คุณสมบัติทางเคมีของกากชา	18
ตารางที่ 2.7	องค์ประกอบทางเคมีของกากชา	19
ตารางที่ 2.8	ประเภทของสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยชนิดต่างๆ	24
ตารางที่ 2.9	ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์	27
ตารางที่ 2.10	มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อม	29
ตารางที่ 3.1	วิธีวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์	52
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา	56
ตารางที่ 4.2	ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	58
ตารางที่ 4.3	ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm	64
ตารางที่ ก-1	ปริมาณความชื้นของกากชาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน	75
ตารางที่ ก-2	ปริมาณเถ้าของกากชาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน	76
ตารางที่ ก-3	ปริมาณสารระเหยของกากชาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน	77
ตารางที่ ก-4	ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากชาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน	78
ตารางที่ ข-1	ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทธิลีนบลู	80
ตารางที่ ข-2	ผลการทดลองความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู	84
ตารางที่ ค-1	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาความเข้มข้นที่แน่นอน	91
ตารางที่ ค-2	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาความเข้มข้นที่แน่นอน	92
ตารางที่ ค-3	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์	92

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ค-4 การหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า	93
ตารางที่ ค-5 ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาค่าไอโอดีนนมเบอร์	96
ตารางที่ ค-6 การหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้	96
ตารางที่ ง-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาลาไคท์กรีน	101
ตารางที่ จ-1 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของชุดควบคุม ณ pH ต่างๆ	104
ตารางที่ จ-2 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ pH ต่างๆ	105
ตารางที่ จ-3 ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ถูกดูดซับ ณ pH ต่างๆ	106
ตารางที่ จ-4 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ณ pH ต่างๆ	107
ตารางที่ จ-5 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของชุดควบคุม ณ ระยะเวลาต่างๆ	108
ตารางที่ จ-6 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ ระยะเวลาต่างๆ	109
ตารางที่ จ-7 ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ถูกดูดซับ ณ ระยะเวลาต่างๆ	110
ตารางที่ จ-8 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ณ ระยะเวลาต่างๆ	111
ตารางที่ จ-9 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของชุดควบคุม ณ ความเข้มข้นต่างๆ	112
ตารางที่ จ-10 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ ความเข้มข้นต่างๆ	113
ตารางที่ จ-11 ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ถูกดูดซับ ณ ความเข้มข้นต่างๆ	114
ตารางที่ จ-12 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ณ ความเข้มข้นต่างๆ	115
ตารางที่ จ-13 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้	116
ตารางที่ จ-14 ปริมาณการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ถูกดูดซับ ณ ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ	117
ตารางที่ จ-15 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ณ ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ	118
ตารางที่ จ-16 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า ณ ประสิทธิภาพการดูดซับที่เหมาะสม	121
ตารางที่ จ-17 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ ประสิทธิภาพการดูดซับที่เหมาะสม	122
ตารางที่ จ-18 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้	125

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ จ-19 ความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ด้วยน้ำกลั่น (คายซับ)	128
ตารางที่ จ-20 ความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่กรดไนตริก (คายซับ)	128
ตารางที่ ฉ-1 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับแบบเป็นคู่	131
ตารางที่ ฉ-2 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับแบบเป็นคู่	139
ตารางที่ ฉ-3 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับแบบเป็นคู่	147
ตารางที่ ฉ-4 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่าปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับแบบเป็นคู่	156

# สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	ลักษณะ โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์แบบ Three-dimensional graphite	13
รูปที่ 2.2	ลักษณะ โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์แบบ Turbostratic structure	13
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์	14
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เป็นแกรไฟต์ง่าย	14
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เป็นแกรไฟต์เล็กน้อย	15
รูปที่ 2.6	สูตร โครงสร้างของมาลาไคท์กรีน	25
รูปที่ 2.7	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้นและสี่ชั้น	31
รูปที่ 2.8	กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์	32
รูปที่ 2.9	ช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์	33
รูปที่ 2.10	ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	35
รูปที่ 2.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X}{m}$ และ $C_c$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	37
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_c}{X/m}$ และ $C_c$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	37
รูปที่ 2.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_c$ และ $\log C_c$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ ฟรอยด์ลิช	38
รูปที่ 4.1 (ก)	ลักษณะพื้นผิวของกากชา กำลังขยาย 500 เท่า	54
รูปที่ 4.1 (ข)	ลักษณะพื้นผิวของถ่านชาก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ กำลังขยาย 1,000 เท่า	54
รูปที่ 4.1 (ค)	ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ กำลังขยาย 1,000 เท่า	55
รูปที่ 4.1 (ง)	ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า กำลังขยาย 1000 เท่า	55
รูปที่ 4.2	เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการดูดซับสีข้อมมาลา ไคท์กรีน กำลังขยาย 1,000 เท่า	56
รูปที่ 4.3	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทธิลินบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและ ถ่านกัมมันต์จากกากชา	57
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนกับค่า pH	59

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับระยะเวลาดูดซับ	60
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับความเข้มข้นของสารละลาย	61
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับปริมาณถ่านกัมมันต์	62
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา	63
รูปที่ 4.9 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm	63
รูปที่ 4.10 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm	64
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคายซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับชนิดของสารละลาย	65
รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสี่อ้อมเมทธิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสง	81
รูปที่ ข-2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทธิลีนบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา	85
รูปที่ ค-1 ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า	95
รูปที่ ค-2 ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้	98
รูปที่ ง-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนและค่าการดูดกลืนแสง	102
รูปที่ จ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับค่า pH	107
รูปที่ จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับระยะเวลาดูดซับ	111
รูปที่ จ-3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับความเข้มข้นของสารละลาย	115
รูปที่ จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสี่อ้อมมาลาไคท์กรีนกับปริมาณถ่านกัมมันต์	118

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ จ-5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีซีย้อมมาลาโคท์กรีนของถ่านกัมมันต์เพื่อ การค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา	123
รูปที่ จ-6 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm	125
รูปที่ จ-7 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm	126
รูปที่ จ-8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคายซับสีซีย้อมมาลาโคท์กรีน กับชนิดของสารละลาย	129

## คำย่อและสัญลักษณ์

AC	ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า
BOD	บีโอดี (ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี)
cc/g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
COD	ซีโอดี (ความต้องการออกซิเจนทางเคมี)
g	กรัม
g/cm <sup>3</sup>	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g/meq	กรัมต่อมิลลิอิควิวาเลนต์ (กรัมต่อมิลลีสมมูล)
lb/Cu.ft	ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต
M	โมลาร์ (โมลต่อลิตร)
mesh	เมช
mg	มิลลิกรัม
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
mm	มิลลิเมตร
m <sup>2</sup> /g	ตารางเมตรต่อกรัม
N	นอร์มัล
nm	นาโนเมตร
pH	ความเป็นกรดด่าง
Pt-Co	หน่วยของการวัดสี (Platinum Cobalt Unit)
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SS	ของแข็งแขวนลอย
WTAC	ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์
%	เปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ
$\Delta H$	เอนทาลปี

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมสิ่งทอประเภทเส้นใยธรรมชาติ เช่น ขนสัตว์ ผ้าไหม ผ้าฝ้าย เป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้จากการส่งออกให้กับประเทศไทย การขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบในปริมาณมากเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งน้ำที่ผ่านจากกระบวนการผลิตมักจะมีการปนเปื้อนของมลสาร เช่น สีย้อม เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดแล้วสีของสีย้อมยังคงตกค้างอยู่ในน้ำทิ้ง ผลของสีที่ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาพไม่น่าดู และกั้นขวางปริมาณแสงที่ส่องผ่านสู่แหล่งน้ำส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชน้ำลดลง ผลที่ตามมาคือ แหล่งน้ำมีออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ (วนิดา, 2555) ซึ่งการลดปริมาณสีย้อมในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นอยู่ในขณะนี้ได้

มอลาไลท์กรีน (Malachite Green) เป็นสีเบสิก (Basic Dyes) มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนใน ส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) (Windholz *et al.*, 1976) เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งวิธีการกำจัดสีย้อม ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมีกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเทคโนโลยีเยื่อแผ่น (พงษ์ศักดิ์, 2555) ซึ่งการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่นิยมในการกำจัดสีย้อมที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารพิษและสีย้อมออกจากน้ำเสีย แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์สังเคราะห์เป็นตัวดูดซับที่มีราคาสูงจึงถูกนำมาใช้อย่างจำกัด โดยเฉพาะในประเทศที่กำลังพัฒนา ดังนั้นจึงมีการคิดค้นการใช้ถ่านกัมมันต์ราคาถูกจากวัสดุธรรมชาติ เช่น กาบมะพร้าว เปลือกไม้ ชังข้าวโพด แกลบ กากชา เป็นต้น เนื่องจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาไม่แพงทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ

ในการศึกษากระบวนการดูดซับสีย้อมมอลาไลท์กรีน ในครั้งนี้ ได้เลือกใช้กากชาที่ทำให้เป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งกากชาจัดเป็นชีวมวลที่มีปริมาณมากเนื่องจากในปัจจุบันมีความนิยมในการบริโภคผลิตภัณฑ์จากชาเพิ่มมากขึ้น กากชาเป็นวัสดุธรรมชาติเหลือใช้ที่ผู้ประกอบการมักจะทิ้งอย่างไม่มีมูลค่า ทำให้เกิดเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมและเป็นการเพิ่มปริมาณขยะ การนำกากชามาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อม เป็นอีกวิธีหนึ่งในการนำวัสดุทางธรรมชาติเหลือใช้กลับมาใช้เพื่อเป็นประโยชน์

ต่อสังคม โดยทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน ออกจากน้ำเสียในสถานะที่เหมาะสมของการดูดซับและศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้
3. เพื่อศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมตัวดูดซับจากกากชาให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์
2. วิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยมีสมบัติที่วิเคราะห์คือ ลักษณะพื้นผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดพื้นที่ผิว เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูและค่าการดูดซับไอโอดีน
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ค่าความเป็นกรดต่าง, ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม), ระยะเวลาดูดซับ (นาทิจ), ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัม/ลิตร)
4. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยใช้น้ำเสียดังเคราะห์
5. วิเคราะห์ปริมาณสีข้อมที่ถูกดูดซับโดยใช้เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากชาที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอที่มีสีข้อมชนิดอื่นๆ ปนเปื้อนได้
2. ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสียดังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์
3. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์มาดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้ง
4. ลดปัญหาการจัดการกากชาเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐานชนิดหนึ่ง (amorphous carbon) แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งจะช่วยให้พื้นผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก ถ้าหากศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ (X-ray diffraction) จะพบว่าโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความแตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านโค้ก ถ่านไม้ ถ่านลิกไนต์ หรือแกรไฟต์ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงอันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง พื้นผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง (ปรินทร, 2551)

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้น ไม่มีขี้ แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล (silica gel) จึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า (เพ็ชรพรค, 2535) ถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกและจะเปลี่ยนขนาดรูปร่างตามอุณหภูมิที่เผา รูปร่างอะตอมคาร์บอนจะเปลี่ยนตามส่วนประกอบและ โครงสร้างของวัตถุดิบ โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีผลอย่างมากต่ออัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อขนาด โดยรูพรุนขนาดใหญ่จะไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์มากนัก ดังนั้นในการกระตุ้นคาร์บอนจึงทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 20,000 อังสตรอม ทำให้พื้นที่ผิวสูง และมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) สูงด้วยเช่นกัน วิธีวัดความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์อาจกระทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ลักษณะของสารดูดซับ (nature of adsorbate) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อุณหภูมิ (temperature) และระยะเวลาดูดซับ (contact time)

#### 2.1.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

ปลายศตวรรษที่ 15 องค์การบริการสาธารณสุขของประเทศสหรัฐอเมริกาได้นำถ่านจากไม้ (charcoal) มาใช้ในการดูดสีและกลิ่นจากน้ำธรรมชาติ เพื่อนำกลับมาใช้สำหรับอุปโภค

บริโกลินแหล่งชุมชน ใน ค.ศ. 1811 มีการนำถ่านที่ผลิตจากกระดูกสัตว์มาใช้ในการดูดสี พบว่าสามารถดูดสีได้ดีกว่าถ่านไม้ จึงนำมาใช้ฟอกสีของน้ำตาลทราย ในปี ค.ศ. 1822 มีการนำถ่านมาผสมกับเลือดและขี้เถ้า (potash) ถ่านที่ได้มีคุณสมบัติในการดูดสีดีกว่าถ่านธรรมดาถึง 20-50 เท่า แต่การผลิตไม่เพียงพอต่อการใช้ในอุตสาหกรรม ต่อมาในปี ค.ศ. 1902 Ostreyko นักวิทยาศาสตร์ชาวโปแลนด์ ศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ โดยนำไม้ไปเผาในบรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และนำถ่านที่ได้ผสมกับคลอไรด์ของโลหะแล้วนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงในเวลาต่อมาได้มีการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าขึ้น พอสรุปโดยสังเขปได้ ดังนี้

- ค.ศ. 1906 เริ่มมีการตั้งโรงงานผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงธุรกิจขึ้นในยุโรป ชื่อ อีนิท (Eponite)
- ค.ศ. 1910 มีการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดในอุตสาหกรรมน้ำดื่ม เมืองรีดคิง ประเทศอังกฤษ
- ค.ศ. 1911 มีการตั้งโรงงานผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อ นอริท (Norit) ในยุโรป
- ค.ศ. 1913 การผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าได้กำเนิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ในชื่อว่า ฟิลท์ชาร์ (Filtchar)
- ค.ศ. 1928 มีการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงในการควบคุมกลิ่นและรส โดยบริษัท ชิคาโก มีทแพคเกอร์ จำกัด
- ค.ศ. 1929 ได้มีการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ สำหรับใช้ในสงครามประเทศเยอรมัน
- ค.ศ. 1930 ได้มีการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบหลายชนิด เพื่อให้มีความหลากหลายในการเลือกใช้งานได้มากขึ้น
- ค.ศ. 1978 ได้มีการคิดค้นพื้นสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว โดยนำไปเผาในเตาเผาภายใต้บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในประเทศสหรัฐอเมริกา  
จากนั้นก็มีการพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น เช่น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อย เปลือกถั่ว หรือถ่านลิกไนต์ เป็นต้น (นภารัตน์, 2545; บุญชัย, 2536)

### 2.1.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์แบ่งโดยอาศัยหลักต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งาน ตัวอย่างการแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

1. แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น
  - ก. ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่
  - ข. ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวิธีนี้มักจะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ดูดซับแก๊สและไอระเหย (นภารัตน์, 2545)

## 2. แบ่งตามขนาดอนุภาค

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon) มีลักษณะเป็นผง โดยทั่วไปจะผลิตโดยกระบวนการเผาไหม้ ถ่าน ขี้เลื่อย แล้วนำไปบดให้มีขนาดเล็กลง มีขนาดเล็กกว่า U.S. sieve เบอร์ 50 (297 ไมครอน) ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักนิยมใช้ในการดูดซับสารละลาย เช่น สี สารอินทรีย์ และการบำบัดน้ำเสีย

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon) มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัดเป็นเส้นกลมๆ แล้วตัดออกเป็นท่อนเท่าๆกัน หรืออาจทำเป็นเกล็ดที่ได้จากการย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ มีขนาดใหญ่กว่า U.S. sieve เบอร์ 50 (297 ไมครอน) จะใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือไอระเหย

ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและชนิดเม็ดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 โดยทดสอบตามมาตรฐานของ American Water Works Association (AWWA) แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20-0.75

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ไม่น้อยกว่า	0.36
ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547

3. แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ (ตามเกณฑ์ของ International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) (Simek, 1970)

ก. ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สและไอระเหย

ข. ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. ถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กและมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ

#### 4. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

ก. ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่ดูดซับสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

ข. ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับแก๊สพิษหรือไอระเหย

#### 5. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. สำหรับดูดซับแก๊ส (gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือ ถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

ข. สำหรับดูดซับสี (color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล

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

#### 6. แบ่งตามความเป็นกรดต่าง เมื่อละลายน้ำ

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นกรด โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl)

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H type) เป็นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ในสารละลายแล้วมีสมบัติเป็นด่าง โดยส่วนใหญ่หมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิว ได้แก่ ควินิน (quinine) ฟีนอล (phenol) และคาร์บอกซิเลท (carboxylate) (ปริญทร, 2551)

### 2.1.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการผลิต โดยรวมไปถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยเช่นกัน แต่โดยทั่วไปประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนทำให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์เซชัน และขั้นตอนการกระตุ้น โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ดังนี้ (ปรินทร, 2551)

#### 2.1.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การผลิตถ่านกัมมันต์จะเริ่มจากการใช้วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไม้ ซี้เลื้อย กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด แกลบ เมล็ดผลไม้ ยาง ถ่านหิน และพีท เป็นต้น วัสดุที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบควรมีลักษณะ ดังนี้

- เป็นของเหลือทิ้ง หรือเป็นของที่มีราคาถูก
- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- มีค่าคาร์บอนคงตัวสูง (fixed carbon)
- มีสารที่ระเหยได้ (volatile matter)
- มีปริมาณขี้เถ้า (ash) ต่ำ
- มีปริมาณความชื้น (moisture) ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม้สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ขึ้นอยู่กับการผลิต โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่ในบางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์เซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดก็ได้ (บุญชัย, 2536)

#### 2.1.3.2 การคาร์บอนไนซ์เซชัน (carbonization)

การคาร์บอนไนซ์เซชันเป็นกระบวนการทางไพโรไลซิส (pyrolysis) รูปแบบหนึ่งที่ทำให้เกิดการเผาวัตถุดิบในที่อวกาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (char) ส่วนที่หลุดออกมาเป็นของเหลวคือ น้ำมันทาร์ (tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส กระบวนการนี้เป็นการเพิ่มร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น ในกระบวนการไพโรไลซิสต้องการความร้อนซึ่งอาจได้ในแบบทางตรงหรือทางอ้อม แบบทางตรงอาจได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์

วัตถุดิบซึ่งมักเป็นวัสดุทางการเกษตร คือ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นโซ่ยาวและที่เป็นโซ่วง เช่น ลิควิน เซลลูโลส ฯลฯ เมื่อนำมาคาร์บอนไนซ์เซชันจะเกิดการสร้างวงอะโรมาติก (aromatization) ซึ่งเป็นวงหกเหลี่ยมที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (resonance) ได้ทั่วโครงสร้าง เรียกว่า วงเบนซีนหรือวงอะโรมาติก วงเบนซีนแต่ละวงจะเชื่อมติดกันจนมีลักษณะเป็นแผ่น ในโครงสร้างถ่านจะมีแผ่นของวงเบนซีนอยู่หลายแผ่น เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ อย่างไม่เป็นระเบียบ การเรียงตัวเป็นชั้นๆนี้จะเกิดแรงผลักระหว่างชั้นจากไพอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ที่อยู่บนและล่างของแต่ละชั้น ถ่านจะสร้างเสถียรภาพด้วยการใช้ไพอิเล็กตรอนสร้างพันธะ โดยการดึงอะตอมแปลกปลอมอื่นเข้าสู่โครงสร้าง เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน หรือฟอสฟอรัส ฯลฯ แต่การดึงอะตอมออกซิเจนจากบรรยากาศจะง่ายที่สุด ดังนั้นจึงพบออกซิเจนในโครงสร้างถ่านเสมอ

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากจะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอนไนซ์เซชันธาตุและองค์ประกอบต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ถ่านชาร์ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยที่ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันควรมีลักษณะ ดังนี้

- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวมัน
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- ปราศจากฝุ่นผงและขี้เถ้า

การคาร์บอนไนซ์เซชันเพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับสภาวะให้เหมาะสมโดยมีตัวแปรคือ

- อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และแก๊สที่ได้จะเพิ่มมากขึ้นและคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น

- อัตราความร้อน

อัตราความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติและปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว จะมีผลทำให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันด้วยอัตราการ

เพิ่มอุณหภูมิสูงคาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้นสารกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

#### - ตัวกลางของปฏิกิริยา

ตัวกลางของปฏิกิริยามีผลกระทบต่อปฏิกิริยาถ้าแก๊สและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลางเช่น แก๊สไนโตรเจน (เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

#### - ธรรมชาติของวัสดุคิบ

วัสดุคิบแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอนไนซ์เซชัน โดยถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันอาจมีวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในระบบที่เหมาะสมต่อไป (ณัฐยา, 2545; นภารัตน์, 2545; อนุสรณ์ และคณะ, 2541)

#### 2.1.3.3 การกระตุ้น (activation)

การกระตุ้น หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ถ่านมีความว่องไวมากขึ้น ความหมายของการกระตุ้นมี 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไปและส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active center) (อนุสรณ์ และคณะ, 2541)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกวิธีการกระตุ้นที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

#### 1. วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

วิธีนี้เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพโดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง ซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ แก๊สออกซิเจนร่วมกับการใช้

ความร้อน ฯลฯ แก๊สที่เป็นตัวออกซิไดซ์จะทำปฏิกิริยากับน้ำมันทาร์และอะตอมของคาร์บอน ทำให้ น้ำมันทาร์ถูกกำจัดออก ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีรูพรุนกว้างมากขึ้นและมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นวิธีนี้คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีในวัตถุดิบ คุณสมบัติทางเคมี อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

#### ก. การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation)

ปฏิกิริยานี้ใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน การกระตุ้นวิธีนี้จึงต้องทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 750-950 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 2.1 (วิจิตร, 2543)



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,100 องศาเซลเซียส เพราะคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกจำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดและความพรุนของอนุภาคเล็กลง

#### ข. การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide activation)

ปฏิกิริยานี้ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ และเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังสมการที่ 2.2 (นิชชรี, 2539)



จากค่า  $\Delta H$  จะเห็นว่าวิธีการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า คือ ประมาณ 850-1,100 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปแล้วจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ซึ่งจะเกิดทั้งไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ หรืออาจจะเติมไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้นโดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

#### ค. การกระตุ้นด้วยอากาศ (Air activation)

ปฏิกิริยานี้อาศัยออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 (Simek, 1970)



การกระตุ้นด้วยอากาศไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยากกว่าปฏิกิริยาคูดความร้อน อีกทั้งออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิที่เหมาะสมและชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพสำหรับแก๊สชนิดต่างๆ

ชนิดของแก๊ส	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	ชนิดของปฏิกิริยา
ไอน้ำ	750-950	ดูดความร้อน
คาร์บอนไดออกไซด์	850-1,100	ดูดความร้อน
ออกซิเจน	ต่ำกว่า 600	คายความร้อน

ที่มา : กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2530

ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพนี้คือไม่มีสารตกค้าง แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี (ปิยะพร, 2542)

## 2. วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

วิธีนี้เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมี ที่เรียกว่า สารกระตุ้น (Activating agent) ทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเผาให้เป็นถ่านธรรมชาติ ซึ่งผลที่ได้จะได้ร้อยละคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาก็จะลดลงด้วย สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นเกลืออนินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้น

สารกระตุ้น	สารกระตุ้น
กรดบอริก ( $H_3BO_3$ )	โพแทสเซียมโซโอไซยานेट ( $K_2S_2O_3$ )
แคลเซียมคลอไรด์ ( $CaCl_2$ )	แมงกานีสคลอไรด์ ( $MnCl_2$ )
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ )	แมงกานีสซัลเฟต ( $MnSO_4$ )
แคลเซียมฟอสเฟต ( $Ca(PO_3)_2$ )	กรดไนตริก ( $HNO_3$ )
โซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ )	โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ )
ปูนไดโลไมด์ ( $CaMg(CO_3)_2$ )	โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ )
เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ )	กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )
กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ )	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $KOH$ )
โพแทสเซียมซัลไฟด์ ( $K_2S$ )	ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ )

ที่มา : กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2530

หลักการของวิธีนี้คือ นำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบผสมกับเกลืออนินทรีย์ ด้วยอัตราส่วนต่างๆและเผาในที่อับอากาศ จะทำให้วัตถุดิบที่สลายตัว เกลืออนินทรีย์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายวัตถุดิบให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และยังคงปริมาณน้ำมันทาร์และสารระเหยได้ เนื่องจากเกลืออนินทรีย์เหล่านี้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จึงยังคงสภาพอยู่รอบผิวถ่านและแทรกอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดได้จำกัด เมื่อสกัดสารอินทรีย์ออกก็จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้น

ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (ประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส) และได้ผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก และจะต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ (ชนกมล และคณะ, 2551)

ตัวอย่างการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี มีดังนี้

- กระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) (ยุวดี และคณะ, 2541)

สารดูดน้ำที่ใช้ส่วนมากเป็นเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น ซิงค์คลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ โดยวิธีการนี้นิยมใช้กับวัตถุดิบที่มีโครงสร้างละเอียด เช่น ถ่านดินพุด เปลือกถั่ว และขี้เลื่อย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของน้ำจะหลุดออกจากเซลล์และลิกนินซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในวัตถุดิบ ถ้ากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อุณหภูมิไม่สูงจะทำให้อนุภาคคาร์บอนไม่สามารถรวมตัวกันเป็นผลึกขนาดใหญ่ขึ้นได้ ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์จะมีรูพรุนมาก เพราะที่อุณหภูมิจึงค์คลอไรด์จะละลายน้ำมันทาร์ซึ่งถ่านกัมมันต์ดูดซับอยู่ออกไป และถ่านที่ได้จะจัดว่าเป็น Acid carbon

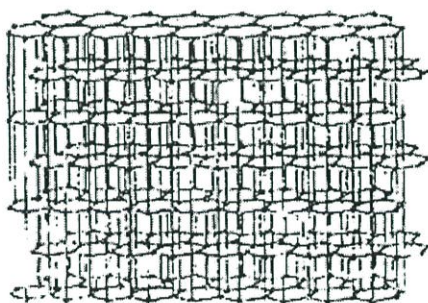
การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้น ซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีมีความสามารถในการกัดกร่อนโลหะ มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 136.29 เป็นของแข็งสีขาว ความถ่วงจำเพาะ 2.91 จุดหลอมเหลว 283 องศาเซลเซียส จุดเดือดเท่ากับ 732 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่ซิงค์คลอไรด์ที่ใช้อยู่ในรูปของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงอัตราส่วนที่ใช้คือ สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นประมาณ 0.5 ถึง 4 ส่วนต่อน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง 1 ส่วน บางครั้งอาจเติมกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดฟอสฟอริกลงไปเล็กน้อย จากนั้นนำไปเผาในที่อับอากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส แต่ก็มีงานวิจัยที่ใช้อุณหภูมิเพียง 400 องศาเซลเซียส หรืออาจสูงถึง 900 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ได้จำเป็นต้องนำไปล้างน้ำและกรดไฮโดรคลอริกเจือจางเพื่อกำจัดซิงค์คลอไรด์ที่เหลือออก พบว่าการใช้ปริมาณซิงค์คลอไรด์เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ข้อดีของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยซิงค์คลอไรด์คือ จะป้องกันไม่ให้ถ่านที่เพิ่งเตรียมได้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยการห่อหุ้มโครงสร้างของวัตถุดิบด้วยซิงค์คลอไรด์ ตั้งแต่ก่อนนำไปคาร์บอนไนซ์ ผลก็คือไม่เกิดน้ำมันทาร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาคาร์บอนไนซ์เซชัน และเกิด

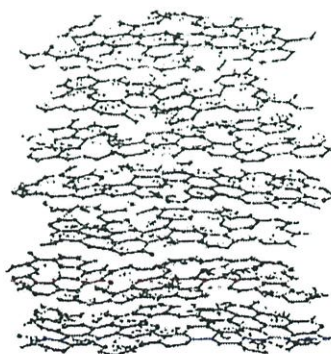
หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดและมีความสามารถในการดูดซับสูง เช่น Cl, COOH ฯลฯ ทำให้ถ่านมีความไวในการดูดซับสูงขึ้น

#### 2.1.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นผลึกซึ่งโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนโดยยึดเกาะกันในลักษณะหกเหลี่ยมด้วยพันธะโควาเลนต์ ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างคล้ายผลึกกับแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าโดยทั่วไปขนาดและรูปร่างโครงสร้างของผลึกเหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เผา ถ้าอุณหภูมิที่เผาสูงผลึกถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีขนาดเล็ก นอกจากนี้รูปร่างอะตอมของคาร์บอนยังเปลี่ยนตามส่วนประกอบและ โครงสร้างของวัตถุดิบ ผนังจะเกิดขึ้นด้วยกระบวนการหลายๆแบบ ในระหว่างที่มีการให้ความร้อนสารอินทรีย์จะรวมกันก่อให้เกิด โครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจะเกิดขึ้น โดยที่ยังมีส่วนของไฮโดรคาร์บอนและวงแหวนเหลืออยู่ ซึ่งสามารถสร้างพันธะกับธาตุอื่นที่เข้าไปจับกับอะตอมของไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน ทำให้มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

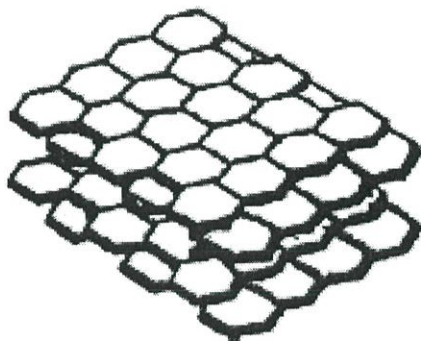


รูปที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์แบบ Three-dimensional graphite  
(กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2530)



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์แบบ Turbostratic structure  
(กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2530)

เมื่อศึกษาด้วยเอ็กซเรย์ดิฟแฟกชันพบว่า ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันในแนวราบ การจัดเรียงตัวของผลึกเล็กๆจะมีทิศทางไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน ผลึกเล็กๆนี้มักมีความสูง 9-12 อังสตรอม กว้าง (เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด) ประมาณ 20-30 อังสตรอม ประกอบด้วยแผ่นราบของชั้นระนาบแกรไฟต์ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 เท่า ของความกว้างของอะตอมคาร์บอนรูปหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.3

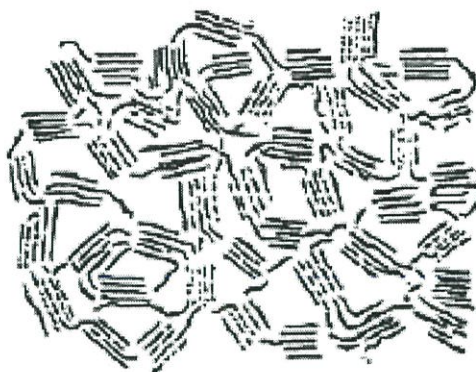


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (ปรินทร, 2551)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสถานะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ได้มีการพยายามแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามโครงสร้างของผลึกตัวอย่างเช่น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ง่ายที่อุณหภูมิสูง (easily undergoing graphitization) และโครงสร้างที่มีลักษณะแกรไฟต์เพียงเล็กน้อย (ที่สถานะเดียวกัน) (undergoing graphitization to small degree) (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2530; ธนกมล และคณะ, 2551; ปรินทร, 2551)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เป็นแกรไฟต์ง่าย (ปรินทร, 2551)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เป็นแกรไฟต์เล็กน้อย (ปรินทร, 2551)

#### 2.1.4.1 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

กระบวนการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือ การทำให้มีความพรุนมากขึ้น ไม่ใช่ทำให้ขนาดของรูใหญ่ขึ้น โดยเมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์แล้วจะพบว่า มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน ลักษณะของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน

การจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

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

ข. มีโซพอร์ (mesopores) หรือทรานซิชั่นัลพอร์ (transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15-20,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ค. ไมโครพอร์ (micropores) ขนาดรัศมีรูน้อยกว่า 12-15 อังสตรอม ปริมาตร 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมาก โดยมีค่าหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญมากที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับมากที่สุด รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเชื่อว่า ปริมาตรรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น (ปรินทร, 2551)

ตารางที่ 2.5 คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์บางชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ลักษณะสมบัติ	ชื่อการค้า			
	Darco	Calgon	Westvaco	Witco
	GAC	Filtrisorb	Nuclar	517
	20-40	300	WV-L	(12 x 30)
	Mesh	(8 x 30)	(8 x 30)	
พื้นที่ผิว, m <sup>2</sup> /g (BET)	650	950-1,050	1,000	1,050
ความหนาแน่นปรากฏ, g/cm <sup>3</sup>	0.40	0.48	0.48	0.48
ความหนาแน่นของการไหลย้อนกลับ, lb/Cu.ft	22.5	26	26	30
ความหนาแน่นจริง, g/cm <sup>3</sup>	*	2.1	2.1	2.1
ความหนาแน่นของอนุภาค, g/cm <sup>3</sup>	*	1.3-1.4	1.4	0.92
ขนาดประสิทธิภาพ	0.5	0.8-1.0	0.85-1.05	0.89
สัมประสิทธิ์ความคงตัว	1.3	< 1.9	< 1.8	1.44
ปริมาตรโพรง	0.95	0.85	0.85	0.60
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, mm	0.7	1.5-1.7	1.5-1.7	1.2
ร้อยละสูงสุดเมื่อผ่านตะแกรงร่อน				
ใหญ่กว่าเบอร์ 8 (%)	-	15	8	-
ใหญ่กว่าเบอร์ 12 (%)	10	-	-	5
เล็กกว่าเบอร์ 30 (%)	-	4	5	5
เล็กกว่าเบอร์ 40 (%)	5	-	-	-
ไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)	600	900	950	1,000
แอบราชันนัมเบอร์	*	78	70	85
เถ้า (%)	0.4	8	7.5	0.5
ความชื้นสูงสุด (%)	12	2	2	1

\* = ไม่มีข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

- = ไม่มีถ่านที่ผ่านตะแกรงร่อน

ที่มา : ปริทรรศ, 2551

### 2.1.5 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ประมาณร้อยละ 60 ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผง ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับสารที่เป็นของเหลว ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดใช้ในการดูดซับแก๊ส ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

- ก. ใช้กับการดูดซับแก๊สหรือไอ
  - ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป
  - ใช้แยกแก๊สโซลีนออกจากแก๊สธรรมชาติ
  - ใช้แยกเบนซีนออกจากแก๊สอุตสาหกรรม
  - ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
  - กำจัดสิ่งเจือปนออกจากแก๊ส เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
  - กำจัดกลิ่นในอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดลง
- ข. ใช้กับของเหลว (การฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น
  - การทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับคลอรีนและสารอื่นๆ ที่ติดมากับน้ำประปาหรือน้ำบาดาล ซึ่งอาจทำได้ 2 วิธี คือ ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงใส่ลงในน้ำแล้วกรองออก หรือใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดทำเป็นชั้นให้น้ำไหลผ่าน หลังจากนั้นจึงมีการตัดแปลงมาทำเครื่องกรองน้ำ ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง
  - ใช้เพื่อฟอกสีน้ำตาลในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล และใช้ในการดูดซับพวกโปรตีน เหล็ก หินปูน และฟอสเฟต ออกจากสารประกอบของเด็กซ์ทรีน (Dextrin) มอลโทส (Maltose) และเด็กซ์โทรส (Dextrose) ทำให้สีของซิริป (Syrup) อยู่คงทนไม่เปลี่ยนแปลงเป็นสีคล้ำเมื่อเวลาผ่านไป
  - ใช้กำจัดสิ่งปลอมปนในน้ำมันพืช และใช้ดูดซับตัวยับยั้ง (Inhibitor) ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันพืช
  - ใช้ถ่านกัมมันต์กำจัดรสและกลิ่นที่ไม่ต้องการออกจากวิสกี โดยให้วิสกีไหลผ่านชั้นของถ่านกัมมันต์ หรือใส่ถ่านกัมมันต์กับวิสกีโดยตรงแล้วกรองออก
- ค. ใช้กับอาหาร
  - ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดสีและกลิ่นที่ไม่ต้องการออกจากเจลาติน
  - ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับเพกติน (Pectin) ออกจากน้ำผลไม้ ทำให้น้ำผลไม้ใส

ง. ใช้ทำให้ตัวทำละลายบริสุทธิ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

- ในอุตสาหกรรมหลายประเภทนำตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมผลิตดินปืนชนิดไม่มีควัน อุตสาหกรรมผลิตฟิล์มถ่ายรูป อุตสาหกรรมผลิตหนังเทียม ฯลฯ โดยการใช้อ่างกัมมันต์เป็นตัวดูดซับสารเจือปนในตัวทำละลายที่ใช้แล้ว

จ. การประยุกต์งานอื่นๆ

- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้อาตุกูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยากจะค่อยๆออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ

- ใช้ใส่ในก้นกรองของบู่หรือบางชนิด (ปริณิทร, 2551; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

## 2.2 กากชา

กากชา คือ กากที่เหลือจากการนำชาไปชงดื่มแล้ว ซึ่งในกากชามีส่วนประกอบของใบชามากที่สุด คิดเป็น ร้อยละ 56 ส่วนที่เหลือเป็นส่วนของกากชาที่ไม่สามารถจำแนกส่วนประกอบได้อีก คือ ผงชา, ดาชา และก้านชา มีปริมาณร้อยละ 29, 9 และ 6 ตามลำดับ โดยส่วนประกอบของกากชาส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร และผงชาจะมีขนาดการกระจายอยู่ในทุกๆช่วง ยกเว้นช่วง 0.5-0.6 มิลลิเมตร ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของกากชาแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางเคมีของกากชา

คุณสมบัติ	กากชาเขียว
ความชื้น (ร้อยละ)	8.57±7.77
เถ้า (ร้อยละ)	7.10±2.82
สารระเหย (ร้อยละ)	75.43±0.47
คาร์บอนคงตัว (ร้อยละ)	8.63±6.98
ค่าความร้อน (cal/g)	4,390

ที่มา: วนิตา, 2548

ส่วนการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากชา ที่ทำการวิเคราะห์โดยเครื่อง Electron Dispersive Spectrometer (EDS) แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของกากชา

องค์ประกอบทางเคมี	กากชา (ร้อยละ)
คาร์บอน (C)	68.08±0.14
ออกซิเจน (O)	26.38±0.93
ไนโตรเจน (N)	5.72±4.12
ซัลเฟอร์ (S)	0.09±6.12
แมกนีเซียม (Mg)	0.37±7.73
ซิลิกอน (Si)	0.64±6.28

ที่มา: วนิดา, 2548

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากชา (ตารางที่ 2.7) พบว่ากากชามีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 68.83 ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการผลิตถ่านกัมมันต์จะเริ่มจากการใช้วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

## 2.3 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย โดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้นปริมาณน้ำเสียจึงมีอยู่เป็นจำนวนมาก สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทนี้มีหลายชนิด แต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับเส้นใยต่างกัน

### 2.3.1 กระบวนการฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังคงเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ โดยทั่วไปวัตถุดิบจะถูกเตรียมสภาพให้พร้อมเข้าสู่กระบวนการฟอกย้อมหรือตกแต่ง ให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้ หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมสิ่งทอขั้นต่อไป กระบวนการผลิตหลักของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีรายละเอียดสรุปได้ ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

#### 1. การขนส่งและรับวัตถุดิบ

โรงงานภายในเครือข่ายทำการผลิตเส้นด้ายหรือผ้าดิบป้อนวัตถุดิบให้กับโรงงานฟอกย้อม

#### 2. การเผาขน (Singeing)

เป็นการกำจัดปลายเส้นใยที่โผล่ออกมาบนหน้าผ้า เพื่อให้ผ้ามีผิวมันเรียบเป็นเงา

มัน และทำให้สีที่ข้อมติดบนเนื้อผ้าได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการเผาด้วยเปลวไฟจากแก๊ส ด้วยการควบคุมความเร็วผ้าดิบที่วิ่งผ่าน ระยะห่างระหว่างเปลวไฟกับหน้าผ้า และอุณหภูมิเปลวไฟ

### 3. การลอกแป้ง (Desizing)

เป็นกระบวนการที่ต้องกำจัดแป้งที่ลงไว้ที่อยู่ในเส้นด้ายยัดออก เนื่องจากแป้งที่เคลือบอยู่จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำจัดออกไป

### 4. การกำจัดไขมันและสิ่งสกปรก (Scouring)

เป็นการกำจัดไขมัน เศษสิ่งสกปรก และสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น สารประกอบเกลือทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ เพื่อช่วยให้สีย้อมซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้น โดยทำการต้มผ้าในสารละลายโซดาไฟ สิ่งสกปรกเจือปนจึงถูกทำลายและละลายน้ำหลุดออกมา การตรวจสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งสกปรกนี้ สามารถกระทำได้ด้วยการตรวจดูคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของผ้า การตรวจดูความขาว เป็นต้น

### 5. การฟอกขาว (Bleaching)

เป็นการทำให้ผ้าขาวสะอาดพร้อมนำไปย้อมสีหรือพิมพ์ลาย โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น เป็นขั้นตอนที่จำเป็น โดยเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว สำหรับผ้าที่จะนำไปย้อมสีเข้มไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนนี้

### 6. การชุบมัน (Merceization)

เป็นการเพิ่มความเงามันและความแข็งแรงให้กับเส้นใย อีกทั้งยังทำให้การดูดซึมน้ำย้อมสีดีขึ้น โดยนำผ้าไปผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง แล้วฉีดล้างด้วยน้ำร้อนและทำให้เป็นกลางด้วยกรด การชุบมันจะไปช่วยสกัดขี้ผึ้งและไขมันในผ้าออก ทำให้เส้นใยพองตัวขึ้น

### 7. การย้อมสี (Dyeing)

สีที่นำมาใช้จะอยู่ในรูปของสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลาย (Dispersion) เพื่อให้ถูกดูดซึมและยึดติดผิวภายในเส้นใยได้ง่าย แล้วทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร ซึ่งกระบวนการย้อมโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การย้อมแบบต่อเนื่องและการย้อมทีละหม้อ

### 8. การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักจะกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการใช้งานของผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้หรือลูกค้า สามารถจำแนกตามกรรมวิธีการตกแต่งได้เป็น 2 ประเภท

ก. การตกแต่งด้วยวิธีทางเชิงกล (Mechanical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งโดยใช้เครื่องจักรในการผลิตทำให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

ข. การตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี (Chemical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอด้วยสารเคมี เพื่อให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

### 2.3.2 การย้อมสี (Textile Dyeing)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่จะต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งานด้วยวิธีการย้อม (Dyeing) จะให้สีพื้น ผ้ายีนหรือเส้นด้ายที่มีสีลักษณะแตกต่างกันไป สีที่นำมาใช้ย้อมผ้าจะอยู่ในรูปของสารละลายเพื่อให้ถูกดูดซึมและยึดติดผิวภายในเส้นใยได้ง่าย ซึ่งกระบวนการย้อมโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

#### 1. การย้อมแบบต่อเนื่อง (Continuous Dyeing Process)

เป็นการย้อมที่เร็วที่สุด และเหมาะสมกับการย้อมผ้าครั้งละมากๆ เพราะเป็นการย้อมที่ใช้ลูกกลิ้งอัดน้ำสีเข้าไปในเนื้อผ้าโดยที่ผ้าเคลื่อนที่ไปตามขั้นตอนต่างๆอย่างต่อเนื่อง การเกิดสีที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่สามารถซึมให้เกิดสีตลอด (Uniformly) การย้อมวิธีนี้มีข้อเสียคือ พบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ซ้ำ ทำให้ผ้าที่ได้อาจเสียหายจำนวนมาก นอกจากนี้ต้นทุนของเครื่องจักรยังมีราคาสูง จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม

#### 2. การย้อมแบบที่ละหม้อ (Batch Dyeing Process)

เป็นการย้อมแบบไม่ต่อเนื่องและย้อมได้ครั้งละน้อยเพราะต้องแช่ผ้าในหม้อย้อมที่มีสารละลายสีย้อมแล้วให้ดูดซึมสีเข้าเนื้อผ้า เครื่องย้อมมีหลายประเภท เช่น เครื่องเจ็ท เครื่องวินซ์ เครื่องจิกเกอร์ เครื่องย้อมด้ายแบบใจ เป็นต้น (กาญจนา และคณะ, 2551; จินตนา และคณะ, 2546)

### 2.3.3 สีย้อม

สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีหลายชนิด โดยการนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสถานะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วพันธะยึดติดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใย คือ

- พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)
- แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces)
- แรงไอออนิก (Ionic Forces)
- พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

การเกิดการดูดติดจะต้องประกอบด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการดูดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) (จินตนาและคณะ, 2546)

### 2.3.3.1 ประเภทของสีย้อม

สีย้อมแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ (รุจิรัตน์, 2546)

1. สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuff) ได้แก่ สีย้อมที่สกัดได้ตามธรรมชาติ เช่น จากต้นพืช เมล็ดพืช เปลือกหอยและอื่นๆ
2. สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuff) ได้แก่ สีย้อมที่ผลิตขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมสังเคราะห์

### 2.3.3.2 การจำแนกประเภทของสีย้อมสังเคราะห์

การจำแนกสีย้อมสังเคราะห์สามารถจำแนกได้หลายแบบ เช่น จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสีตามลักษณะการใช้งาน จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ จำแนกตามการใช้งาน และจำแนกตามวิธีการย้อม (นันทิยา และคณะ, 2547) โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างเพียงการจำแนกสีย้อมสังเคราะห์ตามลักษณะการใช้งาน (นภาพร, 2551)

1. สีแอซิด (Acid dyes) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง ซึ่งอาจนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ด้วย เช่น ใยพอลิเอไมด์ ป่าน และปอ สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน มีโครงสร้างเป็นไอออนลบในส่วนสารประกอบที่ให้สี สามารถละลายน้ำได้ดี
2. สีเบสิก (Basic dyes) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน ขนสัตว์และไหมบางชนิด จะย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย สีชนิดนี้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ให้แคทไอออน บางครั้งเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่าสีแคทไอออน สามารถย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลของสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย
3. สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออน โดยโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70–75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมที่ติดที่อุณหภูมิต่ำ
4. สีไดเรกต์ (Direct dyes) เป็นสีละลายน้ำใช้ได้โดยตรงกับเส้นใยเซลลูโลส ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อมใดๆ แต่บางครั้งใช้ย้อมเส้นใยขนสัตว์ได้ สีย้อมชนิดนี้ไม่ทนต่อการซักน้ำและซีดง่าย สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน การใช้สีย้อมประเภทนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ
5. สีมอร์แดนต์ (Mordant dyes) หรือสีโครม เป็นสีย้อมที่นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน สีย้อมกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมในกลุ่มสีย้อมแอซิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบโครออร์ดิเนตใหม่ที่ถาวรขึ้นกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม อลูมิเนียมและเหล็ก เป็นต้น สารโครออร์ดิ

เนตใหม่นี้จะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า จึงทำให้ความคงทนแสงและน้ำเพิ่มขึ้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้ จึงทำให้ย้อมได้ง่าย

6. สีอะโซอิก (Azoic dyes) สีย้อมกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมกับเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น สีชนิดนี้เป็นสารประกอบอะโซ แต่ตัวสีไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะย้อมติดเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลก่อน เรียกว่ากระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์ จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีชนิดนี้ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการซักถู สีอะโซอิก ได้แก่ สีเหลือง ส้ม แดง น้ำตาล

7. สีคิสเพิร์ส (Dispersed dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจะดูดซึมติดเส้นใยที่ไม่ชอบเท่านั้น เช่น เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยอะซิเตท ไนลอน และอะคริลิก สีชนิดนี้เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการผลิตจะต้องผสมตัวช่วยและบดสีให้เป็นผงละเอียด เพื่อให้สีสามารถกระจายตัวในน้ำ เพื่อให้ไม่เกิดการตกตะกอนในการย้อม

8. สีแว็ต (Vat dyes) นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ จึงต้องใช้ตัวรับอิเล็กตรอนที่เหมาะสมมาทำให้ละลาย สารที่รับอิเล็กตรอนที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือ จึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้

9. สีซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้ายโดยเฉพาะ สีย้อมที่ได้จะไม่ค่อยสดใส เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่ปัจจุบันมีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ ทำการแก้ปัญหาโดยนำสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ เพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่สามารถละลายน้ำได้ สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก สีชนิดนี้มักจะเป็นสีที่ทึบๆ หน้ๆ เช่น สีแดงดำ

10. สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex dyes) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสและให้สีต่างๆกัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ตกตะกอนภายในเส้นใยด้วย

ประเภทของสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยชนิดต่างๆ สามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ประเภทของสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใยชนิดต่างๆ

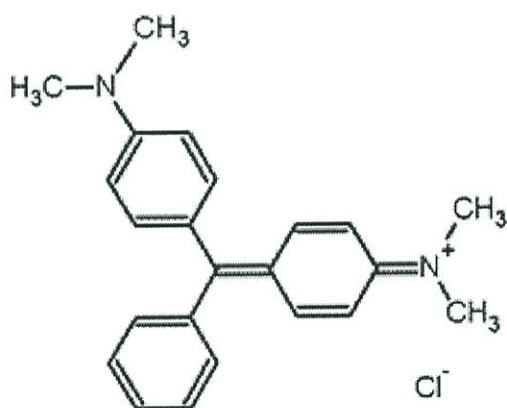
เส้นใย	ประเภทของสีย้อม									
	สีแอซิด	สีเบสิก	สีไดเรกท์	สีรีแอคทีฟ	สีมอร์แดนท์	สีอะโซอิก	สีดิสเพิร์ส	สีแว็ต	สีซัลเฟอร์	สีเมทัลคอมเพล็กซ์
เซลลูโลส (ฝ้าย, วิตโคส, ลินิน)		+	+	+				+	+	
เส้นใยจากพืชประเภท เฮมิ-เซลลูโลส (ป่าน, ปอ)	S	+	S							
เส้นใยโปรตีน (ขนสัตว์, ขนแกะ)	+	S	S	+	+			S		+
เส้นใยโปรตีน (ไหม)	+	S	S	+	+					+
เซลลูโลส ไดอะซิเตด ไตรอะซิเตด							S	+	+	
โพลีเอไมด์ ไนลอน 66	+		+	+	S			+		S
โพลีเอสเตอร์							S	+	S	
โพลีอะคริลิก		+		S				+		

หมายเหตุ : S = ใช้ได้บ้าง + = ใช้ได้ทั้งหมด

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2551

### 2.3.3.3 สีมาลาโคทท์กรีน(Malachite green)

จัดอยู่ในประเภท	สีเบสิก
สังเคราะห์จาก	Triphenylmethane (อัจฉราพร, 2530)
ชื่อทางเคมี	N-[4-[[4-(Dimethylamino)phenyl]phenylmethylene]- 2,5-cyclohexadien-1-ylidene]-N- methylmethanaminiumchloride
Color Index	42000
สูตรโมเลกุล	$C_{23}H_{25}N_2Cl$
น้ำหนักโมเลกุล	418.5
คุณสมบัติ	สามารถละลายได้ในน้ำ แอลกอฮอล์ และเมทานอล (Windholz <i>et al.</i> , 1976)



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของมาลาโคทท์กรีน (รุจิรัตน์, 2456)

การใช้ประโยชน์ของสีมาลาโคทท์กรีน (Srivastaba *et al.*, 1995)

1. ใช้เป็นสีย้อมผ้าในอุตสาหกรรมสิ่งทอ
2. นำมาเป็นส่วนผสมในน้ำยาฆ่าเชื้อสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น น้ำยาฆ่าเชื้อรา น้ำยาฆ่าเชื้อพราสิต น้ำยาฆ่าแบคทีเรียและน้ำยาฆ่าโปรโตซัว

โทษของสีมาลาโคทท์กรีน (Fernandes *et al.*, 1991;Srivastava *et al.*, 1995)

1. มีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม
2. ทำให้เกิดเนื้องอกในตับของหนูทดลอง
3. เป็นสาเหตุของความผิดปกติในระบบสืบพันธุ์ของกระต่ายและปลา
4. เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

#### 2.3.3.4 อันตรายที่เกิดจากความเป็นพิษของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารที่สลายตัวชีวภาพได้ยาก มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำค่อนข้างต่ำ ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำเสีย แม้มีสีย้อมในปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้เป็นที่รังเกียจต่อผู้พบเห็นได้ เนื่องจากเป็นสารที่มีความเข้มข้น โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสามารถสังเกตเห็นได้จะอยู่ในช่วง 0.1–1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดของสีย้อม ปริมาณแสงและระดับความใสของน้ำ จากการศึกษาพบว่าสีย้อมที่ปล่อยจากโรงงานฟอกย้อมมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีสีย้อมบางชนิดที่มีโลหะปนเปื้อน ซึ่งมีผลทำให้ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด ทำให้เอนไซม์ทำงานได้น้อยลงหรือไม่ได้เลย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่โรงงานฟอกย้อมจะต้องกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย ถึงแม้ว่าสีย้อมจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม (ปรางศิริ, 2551) สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้งานได้ 3 ทางคือ ทางจมูกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัสและทางเดินระบบอาหาร โดยปนเข้าไปกับอาหาร

สีย้อมสามารถสร้างอันตรายต่อมนุษย์ได้ ดังนี้ (รุจิรัตน์, 2546)

1. อันตรายต่อผิวหนัง (skin sensitization) ความเป็นไปได้ของการเกิดโรคผิวหนังจากการสัมผัสกับสีย้อมมีความเป็นไปได้ต่ำมาก แต่มีบางคนที่เกิดโรคผิวหนังจากการสัมผัสกับสีย้อม เรียกกันว่า Panty-hose syndrome โดยจากรายงานของอังคณา ตูลย์ไทรรัตน์ (2540) กล่าวว่าแม้สีย้อมจะมีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำ แต่อาจทำให้ผู้ใช้เกิดอาการแพ้พิษจากสีย้อมได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันที่เหมาะสมที่สุด ผู้ใช้ควรปฏิบัติตามคำเตือนบนฉลาก จะช่วยให้ผู้ใช้มั่นใจและไม่ประมาทต่อการใช้สีย้อม

2. อันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ (respiratory sensitization) โดยปกติแล้วร่างกายของมนุษย์จะสร้าง IgE เป็นสารต่อต้านเชื้อโรคประเภทแอนนาฟีแลคติกในมนุษย์และหนู ซึ่งเป็นสารเฉพาะพิษนั้นๆ ส่งผลให้มีอาการของโรคระบบทางเดินหายใจหรือทำให้มีอาการทรมานทรมายเมื่อสูดดมสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้เข้าไป ซึ่งอาจเกิดอาการชักตามมาจนถึงขั้นโคม่าและเสียชีวิตในที่สุด

3. ความสามารถในการก่อมะเร็ง (carcinogenicity) สีย้อมที่มีเบนซีนเป็นส่วนประกอบสามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้ ซึ่งสีย้อมอะโซเป็นสีที่รู้กันว่าสามารถก่อมะเร็งได้ เนื่องจากหลังจากการแตกตัวของกลุ่มอะโซแล้วจะให้อะโรมาติก

#### 2.3.4 ประเภทของสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

สิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมแบ่งได้ ดังนี้ (จินตนาและคณะ, 2546)

1. สีข้อม ในการข้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีข้อมได้เพียงบางส่วน ส่วนที่เหลือยังคงอยู่ในน้ำ และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีข้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทที่ใช้
2. สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกข้อม จะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสีย
3. สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย มีทั้งที่เป็นสารจีฟี่ง ไขมัน โปรตีน รวมถึงสารประกอบโลหะต่างๆ
4. เศษเส้นใย จะเป็นเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งหากมีปริมาณมากอาจเกิดปัญหาการอุดตันของเครื่องข้อมสีได้
5. สิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดรอยเปื้อนของผ้า เป็นต้น

### 2.3.5 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกข้อม

น้ำเสียที่มาจากโรงงานฟอกข้อมต่างๆจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใยนำมาข้อมสีและกระบวนการข้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างกับดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกข้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกข้อม	ลักษณะของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD (มก./ล.)	COD (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สี (หน่วย Pt-Co)	
ฟอกข้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกข้อมผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกข้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกข้อมด้ายและผ้า หรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542

จากตารางที่แสดงลักษณะสมบัติของน้ำเสียของโรงงานฟอกข้อม พบว่า

1. มีความเป็นด่างสูง เนื่องจากสารที่ทำให้สีข้อมมีลักษณะเป็นด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ที่ใช้ในขั้นตอนของการกำจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring)
2. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกข้อม ได้แก่ แป้ง เส้นใย สีข้อม และด้ายที่ปนมาจากกระบวนการข้อม
3. มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง ซึ่งมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

4. มีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะน้ำจากขั้นตอนที่ใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกเกือบน ขั้นตอนการย้อม เป็นต้น
5. มีสีเข้มมาก มาจากสีที่ใช้ย้อมผ้า
6. มีโลหะเกือบน มาจากสีที่ใช้ย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็น โลหะทองแดง โครเมียม ตะกั่ว สังกะสี
7. มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง โดยเฉพาะเส้นใยที่หลุดออกมาจากกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งหากมีปริมาณมากอาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของเครื่องย้อมได้

### 2.3.6 ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมี ดังนี้ (จินตนาและคณะ, 2546; นภาพร และคณะ, 2551)

1. ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำ โดยน้ำเสียจากการย้อมผ้ามักมีสารพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และจุลินทรีย์ในการบำบัดทางชีววิทยา
2. การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ เมื่อปล่อยน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมลงสู่แหล่งน้ำ จะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง เนื่องจากออกซิเจนถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์
3. ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง เนื่องจากเมื่อปล่อยน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมลงสู่แหล่งน้ำ จะก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้ที่พบเห็น นอกจากนี้สีย้อมที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น

### 2.3.7 มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อม

ในปัจจุบันกรมโรงงานอุตสาหกรรมและกรมควบคุมมลพิษยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งเรื่องสีสำหรับโรงงานฟอกย้อม เพียงแต่กำหนดว่าน้ำทิ้งต้องเป็นสีที่ไม่พึงรังเกียจ ในต่างประเทศที่มีการเข้มงวดเรื่องการรักษาสีสิ่งแวดล้อม เช่น ประเทศเยอรมัน ญี่ปุ่น และสิงคโปร์ ก็ยังไม่มีกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งเรื่องสีเช่นเดียวกัน สาเหตุที่สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่เข้มงวด เนื่องจากสีย้อมเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำ สำหรับในประเทศไทยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อม

ดัชนีที่วิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้ง			
	กรมโรงงาน อุตสาหกรรม	กรมควบคุม มลพิษ	กรมชลประทาน	กรมเจ้าท่า
พีเอช	5.5-9.0	5.5-9.0	6.5-8.5	5.0-9.0
บีโอดี (มก./ล.)	< 60	< 60	< 20	<20-60
ซีโอดี (มก./ล.)	< 400	< 400	-	-
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	< 50	< 50	< 30	-
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	< 100	< 100	-	-
ปริมาณสี	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ

ที่มา :กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542

### 2.3.8 วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดสีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง สามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา ซึ่งสารตกตะกอนที่นิยมใช้คือปูนขาว และสารส้ม จะทำให้เกิดตะกอนของสีย้อมจมตัวลงในน้ำทิ้ง หลังจากนั้นจึงทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนนำไปปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ วิธีนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อเสียคือเมื่อน้ำทิ้งมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดโมเลกุลของสีย้อม เช่น ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลขนาดเล็ก จะไม่สามารถทำให้เกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มได้

2. กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment) วิธีนี้จะอาศัยจุลินทรีย์ในการลดปริมาณสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการดูดซับสีไปด้วย แบ่งออกเป็น 2 ระบบคือระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) และระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon)

3. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดคือ น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 โดยประสิทธิภาพของการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์

4. การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone treatment) โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีจะต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ก่อน การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ของหมู่โครโมฟอร์ แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำ

ปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันใน โมเลกุลสีข้อมจะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

5. เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane technology) วิธีนี้สามารถใช้กำจัดสีโดยนำเอาสารเคมีที่ใช้อยู่และสีข้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) และไดนามิกเมมเบรน (Dynamic membrane) (พงษ์ศักดิ์, 2555)

## 2.4 การดูดซับ (Adsorption)

### 2.4.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึงการเพิ่มความเข้มข้นของสารบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) หรือในทางกลับกันเป็นการลดลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ สารซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำ (low surface free energy) จะถูกดูดซับได้ดี ในขณะที่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงกว่า (high surface free energy) จะไม่ถูกดูดซับ ซึ่งพลังงานอิสระที่ผิวของตัวถูกดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิว (surface tension) และพื้นที่ผิว (surface area) ดังสมการที่ 2.5

$$G_{sf} = \gamma A \quad (2.5)$$

เมื่อ  $G_{sf}$  เป็นพลังงานอิสระที่ผิว  
 $\gamma$  เป็นแรงตึงผิว  
 $A$  เป็นพื้นที่ผิว

เมื่อแรงตึงผิวหรือพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงไป จะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระ แรงตึงผิวของของเหลวคือ แรงตึงผิวต่อหน่วยความยาว โดยจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงตึงผิวของของเหลวเป็นค่าเฉพาะของของเหลวชนิดนั้น เช่น แรงตึงผิวของปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ  $456 \times 10^{-3}$  นิวตันต่อเมตร ซึ่งแตกต่างจากค่าแรงตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน

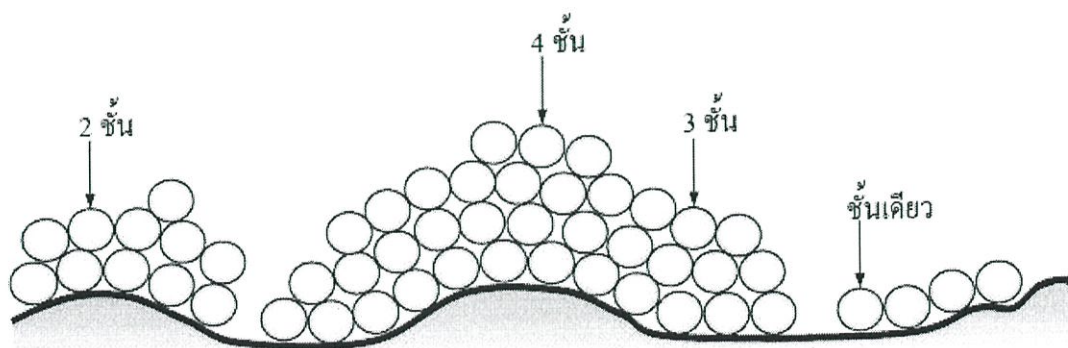
การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ตัวถูกดูดซับอาจเป็น โมเลกุลของแก๊สหรือตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับจะเกิดขึ้นกระทั่งเกิดสมดุลระหว่างโมเลกุลของแก๊สในสภาวะแก๊สกับโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็งหรือเกิดสมดุลของโมเลกุลของตัวถูกละลายในสารละลายกับ โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวของของแข็ง โดยสารแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูด รวมถึงเกิดสมดุลกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปฏิกิริยาการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ โดยมีกลไกการดูดซับ 2 ประเภท ดังนี้ (ปริญทร, 2551; ปานฉัตร, 2554)

### 1. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

การเกิดการดูดซับประเภทนี้จะอาศัยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวถูกดูดซับลดลง การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถถูกดูดซับอยู่บนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monomolecular layer) และเกิดขึ้นอย่างเฉพาะเจาะจง หมายถึงสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับทำปฏิกิริยากับตัวถูกดูดซับเท่านั้น และการดูดซับทางเคมีไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) หรือผันกลับได้แต่น้อยมาก ใช้เวลาในการดูดซับนาน นั่นคือ เมื่อดูดซับแล้วจะไม่มีสารหลุดออกมา หรือถ้าหลุดออกมาอาจจะทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยากและมักเปลี่ยนรูปไป

### 2. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของตัวดูดซับ (adsorbent) กับสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) โดยมีแรงยึดเหนี่ยวเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์ จึงเป็นการยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรงและไม่มีการเกิดพันธะเคมีเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบชั้นเดียวที่ความดันต่ำ และเป็นแบบหลายชั้น (multi molecular layer) ที่ความดันสูง ซึ่งการดูดซับทางกายภาพไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร จะเกิดการผันกลับได้ง่าย (reversible) การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางเคมี หรือถึงสถานะสมดุลได้เร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น (activation energy) เหมือนการดูดซับทางเคมี ยกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับมีขนาดเล็กมาก จะทำให้อัตราการดูดซับช้าลง การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นอย่างไม่เฉพาะเจาะจง หมายถึง สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้และแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับทำได้โดยง่าย (desorption)

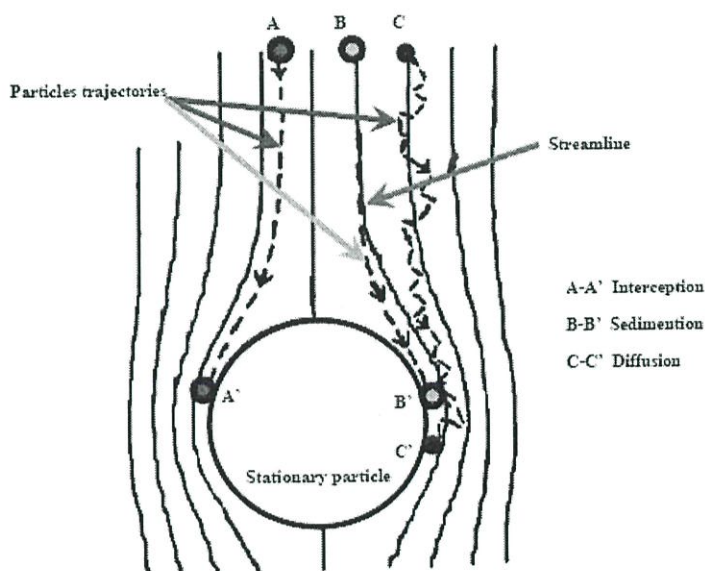


รูปที่ 2.7 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น (ปริญทร, 2551)

## 2.4.2 ขั้นตอนของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนของการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ (ปริญทร, 2551; ปานฉัตร, 2554)

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือสารแขวนลอยเข้าไปหาถ่านกัมมันต์โดยเป็นการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยในน้ำมาติดที่ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสารแขวนลอยนี้จะเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี ดังรูปที่ 2.8 โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เรียกว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ส่วนวิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนจะเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้

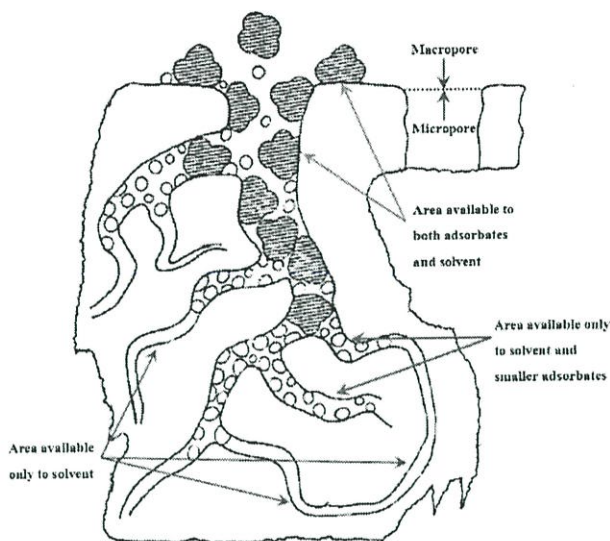


รูปที่ 2.8 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์ (Yao, 1971)

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอน Film diffusion เมื่อโมเลกุลของสารแขวนลอยเข้ามาถึงถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์จะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบางๆ โมเลกุลต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปในผิวถ่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอน Pre diffusion เนื่องจากสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในช่องว่างภายใน ดังรูปที่ 2.9 โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของถ่านกัมมันต์ให้ได้ จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารแขวนลอยจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.9 ช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์ (Yao, 1971)

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์

#### 1. ความปั่นป่วน

ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการกวนสารละลายจะมีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีขนาดและคุณลักษณะทางกายภาพต่างกัน การดูดซับจึงต้องการความปั่นป่วนเนื่องจากการกวนสารละลายในระดับความเร็วที่แตกต่างกันออกไป เช่น ถ่านกัมมันต์แบบผงต้องการความปั่นป่วนสูงจึงจะเกิดการดูดซับดี เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านรูพรุนของโมเลกุลที่ถูกดูดซับเข้าสู่ช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์ แต่ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด ต้องการความปั่นป่วนต่ำ เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์มออกซิไฮเดรท

#### 2. ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

ขนาดของถ่านกัมมันต์เป็นส่วนผูกพันกับอัตราการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ถ่านกัมมันต์แบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบเม็ด ส่วนพื้นที่ผิวนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (capacity of iodine adsorption) นั่นคือ กรณีที่มีพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ส่วนมากเป็นพื้นที่ผิวของช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดภายนอกของถ่านกัมมันต์จะไม่ค่อยมีผลต่อการกำหนดพื้นที่ผิว

#### 3. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์

เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวถ่านกัมมันต์ สารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนจะละลายน้ำได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำอย่างเหนียวแน่น ทำให้สารเกิดการดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์ได้ยาก แต่อย่างไรก็ตาม สารที่ละลายน้ำได้บางชนิดสามารถเกาะติดผิวถ่านกัมมันต์ได้

#### 4. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์

ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของถ่านกัมมันต์มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในช่องว่างของถ่านกัมมันต์ การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างของถ่านกัมมันต์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างสารและถ่านกัมมันต์มากที่สุด จึงทำให้สารขนาดเล็กนี้ถูกดูดเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ จากนั้นสารขนาดใหญ่จะเข้าสู่รูพรุนตามลำดับ

#### 5. ค่าความเป็นกรดค้างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรดค้างของสารตัวทำละลายจะมีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากค่าความเป็นกรดค้างของสารละลายมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของตัวถูกละลาย ถ้าสารละลายเป็นกรด จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จะเกาะติดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ดี ทำให้มีรูพรุนน้อยลง

#### 6. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิผลต่อการดูดซับอย่างมากถ้าอยู่ในสถานะของเหลว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย จะทำให้อัตราการดูดซับสูงขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับลดลง

#### 7. ระยะเวลาดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น (ปริญทร, 2551; ปานฉัตร, 2554)

### 2.4.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

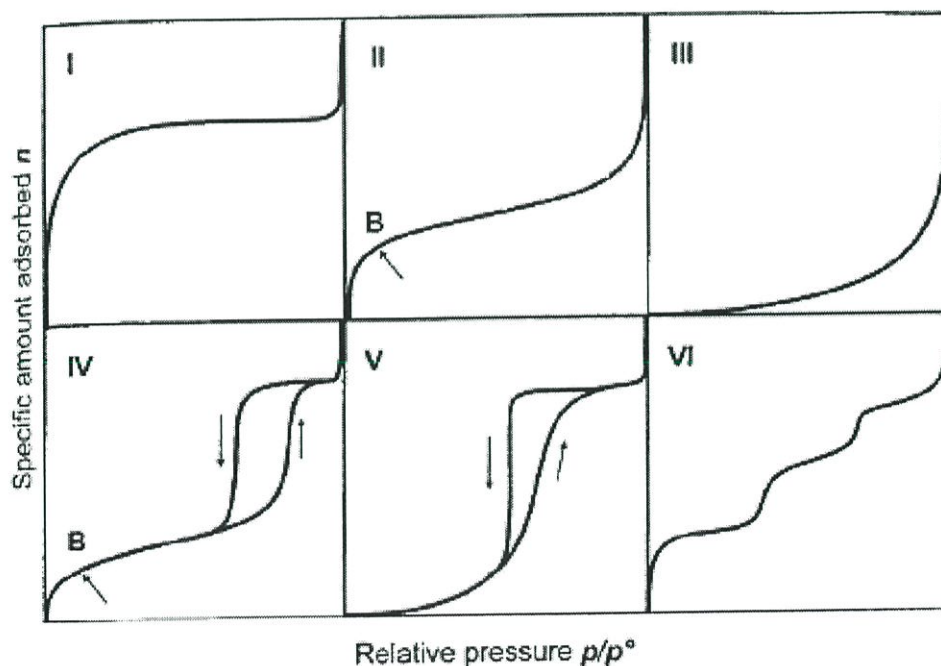
การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกละลาย อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทอร์ม (isotherm) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก้สตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller หรือ อาจเรียกการจำแนกไอโซเทอร์ม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT

Type I เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการดูดซับของสารที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์ พบทั้ง

ในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II เป็นไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีพรุนหรือมีความพรุนขนาดใหญ่ (macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรง ทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยตัวเอง ทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง



รูปที่ 2.10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (ปริญทร, 2551)

Type IV เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ เส้นไอโซเทอร์ม

จะเหมือนกับไอโซเทอร์ม Type II จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอร์ม Type IV ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะไม่พบบ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ (ปานฉัตร, 2554)

#### 2.4.4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

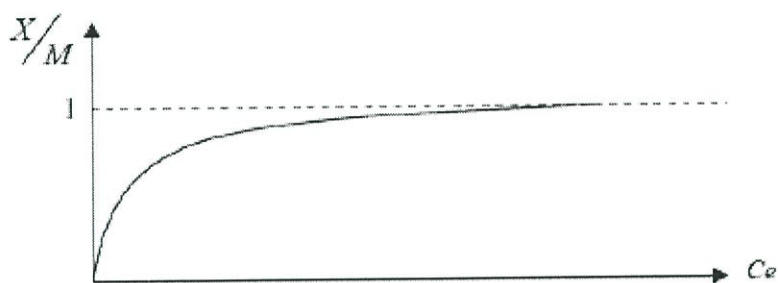
เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมติฐานคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่ง (adsorption site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่ง โมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ ดังสมการที่ 2.6

$$q_c = \frac{X}{m} = \frac{Q^0 b C_c}{1 + b C_c} \quad (2.6)$$

เมื่อ	$q_c$	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
	$X$	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ
	$m$	เป็นปริมาณตัวดูดซับ
	$C_c$	เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
	$Q^0$	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
	$b$	เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\frac{X}{m}$  และ  $C_c$  จะได้ดังรูปที่ 2.11



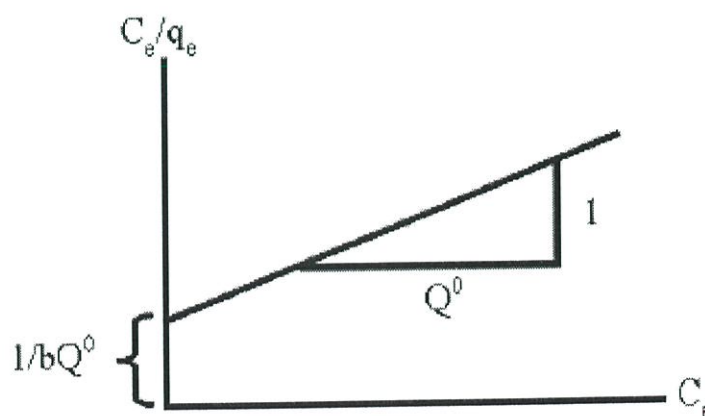
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{X}{m}$  และ  $C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์  
(Cheremisnoff *et al.*, 1987)

หรือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0} + \frac{1}{K_L q_0} \frac{1}{C_e} \quad (2.8)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\frac{C_e}{q_e}$  กับ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนเป็น  $\frac{1}{bQ^0}$  และมี  
ความชัน เท่ากับ  $\frac{1}{Q^0}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{C_e}{X/m}$  และ  $C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์  
(Cheremisnoff *et al.*, 1987)

#### 2.4.4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่เสนอโดย ฟินเลย์ ฟรอยด์ลิช (Findlay Freundlich) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (rough surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ข้อเสียของสมการฟรอยด์ลิชคือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีความดันสูงๆ ได้ไม่ดี

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิชที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

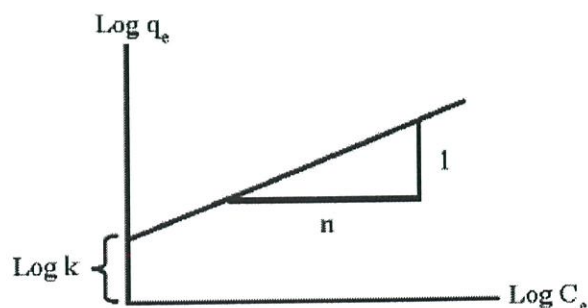
$$q_c = \frac{X}{m} = kC_c^{1/n} \quad (2.9)$$

เมื่อ	$q_c$	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
	$X$	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ
	$m$	เป็นปริมาณตัวดูดซับ
	$C_c$	เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
	$k$	เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
	$n$	เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการของฟรอยด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_c = \log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_c \quad (2.10)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log \frac{X}{m}$  กับ  $\log C_c$  ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า  $k$  ได้ และความชันของกราฟเป็น  $1/n$  ก็สามารถหาค่า  $n$  ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นตัวอย่างไอโซเทอร์มของฟรอยด์ลิช (ปรินทร, 2551)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_c$  และ  $\log C_c$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Cheremisnoff *et al.*, 1987)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**กำชัย (2548)** ศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปดูดซับสารละลายสีย้อมเบสิกกรีน 4 ในน้ำ โดยการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จะใช้กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนหรือภายใต้ความดันสุญญากาศ จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ระยะเวลาดูดซับ ปริมาณของถ่านกัมมันต์และอุณหภูมิในการดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมของถ่านกัมมันต์จากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันสุญญากาศมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และความสามารถในการดูดซับสารละลายไอโอดีน เมทิลีนบลู และสีย้อมเบสิกกรีน 4 ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แต่มีร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของถ่านกัมมันต์ต่ำกว่า ด้านจลนพลศาสตร์ที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นแบบ Pseudo-second-order และไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับได้ดีที่สุดคือ ไอโซเทอร์มแบบ Langmuir

**วรัญญู (2549)** ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับสีรีแอคทีฟบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 4 ชนิด ได้แก่ ต้นไมยราพยักษ์ กะลาแมคคาเดเมีย ชังข้าวโพด และแกลบ โดยในการศึกษาจะใช้สีย้อม 2 ชนิดคือ C.I. Reactive Red 124 (RR-124) และ C.I. Reactive Red (RR-141) ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 30 mg/L โดยทำการศึกษาทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในถึงปฏิกิริยาแบบเท ผลการทดลองแบบไม่ต่อเนื่องพบว่า อัตราเร็วในการดูดซับสี RR-124 และ RR-141 เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 0-1 ชั่วโมง และจะลดลงเมื่อมีระยะเวลาดูดซับในช่วง 2-20 ชั่วโมง อีกทั้งยังพบว่าถ่านกัมมันต์ไมยราพยักษ์ดูดซับสีทั้งสองชนิดได้ดีที่สุด โดยความสามารถในการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งถ่านกัมมันต์ไมยราพยักษ์มีความสามารถในการดูดซับสี RR-124 และ RR-141 ที่สูงที่สุดที่ 45 องศาเซลเซียส เท่ากับ 38.31 mg/g และ 15.06 mg/g ตามลำดับตามด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย ชังข้าวโพดและแกลบ ตามลำดับ

**Aljeboree และคณะ (2014)** ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากาบมะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งสามารถกำจัดสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ (สีmaxilon blue GRL และสี direct yellow DY12) ในสารละลาย การตรวจวัดคุณลักษณะของตัวดูดซับทำได้โดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยการดูดซับแบบกะได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ ขนาดตัวดูดซับ ความเป็นกรดต่างของสารละลายสีย้อม และอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า การดูดซับสีย้อม GRLและ DY12 จะดูดซับได้ดีในสภาวะกรด ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมและเพิ่มระยะเวลาดูดซับ แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ

ตัวดูดซับ ขนาดตัวดูดซับ และอุณหภูมิ การดูดซับทางเคมีที่นำมาใช้ศึกษาในครั้งนี้มี 2 โมเดล คือ Pseudo-first-order และ Pseudo-second-order แต่จลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ Pseudo-second-order การศึกษาสภาวะสมดุลจะทำการประเมินโดยใช้ไอโซเทอร์ม Langmuir, Freundlich, Temkin และ Fritz-Schlunder โดยไอโซเทอร์มแบบ Fritz-Schlunder เป็นไอโซเทอร์มที่สามารถอธิบายการดูดซับของสีย้อม GRL และ DY12 ได้ดีที่สุด ซึ่งสื่อให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer)

**Akar และคณะ (2012)** ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากใบชา เพื่อกำจัดมาลาไคท์กรีนออกจากสารละลาย การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ทำได้โดยการใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) และทำการวัดพื้นที่ผิว ซึ่งกำหนดปัจจัยในการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาดูดซับ ความเป็นกรด่าง อุณหภูมิ ปริมาณตัวดูดซับ และค่าความแรงระหว่างไอออน จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 256.4 mg/g ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 94 ของสีย้อมมาลาไคท์กรีนทั้งหมดในสารละลาย ความสามารถในการดูดซับมาลาไคท์กรีนจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึง pH 4 และหลังจากนั้นจะคงที่ การทดลองในครั้งนี้ได้ใช้สมการไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich และ Dubinin-Radushkevich เพื่อประเมินสภาวะสมดุล โดยพบว่าไอโซเทอร์มแบบ Langmuir เหมาะสมกับการทดลองมากที่สุด ด้านจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมคือ Pseudo-second-order จากนั้นได้ทำการศึกษาเทอร์โมไดนามิก พบว่า มีพลังงานอิสระ ( $\Delta G$ ) เป็นค่าลบและมีค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) เป็นค่าบวก นั้นหมายความว่าปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง

**Tan และคณะ (2012)** ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ผงถ่านที่ทำจากขังข้าวโพดซึ่งมีอนุภาคทางแม่เหล็กระดับนาโน โดยใช้เฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_3O_4$ ) สำหรับดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ศึกษาปัจจัยในการดูดซับคือ ความเป็นกรด่างของสารละลายตั้งแต่ 3-8, ปริมาณตัวดูดซับ (0.2-1.0 กรัม), ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (100-250 mg/L) และระยะเวลาดูดซับ การทดลองแบบกะถูกกำหนดโดยอาศัยอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูจะมีประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมมากที่สุดที่ pH 6.0 ผลของการทดลองพบว่า จลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมคือ Pseudo-first-order ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลือบเฟอร์ริกออกไซด์บนผงถ่านที่ทำจากขังข้าวโพดทำให้กระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดได้ดียิ่งขึ้น สามารถนำผงถ่านที่ทำจากขังข้าวโพดนี้ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารพิษออกจากน้ำเสียที่มีสีย้อมได้

**Nuithitikul และคณะ (2010)** ศึกษาการดูดซับสีย้อมเบสิกกรีน 4 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากเปลือกทุเรียน การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนหรือภายใต้ความดันสูญญากาศ แล้วนำมากระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจาก

นั้นจึงปรับสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยพบว่าถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ภายใต้ความดันสูญญากาศมีคุณสมบัติ (BET, พื้นที่ผิว, ปริมาตรรูพรุน และความสามารถในการดูดซับ) ดีกว่าการสังเคราะห์ภายใต้บรรยากาศในโตรเจน การปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อมเบสิกกรีน 4 ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสีย้อมแอสิด การดูดซับสีย้อมเบสิกกรีน 4 สามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์แบบ Pseudo-second-order การศึกษาสถานะสมดุลพบว่ากระบวนการดูดซับเหมาะสมกับไอโซเทอร์มแบบ Langmuir ถ่านกัมมันต์สังเคราะห์มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกกรีน 4 ภายใต้บรรยากาศในโตรเจนและภายใต้ความดันสูญญากาศมีค่าสูงถึง 303.0 และ 312.5 mg/g ตามลำดับ

**de Luna และคณะ (2013)** ศึกษาการกำจัดสี Eriochrome Black T (EBT) จากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากเปลือกข้าว ซึ่งมีปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ และความเป็นกรด่าง แสดงผลเป็นร้อยละของการกำจัดสี EBT เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ลดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมและลด pH ของสารละลายสีย้อมจะเป็นทำให้ปริมาณการดูดซับสี EBT เพิ่มมากขึ้น จากการทดลองพบว่า สภาพที่เหมาะสมที่สุดคือความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ 95 ppm ปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัม และ pH 2 การศึกษาสถานะสมดุลจะประเมินโดยใช้ไอโซเทอร์มแบบ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich ซึ่งไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอร์มที่สามารถอธิบายการดูดซับสี EBT ได้ดีที่สุด ซึ่งสื่อให้เห็นว่าการดูดซับสี EBT เป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีแบบหลายชั้นและมีพื้นที่ผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดหรือไม่สม่ำเสมอ ด้านข้อมูลจลนพลศาสตร์ที่นำมาใช้ในการศึกษามีอยู่ด้วยกัน 2 โมเดลคือ Pseudo-first-order และ Pseudo-second-order แต่จลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทดลองมากที่สุดคือ Pseudo-second-order ( $R^2=0.9996$ ) กระบวนการแพร่ภายในมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ( $R^2=0.9921$ ) ซึ่งหมายถึงการแพร่ภายในรูพรุนอยู่ในขีดจำกัดสูงสุดของกระบวนการดูดซับ

**Auta และ Hameed (2011)** ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่สถานะสมดุลเพื่อดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและเอซิคบลู 29 ถ่านกัมมันต์จากกากชาเตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมอะซิเตต ใช้เทคนิคการตรวจสอบสถิติด้วยวิธีการตอบสนองของพื้นผิว (Response surface methodology: RSM) มีการเตรียมสถานะที่เหมาะสมคือ การกระตุ้นโดยใช้อุณหภูมิ การกระตุ้นโดยใช้เวลา และอัตราส่วนความเข้มข้นตัวทางเคมีซึ่งวัดร้อยละผลิตภัณฑ์ (%Yield) ของถ่านกัมมันต์และร้อยละการกำจัดสีย้อม สภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสีย้อมทั้งสองชนิดอยู่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนความเข้มข้นทางเคมี 1.4 และที่เวลา 120 นาที พื้นที่ผิวที่มากที่สุดคือ 854.30  $m^2/g$  และตัวดูดซับที่เตรียมได้เป็นแบบ mesoporous ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเอซิคบลู 29 และเมทิลีนบลูสูงสุดเท่ากับ 453.12 และ 554.30 mg/g ตามลำดับ การประเมินสถานะสมดุลของการทดลองใช้ไอโซเทอร์ม Langmuir, Freundlich

และ Temkin โดยการดูดซับสี่ข้อมทั้งสองชนิดเหมาะสมกับไอโซเทอร์มแบบ Langmuir และ จลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมคือ Pseudo-second-order การบำบัดน้ำเสียสี่ข้อมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีนี้จัดว่าเป็นการแก้ปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**Auta และ Hameed (2011)** ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากชาโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมอะซิเตต เพื่อใช้สำหรับดูดซับสี่ข้อมแอสซิบลู 25 การทดลองการดูดซับแบบกะได้กำหนดปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (50-350 mg/L) อุณหภูมิ (30, 40, 50 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาดูดซับ และความเป็นกรดด่าง (pH 2-12) ซึ่งการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาสมการไอโซเทอร์มแบบ Langmuir, FreundlichTemkin และ Dubinin-Radushkevich ผลการทดลองปรากฏว่าการดูดซับสี่ข้อมแอสซิบลู 25 ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากชาเหมาะสมกับไอโซเทอร์มแบบ Langmuir และมีการดูดซับแบบชั้นเดียวโดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 203.34 mg/g จลนพลศาสตร์ที่สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับได้ดีที่สุดคือ Pseudo-second-order และสามารถสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์จากกากชามีประสิทธิภาพในการดูดซับ สี่ข้อมแอสซิบลู 25 เท่ากับ 97.88%

**Pezoti Junior และคณะ (2013)** ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วแมคคาเดเมียโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น และใช้กระบวนการไพโรไลซิสด้วยเตาไมโครเวฟ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่การตอบสนองของพื้นผิว (Response surface methodology:RSM) ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสี่ข้อมเมทิลีนบลูอย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ตรวจวัดโดยใช้การดูดซับ-คายซับไนโตรเจนกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และเครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้นั้นมีอัตราส่วนความอิมิตัวทางเคมี 3:1 (ZnCl<sub>2</sub>:ถ่านกัมมันต์) เผาในไมโครเวฟเป็นเวลา 20 นาที โดยใช้กำลังไฟฟ้า 720 วัตต์ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนเป็นแบบ microporous มีพื้นที่ผิว 600 m<sup>2</sup>/g และมีหมู่ฟังก์ชันกรดอยู่บนพื้นผิว จากการทดลองพบว่าการดูดซับสี่ข้อมเมทิลีนบลูเหมาะสมกับจลนพลศาสตร์แบบ Pseudo-second-order ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี ด้านไอโซเทอร์มที่เหมาะสมในการอธิบายการดูดซับได้ดีที่สุดคือ ไอโซเทอร์มแบบ Redlich-Peterson โดยสามารถดูดซับสี่ข้อมเมทิลีนบลูได้มากที่สุด เท่ากับ 194.7 mg/g

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เตาเผา Muffle Furnace รุ่น 6000 ยี่ห้อ Thermolyne บริษัท Barnstead ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เตาอบ (Oven) รุ่น FT 01/125 บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น 1455VP บริษัท LEO ประเทศอังกฤษ
4. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) รุ่น GENESYS 10SUV-VIS บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่อง Autosorb-1 บริษัท Science Engineer International จำกัด ประเทศไทย
6. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Orbital Shaker บริษัท Gallenkamp ประเทศอังกฤษ
7. เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) รุ่น 1000Series บริษัท Centurion Scientific ประเทศอังกฤษ
8. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น 8689 บริษัท AZ ประเทศไต้หวัน
9. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง รุ่น TR-403 บริษัท Denver Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AUX220 บริษัท SHIMADZU ประเทศญี่ปุ่น
11. เตาให้ความร้อนพร้อมเครื่องกวน (Hot plate & Stirrer) รุ่น A007226 บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. โถดูดความชื้น (Desiccator) ประเทศจีน
13. ถ้วยเซรามิก ประเทศไทย
14. ถังพลาสติกชนิดพลาสติก ประเทศไทย
15. กระดาษกรองเบอร์ 42 ประเทศเยอรมนี
16. เครื่องแก้วสำหรับห้องปฏิบัติการ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี

2. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (HCl), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
4. เมทิลีนบลู ( $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศเบลเยียม
5. โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
6. ไอโอดีน ( $I_2$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
7. โพแทสเซียมไอโอเดต ( $KIO_3$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท MERCK ประเทศเยอรมัน
8. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI), เกรดวิเคราะห์ บริษัท BDH Chemicals Laboratory ประเทศอังกฤษ
9. โซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ), เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo ERBA ประเทศอิตาลี
10. สีย้อมมาลาไคท์กรีนหรือ Malachite Green ( $C_{23}H_{25}N_2Cl$ ), เกรดเพื่อการค้า บริษัท P.K.S. 2000 จำกัด ประเทศไทย
11. น้ำแข็ง
12. กากชาเขียว (บริษัทยูนิ-เพรสซิเดนท์ (ประเทศไทย) จำกัด จ.นครปฐม)
13. ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า (Activated charcoal) ยี่ห้อ Acros organics ประเทศเบลเยียม

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

1. นำตัวอย่างกากชาที่ผ่านกระบวนการผลิตเครื่องดื่มประเภทชาไปตากแดดให้แห้ง เก็บในถุงพลาสติกซิปล็อค แล้วขนส่งกลับมายังห้องปฏิบัติการ
2. นำตัวอย่างกากชาที่ตากแห้งแล้วมาอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ  $80 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น

### 3.2.2 การเตรียมตัวดูดซับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ (ชวลิต และคณะ, 2548)

1. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

### 1.1 ปริมาณความชื้น

1. นำด้วยเซรามิกพร้อมฝาไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องใน โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักด้วยเซรามิก ทำจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่

2. บรรจุกากชาประมาณ 1.0000 กรัม ใส่ลงในถ้วยเซรามิก

3. นำไปอบที่อุณหภูมิ  $80 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องใน โถดูดความชื้น

4. ชั่งน้ำหนักกากชาหลังอบที่ได้ ทำซ้ำจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่

5. วิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (ภาคผนวก ก)

6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ซ้ำ

### 1.2 ปริมาณเถ้า สารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว

1. นำด้วยเซรามิกพร้อมฝาไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องใน โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักด้วยเซรามิก

2. บรรจุกากชาประมาณ 1.0000 กรัม ใส่ลงในถ้วยเซรามิก หรือใช้กากชาตัวอย่างที่ผ่านการหาปริมาณความชื้นแล้ว

3. นำไปเผาแบบอับอากาศโดยการปิดฝาด้วยเซรามิก ในเตาเผาชนิด Muffle Furnace ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องใน โถดูดความชื้น

4. ชั่งน้ำหนักกากชาหลังเผาที่ได้ ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

5. วิเคราะห์หาปริมาณเถ้า สารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากชาที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ก)

6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ซ้ำ

### 2. กระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านกัมมันต์

2.1 นำกากชาที่ได้จากกระบวนการเผาให้เป็นถ่านกัมมันต์มาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปแช่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ ในอัตราส่วนสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อกากชาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน เท่ากับ 3:1 (w/w)

2.2 บรรจุถ่านกัมมันต์ที่แช่สารละลายซิงค์คลอไรด์แล้วลงในถ้วยเซรามิกที่อบแห้งแล้วปิดฝา นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องใน โถดูดความชื้น

2.3 นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาบดและร่อนให้ได้ขนาด 50 mesh (297 ไมครอน) จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และน้ำกลั่นร้อน เพื่อกำจัด ซิงค์คลอไรด์และคลอไรด์ไอออนที่เหลืออยู่ จนกว่าน้ำที่ล้างจะมีค่าพีเอชเป็นกลางโดยใช้เครื่อง pH meter

2.4 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และศึกษาความสามารถในการดูดซับสีข้อมมาลาโคที่กรีนต่อไป

### 3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า

3.2.3.1 ศึกษาขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์ (Brunauer-Emmett-Teller: BET) โดยส่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb-1 ที่ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.3.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.3.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (Girgis *et al.*, 2002)

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มา 250 มิลลิกรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ พร้อมเตรียมชุดควบคุมที่ไม่เติมถ่านกัมมันต์
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ในสารละลาย ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร
6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ
7. เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเพื่อการค้าโดยทำตามขั้นตอนที่ 1-6

8. เขียนกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทธิลีนบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา

3.2.3.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (American Society for Testing and Materials, 2011)

1. อบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาประมาณ 10 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องใน โถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์มาประมาณ 2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เปิดกรวดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จำนวน 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงไปปิดปากขวด ด้วยจุกยางและเขย่าเบาๆ ให้ถ่านกัมมันต์เปียกทั่วกันทั้งหมด
3. นำไปวางบนเตาให้ความร้อนในตู้ดูดควัน เปิดจุกยางออก ต้มจนเดือดประมาณ  $30 \pm 2$  วินาที เพื่อกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ แล้วยกกลง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เปิดสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.10 นอร์มอล จำนวน 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดด้วยจุกยางอย่างรวดเร็ว เขย่าแรงๆเป็นเวลา  $30 \pm 1$  วินาที จากนั้นรีบกรองถ่านกัมมันต์ออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
5. เปิดสารละลายไอจำนวน 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีขาวอ่อน เติมน้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด จุดยุติคือ จุดที่สารละลายไม่มีสี
6. บันทึกปริมาตรของสารละลาย โซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้คำนวณหาความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 0.008-0.02 นอร์มอล หากไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวควรทำการทดลองใหม่ โดยหากความเข้มข้นที่คำนวณได้มากเกินไปให้เพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ และถ้าความเข้มข้นน้อยเกินไปให้ลดปริมาณถ่านกัมมันต์
7. เมื่อได้ความเข้มข้นในช่วงดังกล่าวแล้ว ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ โดยเปลี่ยนน้ำหนักถ่านกัมมันต์ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นอีก 2 ค่า ในช่วงดังกล่าว
8. เตรียมชุดควบคุมโดยไม่เติมถ่านกัมมันต์
9. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีน โดยการเขียนกราฟระหว่าง X/M กับความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ (ภาคผนวก ก)

3.2.4 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมมาลาไลท์กรีนของถ่านกัมมันต์

3.2.4.1 ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มา 0.20 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (Emine Akar *et al.*, 2013) ลงขวดรูปชมพู่ในข้อ 1
3. ปรับ pH ของสารละลายให้เป็น 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 (M. Auta *et al.*, 2011) อย่างละขวดรูปชมพู่ตามลำดับ โดยปรับ pH ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ/หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์พร้อมเตรียมชุดควบคุมที่ไม่เติมถ่านกัมมันต์จากกากชา
4. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Emine Akar *et al.*, 2013)
5. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที (Emine Akar *et al.*, 2013)
6. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับค่า pH

#### 3.2.4.2 ศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มา 0.20 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงขวดรูปชมพู่ในข้อ 1
3. ปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.4.1 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ/หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 30, 60, 120, 150, 180, 240, 300 และ 360 นาทีอย่างละขวดรูปชมพู่ตามลำดับ พร้อมเตรียมชุดควบคุมที่ไม่เติมถ่านกัมมันต์จากกากชา
5. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม

### 3.2.4.3 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มา 0.20 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีน 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรอย่างละขวดรูปชมพู่ในข้อ 1 ตามลำดับ พร้อมเตรียมชุดควบคุมที่ไม่เติมถ่านกัมมันต์จากกากชา
3. ปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.4.1 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ/หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาทีในระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับความเข้มข้นของสารละลาย

### 3.2.4.4 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมและศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาอย่างละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตรอย่างละขวดรูปชมพู่ตามลำดับ พร้อมเตรียมชุดควบคุมที่ไม่เติมถ่านกัมมันต์จากกากชา
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.4.3 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงขวดรูปชมพู่ในข้อ 1
3. ปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.4.1 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ/หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาทีในระยะเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับปริมาณถ่านกัมมันต์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

ส่วนกลับของความเข้มข้นของสีข้อมมาลาโคทีกรีนหลังการดูดซับ ( $1/C_c$ ) กับส่วนกลับของความเข้มข้นของสีข้อมมาลาโคทีกรีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ ( $1/q$ )

#### 3.2.4.5 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมมาลาโคทีกรีน

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.4.4 ใสลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีข้อมมาลาโคทีกรีนที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.4.3 ปริมาตร 100 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพู่ในข้อ 1
3. ปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.4.1 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ/หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที ในระยะเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีข้อมมาลาโคทีกรีนด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
7. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนถ่านกัมมันต์จากกากชาเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า
9. คำนวณเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมมาลาโคทีกรีน
10. นำสารละลายถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปกรองแยกถ่านกัมมันต์ออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42
11. นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกรองไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น
12. เก็บใส่ถุงพลาสติกซิปล็อคเพื่อทำการทดลองต่อไป

3.2.5 การศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่(คายซับ) (รัตนาลักษณ์, 2552)

1. นำถ่านกัมมันต์จากการทดลองข้อ 3.2.4.5 ใสในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงขวดรูปชมพู่ในข้อ 1
3. นำสารละลายไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
4. แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของมาลาไคท์กรีนที่อยู่ในสารละลาย ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 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 mL พร้อมเตรียมน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม
8. คำนวณเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการคายซับสีของมาลาไคท์กรีน (ภาคผนวก จ)

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์

พารามิเตอร์	เครื่องมือ / วิธีวิเคราะห์	ตัวอย่างที่ทดสอบ
พื้นที่ผิว / ปริมาตรรูพรุน / เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน	Autosorb-1/BET Isotherm	ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า
ลักษณะพื้นผิว	Scanning Electron Microscope	กากชา ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์หลังดูดซับสีเขียวมมลาไคท์กรีน
ค่าการดูดซับเมทธิลินบลู	การดูดซับสารละลายเมทธิลินบลู (Girgis <i>et al.</i> , 2002)	ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า
ค่าการดูดซับไอโอดีน	ASTM D4607	ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า
ความชื้น	ASTM D3173	กากชา
เถ้า	ASTM D3174	ถ่านกัมมันต์จากกากชา
สารระเหย	ASTM D3175	
คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	
ค่าการดูดซับสีเขียวมมลาไคท์กรีน	UV/VIS Spectroscopy	ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์
ความสามารถในการคายซับ	UV/VIS Spectroscopy	ถ่านกัมมันต์จากการชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์หลังการดูดซับสีเขียวมมลาไคท์กรีน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากชา โดยทำการเผากากชาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสและกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วนสารเคมีต่อกากชาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน เท่ากับ 3:1 (w/w) หลังจากนั้นนำไปเผาอีกครั้ง แล้วนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน รวมทั้งศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ)

#### 4.1 ผลการศึกษาปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหยและคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ผลิตได้

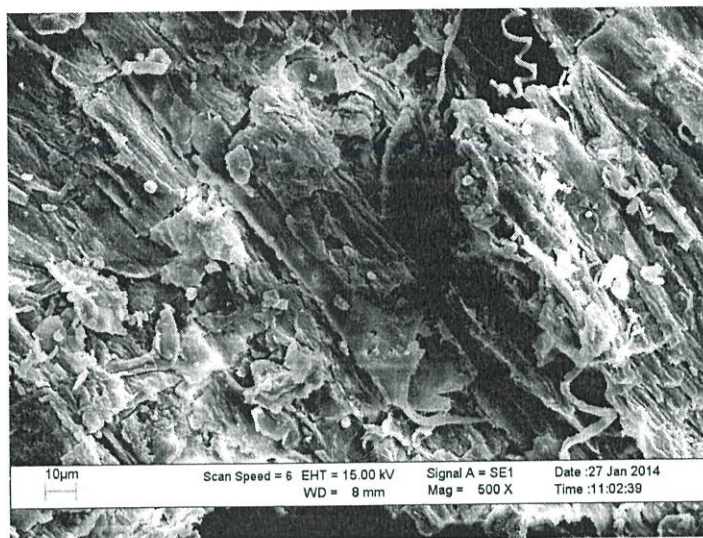
จากการศึกษาปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหยและคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยวิธี ASTM D3172 ถึง ASTM D3175 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีปริมาณความชื้น 6.6% ปริมาณเถ้า 39.2% ปริมาณสารระเหย 54.2% และปริมาณคาร์บอนคงตัว 6.6% (จากตารางภาคผนวก ก) ซึ่งบ่งบอกได้ว่า ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่ผลิตได้นั้นมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงเพื่อดูดซับสารละลาย โดยถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพจะต้องมีปริมาณความชื้นต่ำ ปริมาณเถ้าต่ำ มีสารระเหยได้ และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำ แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติโดยรวมถือว่า สามารถนำถ่านกัมมันต์จากกากชานี้ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไปได้

#### 4.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า

##### 4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

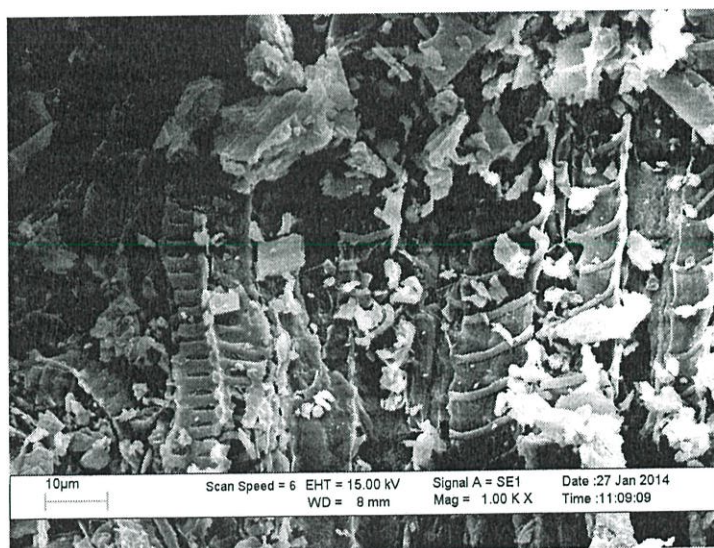
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของกากชาก่อนนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของกากชามีรูพรุนน้อย ไม่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นตัวดูดซับโดยตรง จึงควรนำกากชามาเข้าสู่

กระบวนการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ต่อไป เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก)



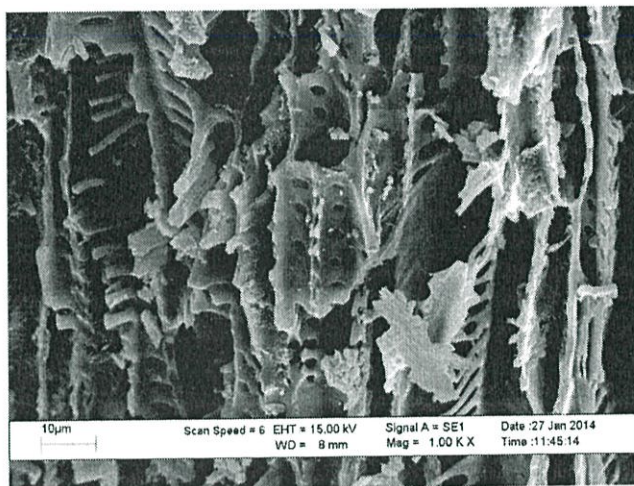
รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์กำลังขยาย 500 เท่า

ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านกัมมันต์ โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากรูปที่ 4.1 (ข) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะแตกหักออกเป็นท่อนๆและมีรูพรุนเล็กน้อย



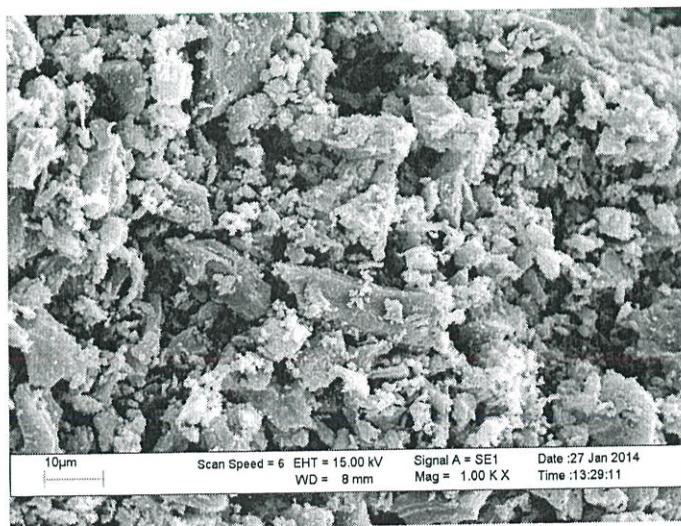
รูปที่ 4.1 (ข) ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ กำลังขยาย 1,000 เท่า

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกากชาหลังจากกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น เหมาะสมต่อการนำไปเป็นตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค)



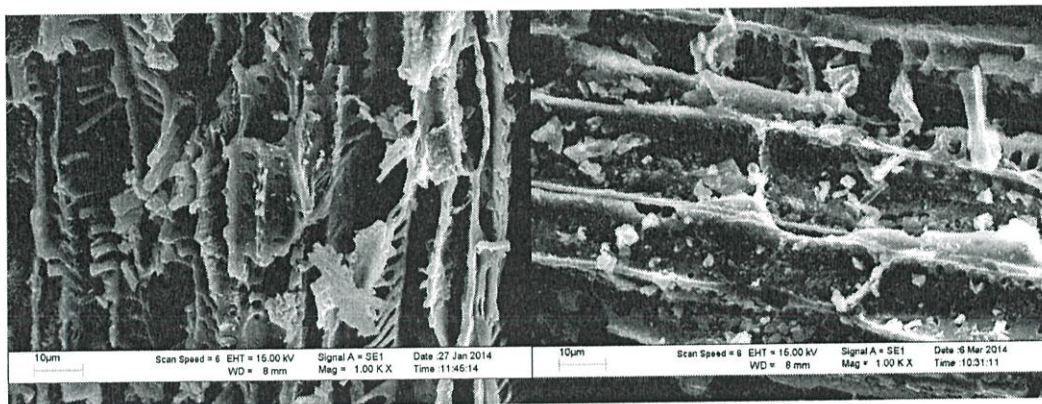
รูปที่ 4.1 (ค) ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ กำลังขยาย 1,000 เท่า

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) พบว่า ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีรูพรุนเป็นจำนวนมาก และขนาดเล็กมาก ซึ่งหากเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ผลิตได้ที่กำลังขยายเท่ากัน จะเห็นได้ชัดว่า ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและแตกออกเป็นเศษเล็กๆ ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ง)



รูปที่ 4.1 (ง) ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกากชาหลังจากกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 พบว่า รูพรุนส่วนใหญ่มีลักษณะตันมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด พื้นผิวส่วนใหญ่เรียบ มีความขรุขระเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1,000 เท่า

#### 4.2.2 ผลการศึกษาขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเครื่อง Autosorb-1 มีคุณสมบัติ ดังนี้

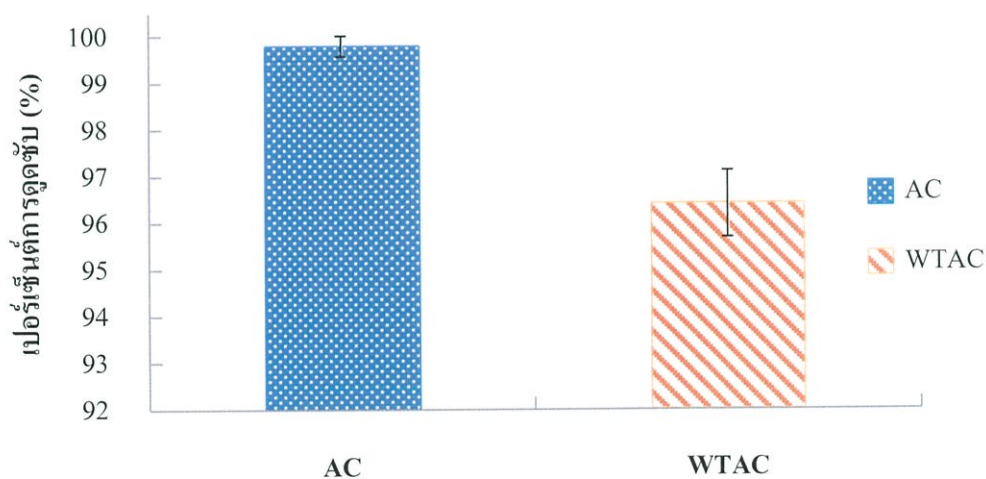
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา

คุณสมบัติ	ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า	ถ่านกัมมันต์จากกากชา
ขนาดพื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )	603.4	23.3
ปริมาตรรูพรุน ( $cc/g$ )	0.5637	0.0504
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (อังสตรอม)	37.37	86.76

เมื่อพิจารณารางคุณสมบัติ พบว่า ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าถ่านกัมมันต์จากกากชา แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์จากกากชา แสดงว่า ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับได้ดีกว่า ถ่านกัมมันต์จากกากชา เนื่องจากคุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดีคือ ควรมีขนาดพื้นที่ผิวมาก มีรูพรุนขนาดเล็กและมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม จากคุณสมบัติทางกายภาพดังที่กล่าวมาข้างต้น บ่งบอกได้ว่า สามารถใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาเป็นตัวดูดซับทางเลือกได้อีกชนิดหนึ่ง

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทธิลินบลู

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับเมทธิลินบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Girgis *et al.*, 2002) โดยทำการดูดซับสารละลายเมทธิลินบลูเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 100 mL แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของเมทธิลินบลูด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง นำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทธิลินบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา ดังรูปที่ 4.3 (จากตารางภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทธิลินบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา

ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา มีความสามารถในการดูดซับสารละลายเมทธิลินบลูความเข้มข้น 10 mg/L เท่ากับ 3.97 และ 3.84 mg/g ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากกากชาที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองมีคุณสมบัติดี จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปทดลองการดูดซับสีข้อมมาลาไลท์กรีนในขั้นต่อไป แต่สำหรับถ่าน

กัมมันต์เพื่อการค้าอาจมีความสามารถในการดูดซับสารละลายเมทธิลีนบลูได้มากกว่า 10 mg/L ถ้าหากสารละลายเมทธิลีนบลูมีความเข้มข้นมากขึ้น

#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยวิธี ASTM D4607 ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนหรือค่าไอโอดีนนัมเบอร์สามารถบ่งชี้ได้ถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่กำหนดในอุตสาหกรรมว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดผงควรมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ไม่น้อยกว่า 600 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (จากตารางภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

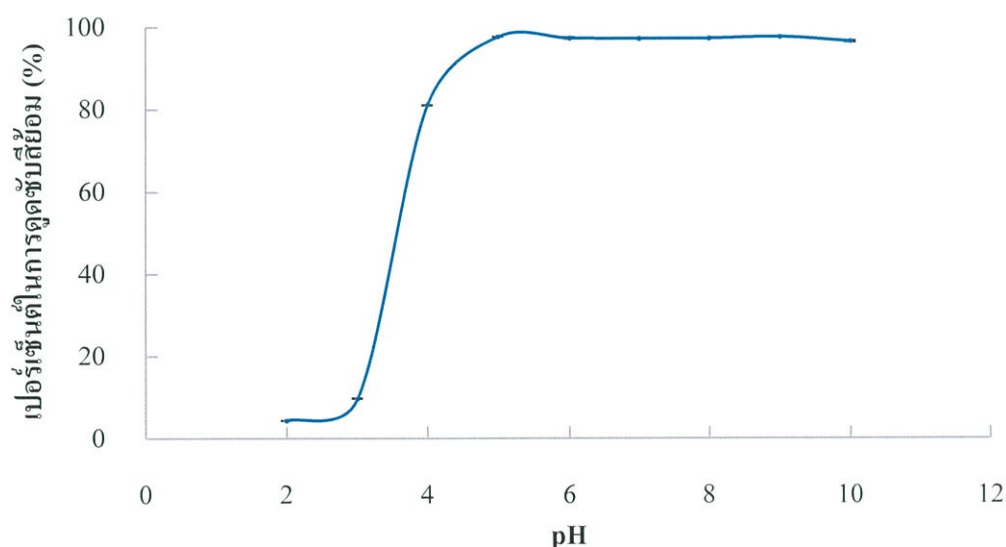
ชนิดของถ่านกัมมันต์	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์
ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า	2.79	616.60
ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	1.97	93.33

โดยพบว่า ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชาที่มีความสามารถในการดูดซับสารละลายไอโอดีน 2.79 mg/g และ 1.97 mg/g ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) เมื่อนำค่าการดูดซับสารละลายไอโอดีนที่ได้ไปคำนวณหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ พบว่า ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 616.60 ในขณะที่ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 93.33 แม้ว่าถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์จะสามารถดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่อย่างสีย้อมได้ แต่พบว่ามีความไอโอดีนนัมเบอร์น้อยและต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานไอโอดีนนัมเบอร์มีค่าไม่น้อยกว่า 600 แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ผลิตได้ไม่เหมาะต่อในการนำไปใช้ดูดซับสารเคมีที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ไอโอดีน เป็นต้น

### 4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

#### 4.3.1 ผลการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์มาลาไคท์กรีนความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 100 mL โดยปรับ pH ของสารละลายเป็น 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 เดิมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ 0.20 g นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน(%) กับค่า pH ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (จากตารางภาคผนวก จ)



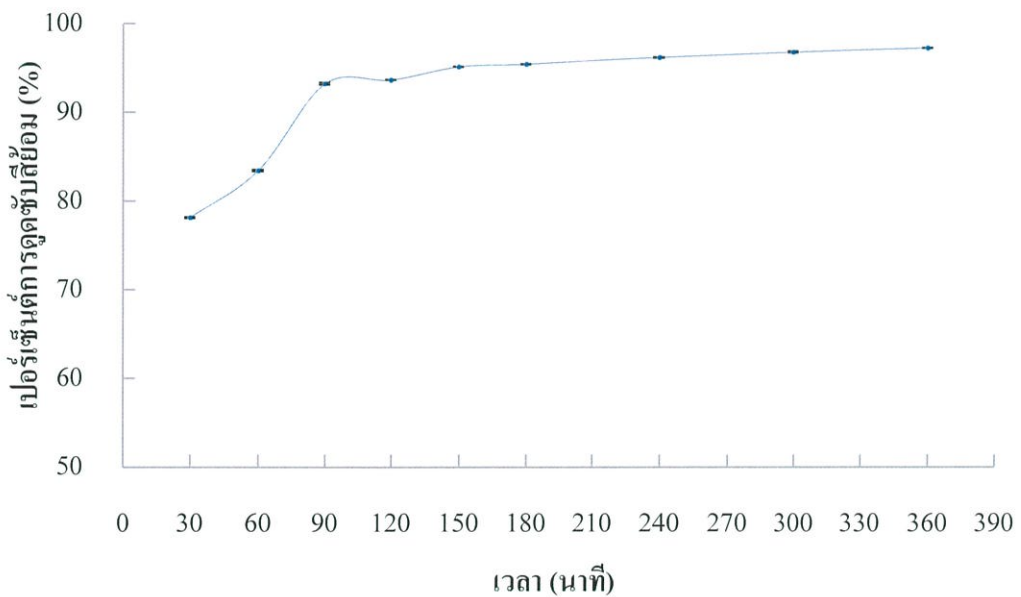
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับค่า pH

กราฟแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง pH 2-5 หลังจาก pH 5 จะมีค่าคงที่และลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วง pH 9-10 โดยที่ pH 5 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนสูงที่สุดเท่ากับ 97.8% และพบว่าไม่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 (จากภาคผนวก ฉ) เหตุผลที่แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนและค่า pH เป็นเช่นนี้ เนื่องจากสีย้อมมาลาไคท์กรีนเป็นสีประเภทแคทไอออนิก เมื่อละลายในน้ำจะแตกตัวเป็นสีย้อมประจุบวก หากอยู่ในสภาวะกรดที่มีปริมาณ  $H^+$  มาก จะเกิดแรงผลักระหว่างไอออน ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ยาก ในทางกลับกันเมื่ออยู่ในสภาวะด่าง ปริมาณ  $OH^-$  ที่อยู่ในสารละลายจะรวมตัวกับประจุบวกของสีย้อม ทำให้เกิดการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น แต่เมื่อประจุมรวมตัวจนถึง ณ จุดอิ่มตัวการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ลดลง ดังนั้นจึงถือได้ว่า ที่ pH 5 เป็นค่า pH ที่เหมาะสมในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Emine Akar และคณะที่กล่าวว่าการ

ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ pH 2-4 และหลังจาก pH 4 จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

#### 4.3.2 ผลการศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม

ศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์มาลาไคท์กรีนความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 100 mL โดยปรับ pH ของสารละลายให้มีค่า pH 5 เติมน้ำมันก๊าดที่ผลิตได้ 0.20 g นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 30, 60, 120, 150, 180, 240, 300 และ 360 นาที แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (%) กับระยะเวลาดูดซับ (นาที) ได้ดังรูปที่ 4.5 (จากตารางภาคผนวก จ)

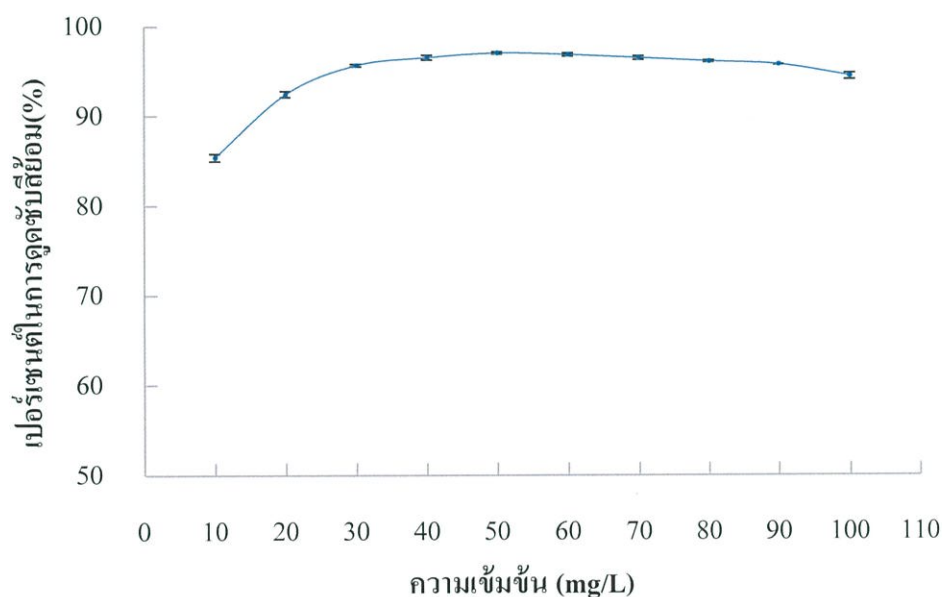


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับระยะเวลาดูดซับ

จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30-180 นาที จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาดูดซับ เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับและต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า (จากภาคผนวก ข) พบว่า ที่ระยะเวลาดูดซับ 180 นาที ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ 95.4% เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Emine Akar และคณะที่กล่าวว่า ระยะเวลาดูดซับที่ 180 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์จากกากชา

#### 4.3.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ

ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายมาลาไคท์กรีนที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์มาลาไคท์กรีนที่มีความเข้มข้น 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 mg/L ปริมาตร 100 mL โดยปรับ pH ของสารละลายให้มีค่า pH 5 ซึ่งเหมาะสมในการดูดซับ เดิมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ 0.20 g นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน(%)กับความเข้มข้นของสารละลาย(mg/L) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (จากตารางภาคผนวก จ)

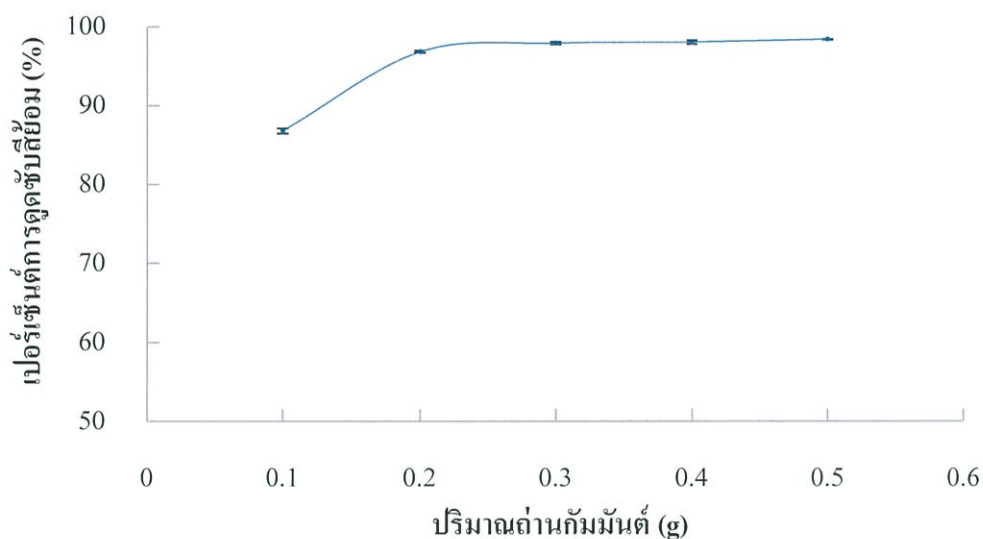


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับความเข้มข้นของสารละลาย

จากกราฟพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในช่วงความเข้มข้นของสารละลาย 10-50 mg/L หลังจากนั้นจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับมีเท่ากัน แต่โมเลกุลของสีย้อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโมเลกุลของสีย้อมจะเข้าไปแทรกในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เมื่อเกินความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์แล้ว กระบวนการดูดซับสีย้อมจะลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงที่สุดที่ความเข้มข้น 50 mg/L เท่ากับ 97.0% ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 (จากภาคผนวก ฉ) โดยถือว่าเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทดลอง

#### 4.3.4 ผลการศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

การศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ ทำได้โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ มาลาไคท์กรีนที่ความเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 100 mL โดยปรับ pH ของสารละลายที่ pH 5 เติม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 g นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่ 160 รอบต่อนาที เป็น เวลา 180 นาที แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง นำมาเขียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (%) กับปริมาณถ่านกัมมันต์ (g) ได้ดังรูปที่ 4.7 (จากตารางภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับ ปริมาณถ่านกัมมันต์

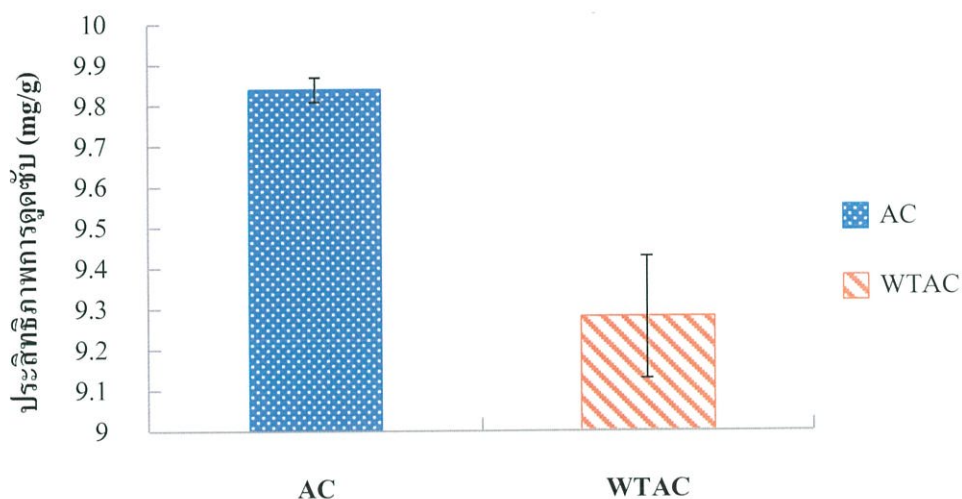
เมื่อพิจารณากราฟพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วง 0.1-0.4 g แต่ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับมากที่สุดคือ 0.5 g โดยมีค่าเท่ากับ 98.4% ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 (จากภาคผนวก จ) จึงถือได้ว่าปริมาณ ถ่านกัมมันต์ 0.5 g เป็นปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kah Aik Tan และคณะที่กล่าวว่า ปริมาณการดูดซับสีย้อมแคทไอออนิกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณตัวดูดซับ

#### 4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน

##### 4.4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน

จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนจากน้ำเสีย สังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

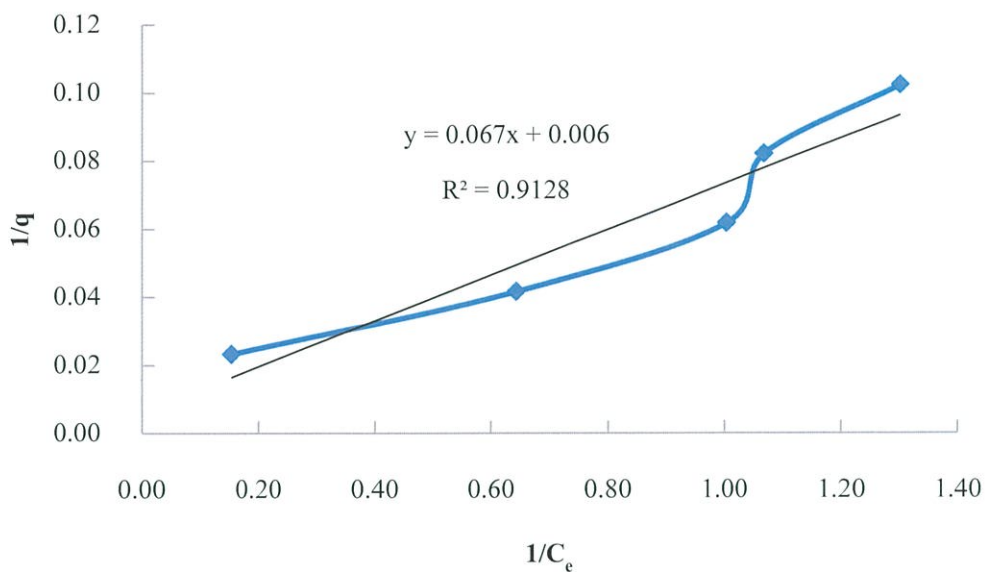
และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าเป็นตัวดูดซับในปริมาณ 0.5 g ทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ pH 5 ระยะเวลาดูดซับ 3 ชั่วโมง และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี้อมมาลาไลท์กรีน 50 mg/L ปริมาตร 100 mL พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมมาลาไลท์กรีนเท่ากับ 9.28 mg/g และ 9.84 mg/g ตามลำดับ (จากตารางภาคผนวก จ) ดังแสดงในรูป 4.8



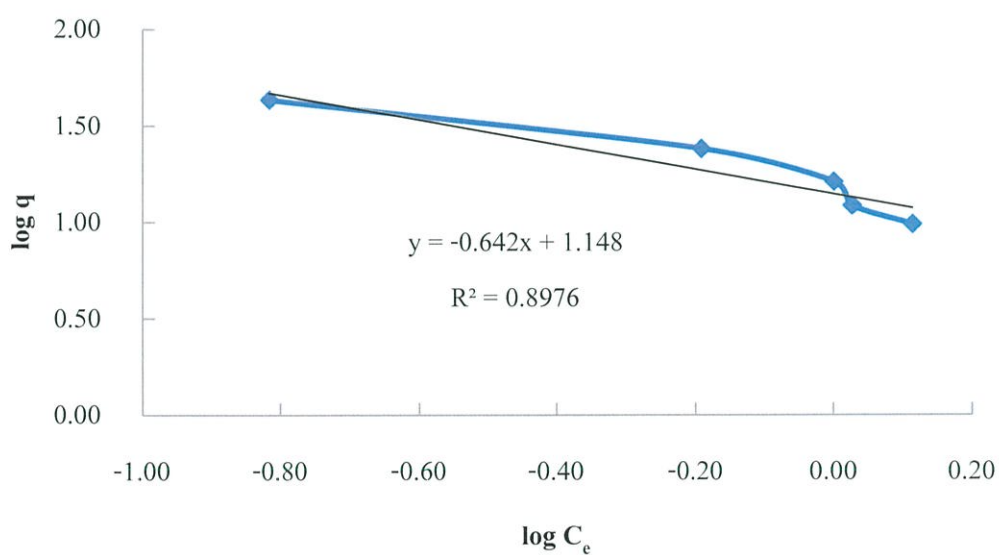
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมมาลาไลท์กรีนของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า และถ่านกัมมันต์จากกากชา

#### 4.4.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ทำการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm โดยศึกษาจากปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม คือ 0.5 g โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์มาลาไลท์กรีนที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมปริมาตร 100 mL โดยปรับ pH ของสารละลายให้อยู่ที่ pH 5 เติมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 g นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที แล้วนำผลการทดลองมาศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 (จากตารางภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.9 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm



รูปที่ 4.10 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm

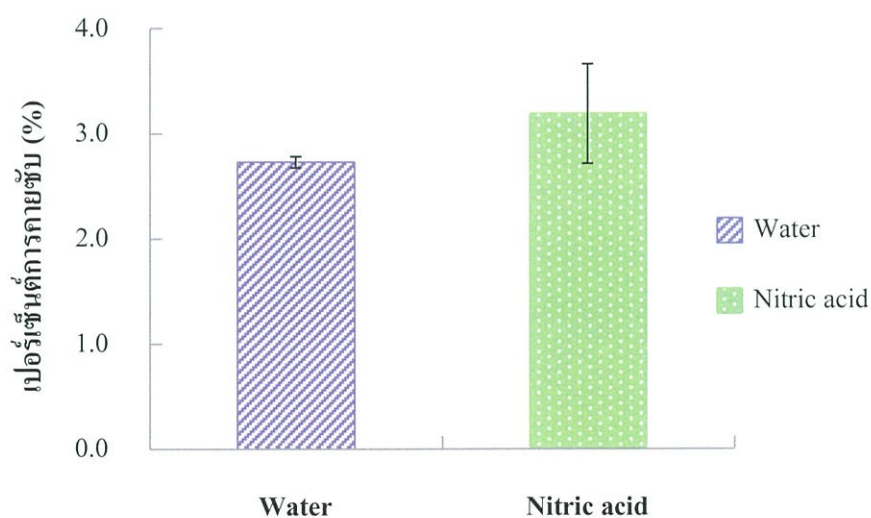
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm และ Freundlich Isotherm

Langmuir Isotherm		Freundlich Isotherm	
$q_0$	158.7300	$K_F$	0.5057
$K_L$	0.0939	$1/n$	0.6429
$R^2$	0.9128	$R^2$	0.8976

ผลการศึกษาพบว่า สมการการดูดซับของ Langmuir Isotherm มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9128 ซึ่งมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้จากสมการการดูดซับของ Freundlich Isotherm ( $R^2$  เท่ากับ 0.8976) (จากตารางที่ 4.3) เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  พบว่า กระบวนการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนเหมาะสมกับสมการการดูดซับของ Langmuir Isotherm จึงทำการคำนวณค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation factor or equilibrium parameter:  $R_L$ ) ได้เท่ากับ 0.1767 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนสอดคล้องกับสมการการดูดซับของ Langmuir Isotherm โดยมีลักษณะพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (homogeneous adsorption surface) และเป็นการดูดซับสีย้อมแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกำชัย นุ้ยธิติกุล ที่กล่าวว่า การดูดซับสีย้อมเบสิคกรีน 4 เป็นไปตามสมการการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm

#### 4.5 ผลการศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (กายขับ)

ศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ ทำได้โดยเตรียมสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 mL และน้ำกลั่น 100 mL เติมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่ 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคายซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับชนิดของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (จากตารางภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคายซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับชนิดของสารละลาย

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคายซึบสีข้อมมาลาโคท์กรีนกับชนิดของสารละลายพบว่า เมื่อใช้น้ำกลั่นและกรดไนตริก 0.1 M เป็นสารละลายในการคายซึบจะมีเปอร์เซ็นต์การคายซึบเท่ากับ 2.7% และ 3.2% ตามลำดับ นั้นหมายความว่า การนำถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปดูดซึบสีข้อมมาลาโคท์กรีน แล้วนำมาคายซึบสามารถคายซึบสีข้อมมาลาโคท์กรีนออกมาได้น้อย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เนื่องจากโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมหรือทางการเกษตร จะไม่นิยมนำกลับมาใช้ใหม่ เพราะการผลิตถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีต้นทุนต่ำ การนำกลับมาใช้ใหม่ อาจไม่คุ้มต่อการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ จึงนิยมนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ และด้วยคุณสมบัติเรื่องการคายซึบที่มีปริมาณน้อยทำให้ไม่เกิดการปนเปื้อนหรือมีการปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนของตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากชาและทำการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 3:1 (w/w) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการศึกษาคูสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูและความสามารถในการดูดซับไอโอดีนศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์จากกากชาและสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ค่าพีเอช ระยะเวลาดูดซับความเข้มข้นของสารละลายและปริมาณถ่านกัมมันต์ ศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับ รวมทั้งศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่ (คายซับ) ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์มีจำนวนรูพรุนและขนาดพื้นที่ผิวมากกว่ากากชาและถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ แต่มีขนาดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า อีกทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนยังมีขนาดใหญ่กว่าถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าด้านความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชาสามารถดูดซับได้เท่ากับ 3.97 และ 3.84 mg/g ตามลำดับ ด้านความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชามีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 616.60 และ 93.33 ตามลำดับ

2. ค่าพีเอชระยะเวลาดูดซับความเข้มข้นของสารละลายและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ คือ pH 5, ระยะเวลาดูดซับ 180 นาที, ความเข้มข้นของสารละลายสีข้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรและปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

3. ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าเท่ากับ 9.28 mg/g และ 9.84 mg/g โดยกระบวนการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์จากกากชาสอดคล้องตามสมการการดูดซับของ Langmuir Isotherm

4. ความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่ (คายซับ) โดยใช้ น้ำกลั่น และกรดไนตริก 0.1 โมลาร์เป็นสารละลายในการคายซับ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การคายซับเท่ากับ 2.7% และ 3.2% ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสียของวิธีการกระตุ้นทางเคมี คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้เสียเวลาในการล้างสารเคมีออก โดยจะต้องล้างและวัดความเป็นกรดต่างจนได้ค่าเป็นกลาง
2. ควรทำศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิดอื่นๆ ต่อไป เช่น สีแอซิด สีรีแอคทีฟ เป็นต้น
3. ควรศึกษาการกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกากชา เช่น โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2551. “น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม”. [Online]. Available: [http://infofile.pcd.go.th/water/water\\_textile.pdf](http://infofile.pcd.go.th/water/water_textile.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล 20 กุมภาพันธ์ 2557).
- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2530. ข่าววิทยาศาสตร์บริการ เรื่องถ่านกัมมันต์. 107. หน้า 12-13.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. 54 หน้า.
- กาญจนา ราษฎร์เริงฤทธิ์, จิราพร สติธาวรรกุล และณัฐจริย์ ปลื้มจิต. 2551. การกำจัดสีย้อมจากขั้นตอนการย้อมสีด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน. โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 85 หน้า.
- กำชัย นุ้ยชิตกุล. 2548. การศึกษาคุณสมบัติการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 92 หน้า.
- โกวิทย์ปิยะมั่งคณา, จารุวรรณดาพวัฒน์, ปิยวัฒน์โพธิมงคลกุลและฉัตรสคงสมภักดี. 2551. จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้โคโคซานเรซิน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 18(1). หน้า 68-79.
- จินตนา แจ่มจันทร์ และมนิรัตน์ ปาณะปุ่นฉง. 2546. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมรีแอคทีฟด้วยระบบเอสบีอาร์. โครงการงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 56 หน้า.
- ชวลิต เรื่องขจร และชุตินา กัลยาประสิทธิ์. 2548. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากใบชา. โครงการงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 53 หน้า.
- ณัฐยา พูนสุวรรณ. 2545. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 128 หน้า.
- ชนกมล เศรษฐหิรัญ, อัครณัฐ มีวัฒนา และศิริภัตสร อรุโณรส. 2551. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยไมโครเวฟ. โครงการงานพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 69 หน้า.

- นิชชรี นิลนนท์. 2539. การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 134 หน้า.
- นันทิยา ศรีสุวรรณ, พงษ์พันธุ์ วรรณสูตร และรัตนินทร์ ก้องสุรินทร์. 2547. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนและใช้ออกซิเจน. โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 54 หน้า.
- นภาพร แสงมณี, นันทวรรณ ประทีปพวงรัตน์ และพรศิริ แจ่มจำรัส. 2551. การเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม/พิมพ์ผ้า. โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 73 หน้า.
- นภารัตน์ จิวาลักษณ์. 2545. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 161 หน้า.
- บุญชัย ตระกูลมหัช. 2536. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 233 หน้า.
- ปรางศิริ ศรีสุภพัชร. 2551. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และสัจจจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่ย่อยสลายแล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 181 หน้า.
- ปรินทร์ เต็มญารศิลป์. 2551. การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและไผ่หมาจู้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 284 หน้า.
- ปานฉัตร กลัดเจริญ. 2554. การผลิตและทดสอบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 124 หน้า.
- พงษ์ศักดิ์ ขาวอินทร์. 2555. การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดฟื้นฟูสภาพได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 230 หน้า.

- เพ็ชรพรค ทศกร. 2535. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางที่เหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 146 หน้า.
- ยุวดี เศษวิทย์ และสายใจ นารถสมบุญ. 2541. ผลของสารละลายซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 86 หน้า.
- รัตนา มหาชัย, ทิพย์วัลย์ คำเหม็ง, ปริญญา จินดาประเสริฐ และสำเร็จ รักซ้อน. 2552. ศึกษาการคายซับของถ่านกลบที่อิมมัวด้วยสีย้อมผสมโลหะที่มีพิษบางตัว. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร. 1(2). หน้า 144-150.
- รุจิรัตน์ กิจเลิศพรไพโรจน์. 2546. การย่อยสลายสีมาลาโคท์กรีนโดยตะกอนเร่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยบูรพา. 102 หน้า.
- วนิดา ชูอักษร. 2555. เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา. 17(1). หน้า 181-191.
- วนิดา จาดคำ. 2548. การศึกษาคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากกากชาเขียวที่ผลิตโดยเครื่องอัดแบบเกลียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 90 หน้า.
- วรัญญา สงกรานต์. 2549. การศึกษาสมรรถนะในการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟโดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัชพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 195 หน้า.
- วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์. 2543. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยิ่งยวด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 131 หน้า.
- อัจฉราพร ไสละสูต. 2530. คู่มือการย้อมสี. กรุงเทพฯ: อักษรบัณฑิต. 352 หน้า.
- อนุสรณ์ ดิษฐสุวรรณ, ณรงค์ศักดิ์ อินถานนท์ และมารุต วิชยา. 2541. การศึกษาสมบัติและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏนครสวรรค์. 74 หน้า.
- Akar, Emine, Altinisik, Aylin and Seki, Yoldas. 2013. Using of activated carbon produced from spent tea leaves for the removal of malachite green from aqueous solution. Ecological Engineering Journal. 52. 19-27.

- Aljeboree, Aseel M., Alshirifi, Abbas N. and Alkaim, Ayad F. 2014. **Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon.** *Arabian Journal of Chemistry*. 1-13.
- American Society for Testing and Materials. 1996. **1996 annual book of ASTM standards.** USA: ASTM. 949 pages.
- Auta, M. and Hameed B.H. 2011. **Preparation of waste tea activated carbon using potassium acetate as an activating agent for adsorption of Acid Blue 25 dye.** *Chemical Engineering Journal*. 171(2). 502-509.
- Auta, M. and Hameed B.H. 2011. **Optimized waste tea activated carbon for adsorption of Methylene Blue and Acid Blue 29 dyes using response surface methodology.** *Chemical Engineering Journal*. 175. 233-243.
- Cheremisinoff, P.N. and A.C. Morresi. 1987. Carbon adsorption application. In P.N. Cheremisinoff and F. Ellerbusch (eds.), **Carbon adsorption handbook.** Michigan: Ann Arbor Science. 1054 pages.
- Clemmensen, S., Jensen, J.C., and Jensen, N.J. 1984. **Toxicological studies on Malachite green: a triphenylmethane dye.** *Arch. Toxicol.* 56. 43-45.
- Fernandes, C., Latitha, V.S., and Rao, K.V.K. 1991. **Enhancing effect of Malachite green on the development of hepatic preneoplastic lesions induced by N-nitrosodiethylamine in rats.** *Carcinogenesis*. 12. 839-845.
- Girgis, B.S., Yunis, Samya S., and Soliman Ashraf M. 2002. **Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation.** *Materials Letters*. 57(1). 164-172.
- Junior, Osvaldo Pezoti, Cazetta, Andre L., Gomes, Ralph C., Bsrizao, Erica O., Soouza, Isus P.A.F., Martinns, Alessandro C., Asefa, Tewodros and Almeida, Vitor C. 2014. **Synthesis of ZnCl<sub>2</sub>-activated carbon from macadamia nut endocarp (*Macadamia integrifolia*) by microwave-assisted pyrolysis: Optimization using RSM and methylene blue adsorption.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 105. 166-176.

- Kah Aik Tan, Norhashimash Morad, Tjoon Tow Teng, Ismail Norli and Pannneerselvam P. 2012. **Removal of cationic dye by magnetic nanoparticle ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) impregnated onto activated maize cob powder and kinetic study of dye waste adsorption.** APCBEE Procedia. 1. 83-89.
- Kamchai Nuithtikul, Sarawut Srikhun and Samorn Hirunpraaditkoon, 2010. **Kinetics and Equilibrium of adsorption Basic Green 4 dye on activated carbon derived from durian: Effect of pyrolysis and post-treatment conditions.** Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers. 41. 591-598.
- Mark de Luna, Daniel G., Flores, Edgar D., Genuino, Divine Angela D., Futalaa, Cybelle M. and Meng-Wei Wan. 2013. **Adsorption of Eriochrome Black T (EBT) dye using activated carbon prepared from waste rice hull-Optimization: isotherm and kinetic studies.** Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 44. 646-653.
- Simek, M. 1970. **Activated Carbon Manufacture Properties and Application**, New York: Elsevier Publishing Company. 479 pages.
- Srivartava, S.J., Singh, N.D., Srivastava, A.K., and Sinha, R. 1995. **Acute toxicity of Malachite green and its effects on certain blood parameters of a catfish, *Heteropneustes fossilis*.** Aquatic Toxicology. 31. 241-247.
- Windholz, M., Budavari, S., Stroumisos, L.Y. and Ferti, M.N. 1976. **The Merck Index.** 9<sup>th</sup> Edition. USA: Merck & CO. 1835 pages.
- Yao, K.M. 1971. **Removal of Particulate Matter by filtration.** Environmental Science Tecnology. 5(11). 378-382.

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย  
และคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกากชา

ภาคผนวก ก  
ผลการทดลองปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย  
และคาร์บอนคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกากชา

ก-1 การหาปริมาณความชื้น

ตารางที่ ก-1 ปริมาณความชื้นของกากชาที่ผ่าน กระบวนการทำให้เป็นถ่าน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก ภาชนะ (g)	น้ำหนักกากชา ก่อนอบ (g)	น้ำหนักกากชาและ ภาชนะหลังอบ (g)	น้ำหนักกากชา หลังอบ (g)
1	1	22.5680	1.0005	23.5036	0.9356
	2	22.5680	1.0005	23.5036	0.9356
	3	22.5681	1.0005	23.5037	0.9356
2	1	35.0315	1.0004	35.9665	0.9350
	2	35.0315	1.0003	35.9664	0.9349
	3	35.0316	1.0003	35.9664	0.9348
3	1	29.0755	1.0002	30.0090	0.9335
	2	29.0755	1.0003	30.0092	0.9337
	3	29.0756	1.0003	30.0093	0.9337
4	1	30.7142	1.0003	31.6485	0.9343
	2	30.7141	1.0003	31.6487	0.9346
	3	30.7142	1.0002	31.6486	0.9344
5	1	25.1459	1.0004	26.0797	0.9338
	2	25.1459	1.0005	26.0799	0.9340
	3	25.1458	1.0005	26.0799	0.9341

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{A - B}{B} \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังอบ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ; ตัวอย่างที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความชื้น} &= ((1.0005 - 0.9356)/1.0005) \times 100 \\ &= 6.49\% \end{aligned}$$

## ก-2 การหาปริมาณเถ้า

ตารางที่ ก-2 ปริมาณเถ้าของกากขาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก ภาชนะ (g)	น้ำหนักกากขา ก่อนเผา (g)	น้ำหนักกากขาและ ภาชนะหลังเผา (g)	น้ำหนักกากขา หลังเผา (g)
1	1	22.5680	0.9356	22.9703	0.4023
	2	22.5680	0.9356	22.9703	0.4023
	3	22.5681	0.9356	22.9704	0.4023
2	1	35.0315	0.9350	35.3922	0.3607
	2	35.0315	0.9349	35.3921	0.3606
	3	35.0316	0.9348	35.3923	0.3607
3	1	29.0755	0.9335	29.4052	0.3297
	2	29.0755	0.9337	29.4053	0.3298
	3	29.0756	0.9337	29.4055	0.3299
4	1	30.7142	0.9343	31.0547	0.3405
	2	30.7141	0.9346	31.0549	0.3408
	3	30.7142	0.9344	31.0548	0.3406
5	1	25.1459	0.9338	25.5448	0.3989
	2	25.1459	0.9340	25.5447	0.3988
	3	25.1458	0.9341	25.5448	0.3990

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{A - B}{C} \times 100 \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยเซรามิกพร้อมตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยเซรามิกก่อนเผา (กรัม)

C = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ; ตัวอย่างที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเถ้า} &= ((22.9703 - 22.5680)/0.9356) \times 100 \\ &= 43.00\% \end{aligned}$$

### ก-3 การหาปริมาณสารระเหย

ตารางที่ ก-3 ปริมาณสารระเหยของกากขาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก ภาชนะ (g)	น้ำหนักกากขา ก่อนเผา (g)	น้ำหนักกากขาและ ภาชนะหลังเผา (g)	น้ำหนักกากขา หลังเผา (g)
1	1	22.5680	0.9356	22.9703	0.4023
	2	22.5680	0.9356	22.9703	0.4023
	3	22.5681	0.9356	22.9704	0.4023
2	1	35.0315	0.9350	35.3922	0.3607
	2	35.0315	0.9349	35.3921	0.3606
	3	35.0316	0.9348	35.3923	0.3607
3	1	29.0755	0.9335	29.4052	0.3297
	2	29.0755	0.9337	29.4053	0.3298
	3	29.0756	0.9337	29.4055	0.3299
4	1	30.7142	0.9343	31.0547	0.3405
	2	30.7141	0.9346	31.0549	0.3408
	3	30.7142	0.9344	31.0548	0.3406
5	1	25.1459	0.9338	25.5448	0.3989
	2	25.1459	0.9340	25.5447	0.3988
	3	25.1458	0.9341	25.5448	0.3990

$$\text{ปริมาณสารระเหย (\%)} = \left[ \left( \frac{A - B}{A} \right) \times 100 \right] - \text{ปริมาณความชื้น (\%)} \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ; ตัวอย่างที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารระเหย} &= ((0.9356 - 0.4023)/0.9356) \times 100 - 6.49 \\ &= 50.51 \% \end{aligned}$$

#### ก-4 การหาปริมาณคาร์บอนกึ่งตัว

ตารางที่ ก-4 ปริมาณคาร์บอนกึ่งตัวของกากขาที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	เปอร์เซ็นต์ เถ้า	เปอร์เซ็นต์ สารระเหย	เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนกึ่งตัว
1	1	6.49	43.00	50.51	6.49
	2	6.49	43.00	50.51	6.49
	3	6.49	43.00	50.51	6.49
2	1	6.54	38.58	54.88	6.54
	2	6.54	38.57	54.89	6.54
	3	6.55	38.56	54.87	6.55
3	1	6.67	35.32	58.01	6.67
	2	6.66	35.32	58.02	6.66
	3	6.66	35.33	58.01	6.66
4	1	6.60	36.44	56.96	6.60
	2	6.60	36.47	56.97	6.57
	3	6.58	36.45	56.97	6.58
5	1	6.66	42.72	50.63	6.66
	2	6.65	42.70	50.66	6.65
	3	6.64	42.72	50.65	6.64

$$\text{ปริมาณคาร์บอนกึ่งตัว (\%)} = 100 - (A+B) \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ A = ปริมาณเถ้า (%)

B = ปริมาณสารระเหย (%)

ตัวอย่างการคำนวณ; ตัวอย่างที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณคาร์บอนกึ่งตัว} &= 100 - (43.00 + 50.51) \\ &= 6.49 \% \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข  
การดูดซับเมทิลีนบลู

## ภาคผนวก ข

## การดูดซับเมทธิลีนบลู

## ข-1 การเตรียมสารละลายเมทธิลีนบลู

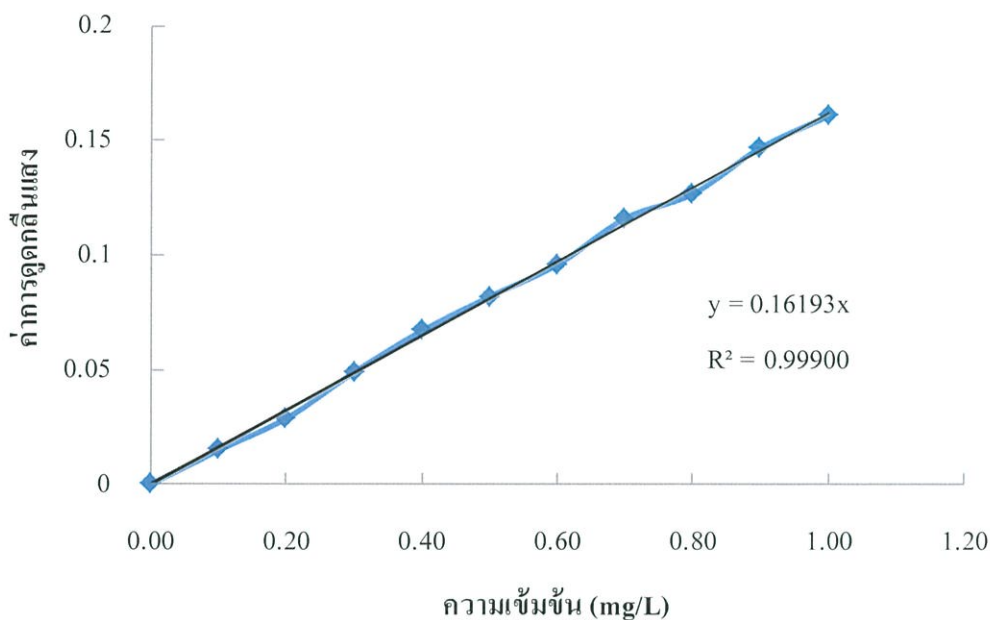
1. ชั่งสี่ย้อมเมทธิลีนบลู 0.0100 g ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 mL ในขวดปรับปริมาตร จะได้สารละลายเมทธิลีนบลูเข้มข้น 10 mg/L

## ข-2 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายเมทธิลีนบลู

1. เจือจางสารละลายเมทธิลีนบลูเป็น 1 mg/L โดยปิเปตสารละลายเมทธิลีนบลูที่เตรียมได้ 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 mL ในขวดปรับปริมาตร
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทธิลีนบลูความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 mg/L โดยปิเปตสารละลายเมทธิลีนบลูเข้มข้น 1 mg/L ปริมาตร 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 mL ตามลำดับ ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
3. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 670 nm

ตารางที่ ข-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทธิลีนบลู

ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0.00	0.000
0.10	0.015
0.20	0.029
0.30	0.049
0.40	0.067
0.50	0.082
0.60	0.096
0.70	0.116
0.80	0.127
0.90	0.147
1.00	0.161



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีข้อมเมทธิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสง

### ข-3 ความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู

#### ข-3.1 ความเข้มข้นที่คำนวณได้

จากรูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีข้อมเมทธิลีนบลูและค่าการดูดกลืนแสง

จะได้  $y = 0.16193x$

เมื่อ  $y =$  ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

$x =$  ความเข้มข้นที่คำนวณได้

ตัวอย่างการคำนวณ; ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ครั้งที่ 1

$$0.007 = 0.16193x$$

$$x = 0.0432$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.0432 mg/L

### ข-3.2 กำหนดปริมาณการดูดซับ

$$q_c = \frac{[(C_0 - C_c) \times V]}{W} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ  $q_c$  = ปริมาณการดูดซับของสีย้อมเมทธิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (mg/g)

$C_0$  = ความเข้มข้นของสีย้อมเมทธิลีนบลูก่อนการดูดซับ (mg/L)

$C_c$  = ความเข้มข้นของสีย้อมเมทธิลีนบลูหลังการดูดซับ (mg/L)

$V$  = ปริมาตรสารละลาย (L)

$W$  = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ (g)

ตัวอย่างการคำนวณ; ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} q_c &= \frac{[(9.9575 - 0.0432) \times \frac{100}{1000}]}{0.2500} \\ &= 3.9657 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการดูดซับของสีย้อมเมทธิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ครั้งที่ 1 เท่ากับ 3.9657 mg/g

### ข-3.3 กำหนดประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \frac{C_0 - C_c}{C_0} \times 100 \quad (\text{ข.2})$$

ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

ควบคุม ใน 1000 mL มี 9.9575 mg

$$\text{ใน 100 mL มี } \frac{100 \times 9.9575}{1000} = 0.9958 \text{ mg}$$

ตัวอย่าง ใน 1000 mL มี 0.0432 mg

$$\text{ใน 100 mL มี } \frac{100 \times 0.0432}{1000} = 0.0043 \text{ mg}$$

ประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\begin{aligned}\text{การดูดซับ (\%)} &= \frac{0.9958 - 0.0043}{0.9958} \times 100 \\ &= 99.57\%\end{aligned}$$

ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ย

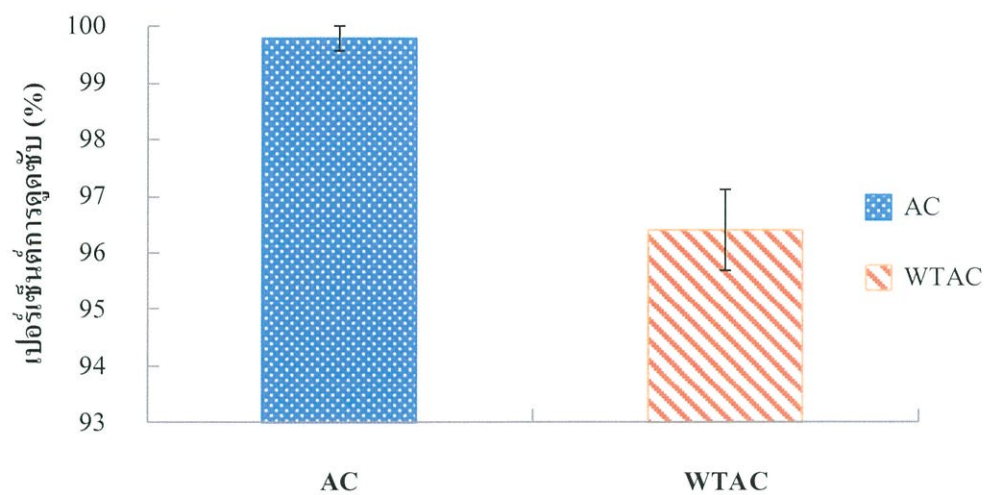
$$\frac{99.57 + 100.00 + 99.81}{3} = 99.79\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ยครั้งที่ 1 เท่ากับ 99.79%

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลู

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณได้ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน100ml (mg)	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)	ความสามารถในการดูดซับเฉลี่ย (mg/g)	%การดูดซับ	%การดูดซับเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ควบคุม	1	0	0.129	9.98	9.9575	0.9958	3.97	3.97	99.57	99.79	0.22
AC		0.2500	0.007	0.04	0.0432	0.0043					
ควบคุม	2	0	0.129	9.93	9.9575	0.9958	3.98				
AC		0.2501	0.000	0.00	0.0000	0.0000					
ควบคุม	3	0	0.129	9.95	9.9575	0.9958	3.98		99.81		
AC		0.2500	0.003	0.02	0.0185	0.0019					
ควบคุม	1	0	0.129	9.98	9.9575	0.9958	3.81	3.84		95.66	
WTAC		0.2501	0.070	0.43	0.4323	0.0432					
ควบคุม	2	0	0.129	9.93	9.9575	0.9958	3.84		96.47		
WTAC		0.2500	0.057	0.35	0.3520	0.0352					
ควบคุม	3	0	0.129	9.95	9.9575	0.9958	3.87			97.09	
WTAC		0.2500	0.047	0.29	0.2902	0.0290					

หมายเหตุ AC คือ ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและ WTAC คือ ถ่านกัมมันต์จากกากชา



รูปที่ ข-2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา

ภาคผนวก ก  
การดูฉบับไอโอดีน

## ภาคผนวก ก

## การดูดซับไอโอดีน (ASTM D4607)

## ค-1 การเตรียมสารละลาย

## 1.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยปริมาตร

เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 70.0 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นปริมาตร 550 มิลลิลิตร

1.2 สารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น  $0.10 \pm 0.001$  นอร์มอล ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

1. ชั่งไอโอดีนประมาณ 12.70 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ประมาณ 19.10 กรัม ผสมให้เข้ากันในสภาพที่เป็นของแข็ง
2. เติมน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตรแล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำกลั่นลงไปพร้อมกวนตลอดเวลา จนได้ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร
3. กวนสารละลายเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จนผลึกไอโอดีนละลายหมด
4. เทลงขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร เทสารละลายลงในขวดสีชา

1.3 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ความเข้มข้น  $0.10 \pm 0.001$  นอร์มอล ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

1. ชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต ประมาณ 24.82 กรัม เติมน้ำกลั่นที่เดือดใหม่ๆ ปริมาตร  $75 \pm 25$  มิลลิลิตร คนให้ละลาย
2. เติมโซเดียมคาร์บอเนตประมาณ  $0.10 \pm 0.01$  กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไทโอซัลเฟตจากแบคทีเรีย
3. เทลงขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร ในขวดปรับปริมาตร
4. เทสารละลายลงในขวดสีชา และเก็บไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 4 วัน ก่อนนำมาใช้

#### 1.4 สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ( $KIO_3$ ) ความเข้มข้น $0.10 \pm 0.001$ นอร์มอล ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

1. อบโพแทสเซียมไอโอเดตประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น
2. ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต 3.5667 กรัม มาละลายด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
3. เทลงขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกรปริมาตร ในขวดปรับปริมาตร
4. เทเก็บในขวดที่มีฝาปิดมิดชิด

#### 1.5 สารละลายน้ำแป้ง

1. ชั่งแป้งหนักประมาณ 0.1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นประมาณ 100 มิลลิลิตร
2. นำไปต้มจนได้สารละลายใส (น้ำแป้งควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ทำการศึกษาทดลอง)
3. ทิ้งให้เย็นแล้วเก็บในขวดเก็บสารแช่ไว้ในตู้เย็น

### ก-2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

#### 2.1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

1. ปิเปิดสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ประมาณ  $2.0 \pm 0.01$  กรัม เหย้าให้ละลาย
3. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร เหย้าให้เข้ากัน
4. ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีชาอ่อน เติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด จุดยุติคือ จุดที่สารละลายไม่มีสี (การไทเทรตควรทำ 3 ครั้ง แล้วหาความเข้มข้นเฉลี่ย แต่ถ้าความเข้มข้นในแต่ละครั้งแตกต่างกันมากกว่า 0.003 นอร์มอล ควรทำการทดลองใหม่)
5. คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดย

$$N_1 = \frac{P \times R}{S} \quad (\text{ก.1})$$

- เมื่อ  $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (N)  
 $P$  = ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (mL)  
 $R$  = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (N)  
 $S$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (mL)

## 2.2 ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

1. ปิเปตสารละลายไอโอดีน ปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีชาอ่อน เติมน้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด จุดยุติคือ จุดที่สารละลายไม่มีสี (การไทเทรตควรทำ 3 ครั้ง แล้วหาความเข้มข้นเฉลี่ย แต่ถ้าความเข้มข้นในแต่ละครั้งแตกต่างกันมากกว่า 0.003 นอร์มอล ควรทำการทดลองใหม่)
3. กำหนดความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน โดย

$$N_2 = \frac{S \times N_1}{I} \quad (\text{ก.2})$$

- เมื่อ  $N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)  
 $S$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (mL)  
 $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (N)  
 $I$  = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไทเทรต (mL)

## ก-3 การคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน

$$\frac{X}{M} = \frac{[A - (DF \times B \times S)]}{W} \quad (\text{ก.3})$$

$$A = N_2 I (126.93) \quad (\text{ก.4})$$

$$B = N_1 (126.93) \quad (\text{ก.5})$$

$$DF = (I + H) / F \quad (\text{ก.6})$$

$$C_1 = \frac{N_1 \times S}{F_1} \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ  $A$  = น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น (mg)

$B$  = น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมดุลพอดีกับสารละลายมาตรฐาน

โซเดียมไทโอซัลเฟต 1 มิลลิกรัม (mg)

$DF$  = สัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นต่อปริมาตรสารละลายที่นำมาไทเทรต

$\frac{X}{M}$  = ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g)

$I$  = ปริมาตรของไอโอดีนเริ่มต้น (mL)

$N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)

$H$  = ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ใช้ (mL)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (g)

$C_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ (N)

$N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (N)

$S$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (mL)

$F_1$  = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไทเทรต (mL)

#### ก-4 ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

##### 4.1 ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

โดยการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.1000 นอร์มอล และใช้น้ำ  
แป้งเป็นอินดิเคเตอร์

น้ำหนักโพแทสเซียมไอโอเดต = 3.5667 กรัม

$$\frac{g}{M} = \frac{NV}{1000} \quad (\text{ค.8})$$

เมื่อ  $g$  = น้ำหนักของโพแทสเซียมไอโอเดต (g)

$M$  = น้ำหนักสมมูลของไอโอเดต (g/meq)

$N$  = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอโอเดต (N)

$V$  = ปริมาตรสารละลาย (mL)

$$\frac{(3.5667)}{35.67} = \frac{N \times 1000}{1000}$$

$$N = \frac{(3.5667)}{35.67} \times \frac{1000}{1000}$$

$$= 0.1000 \text{ N}$$

ดังนั้น สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.1000 นอร์มัล

ตารางที่ ค-1 ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาความเข้มข้นที่แน่นอน

ครั้งที่	สเกลบิวเรตเริ่มต้น (mL)	สเกลบิวเรตสุดท้าย (mL)	ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (mL)
1	0.00	25.20	25.20
2	0.00	25.10	25.10
3	0.00	25.10	25.10
เฉลี่ย			25.13

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ดังสมการ (ค.1)

$$N_1 = \frac{P \times R}{S}$$

$$N_1 = \frac{25 \times 0.1000}{25.13}$$

$$N_1 = 0.0995 \text{ N}$$

ดังนั้น สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมีความเข้มข้น 0.0995 นอร์มัล

#### 4.2 ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไอโอดีน

โดยการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.1000 นอร์มอล และใช้น้ำ  
แข็งเป็นอินดิเคเตอร์

ตารางที่ ค-2 ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาความเข้มข้นที่แน่นอน

ครั้งที่	สเกลบิวเรตเริ่มต้น (mL)	สเกลบิวเรตสุดท้าย (mL)	ปริมาตร Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่ใช้ (mL)
1	0.00	25.10	25.10
2	0.00	25.00	25.00
3	0.00	25.10	25.10
เฉลี่ย			25.07

คำนวณความเข้มข้นของไอโอดีนดังสมการ (ค.2)

$$N_2 = \frac{S \times N_1}{I}$$

$$N_2 = \frac{25.07 \times 0.0995}{25}$$

$$N_2 = 0.0998 \text{ N}$$

ดังนั้น สารละลายไอโอดีนมีความเข้มข้น 0.0998 นอร์มัล

### 4.3 การดูดซับไอโอดีน

#### 4.3.1 การหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า

ตารางที่ ค-3 ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์

ครั้งที่	น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ (g)	สเกลบิวเรต เริ่มต้น (mL)	สเกลบิวเรต สุดท้าย (mL)	ปริมาตร Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่ใช้ (mL)
1	1.0002	0.00	17.50	17.50
2	1.5406	0.00	12.30	12.30
3	2.3113	0.00	7.40	7.40
blank	0.00	0.00	50.00	50.00

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ ดังสมการ (ค.7)

$$C_1 = \frac{N_1 \times S}{F_1}$$

ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

$$C_1 = \frac{0.0995 \times 17.50}{50}$$

$$= 0.03 \text{ N}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.03 นอร์มอล

ตารางที่ ค-4 การหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า

ครั้งที่	น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาตร Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mL)	ความ เข้มข้น (N)	X — M	ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	ค่าไอโอดีน นัมเบอร์
1	1.0002	17.5	0.03	780.35	2.79	616.60
2	1.5406	12.3	0.02	600.41		
3	2.3113	7.4	0.01	459.12		

การหาค่าการดูดซับไอโอดีนหาได้โดยใช้ Three-Point Adsorption Isotherm โดยเขียนกราฟระหว่างค่าปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. คำนวณน้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น ดังสมการ (ค.4)

$$A = N_2 I (126.93)$$

ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน = 0.0998 N

ปริมาตรสารละลายไอโอดีน = 100 mL

$$A = 0.0998 \times 100 \times 126.93$$

$$= 1266.76 \text{ mg}$$

ดังนั้น น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น 1266.76 มิลลิกรัม

2. จำนวนน้ำหนักของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลพอดีกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 มิลลิตรดังสมการ (ค.5)

$$B = N_1(126.93)$$

น้ำหนักสมมูลของไอโอดีน = 126.93 g/meq

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต = 0.0995 N

$$\begin{aligned} B &= 0.0995 \times 126.93 \\ &= 12.63 \text{ mg} \end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำหนักของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลพอดีกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 มิลลิตร เท่ากับ 12.63 มิลลิกรัม

3. จำนวนสัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นต่อปริมาตรสารละลายที่นำมาไทเทรตดังสมการ (ค.6)

$$DF = (I + H)/F$$

ปริมาตรสารละลายไอโอดีน = 100 mL

ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก = 10 mL

ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไทเทรต = 50 mL

$$\begin{aligned} \text{Dilution Factor (DF)} &= (100 + 10)/50 \\ &= 2.2 \end{aligned}$$

ดังนั้น สัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นต่อปริมาตรสารละลายที่นำมาไทเทรตเท่ากับ 2.2

4. จำนวนหาปริมาณ ไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g) ดังสมการ (ค.3)

$$\frac{X}{M} = \frac{[A - (DF \times B \times S)]}{W}$$

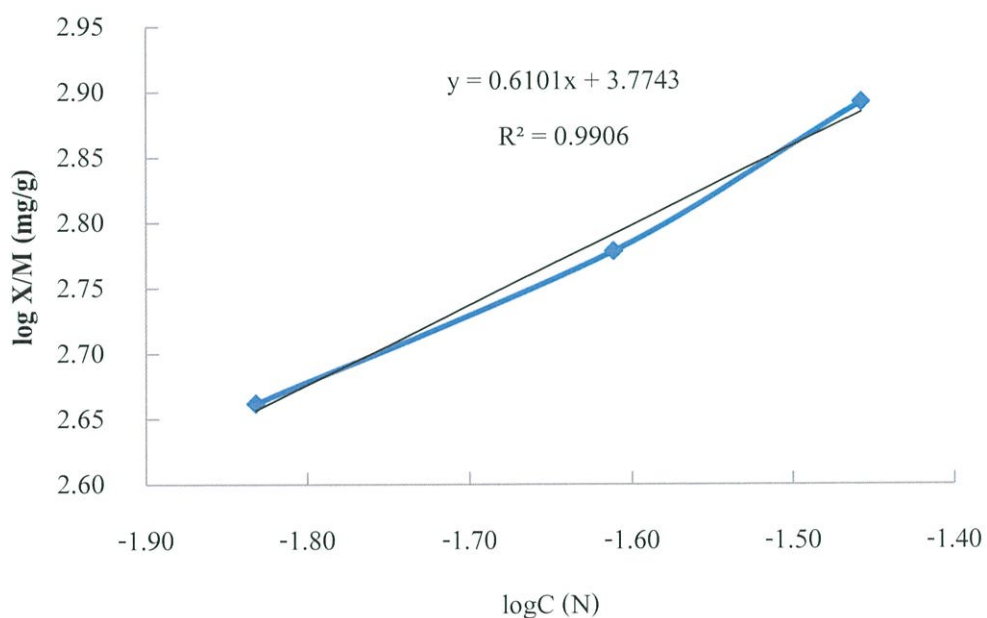
ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

น้ำหนักถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ำ = 1.0002 g

ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต = 17.50 mL

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์} &= \frac{[1266.76 - (2.2 \times 12.63 \times 17.50)]}{1.0002} \\ &= 780.35 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ำ (X/M) ครั้งที่ 1 เท่ากับ 780.35 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ ก-1 ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ำ

ค่าการดูดซับไอโอดีนจะเป็นค่า (X/M) ที่อ่านได้จากกราฟ (ดังรูปที่ ก-1) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับเท่ากับ 0.02 N

จากกราฟ ค่าการดูดซับไอโอดีน = 2.79 mg/g

$$\begin{aligned} \text{ไอโอดีนนัมเบอร์} &= 10^{2.79} \\ &= 616.60 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ำเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับเท่ากับ 0.02 นอร์มอล เท่ากับ 2.79 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 616.60

## 4.3.2 การหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

ตารางที่ ค-5 ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์

ครั้งที่	น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ (g)	สเกลบิวเรต เริ่มต้น (mL)	สเกลบิวเรต สุดท้าย (mL)	ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (mL)
1	5.0015	0.00	16.30	16.30
2	11.8437	0.00	10.90	10.90
3	18.4453	0.00	7.00	7.00
blank	0.0000	0.00	50.00	50.00

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ โดย (ค.7)

$$C_1 = \frac{N_1 \times S}{F_1}$$

ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

$$C_1 = \frac{0.0995 \times 16.30}{50}$$

$$= 0.03 \text{ N}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.03 นอร์มอล

ตารางที่ ค-6 การหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

ครั้งที่	น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)	ความ เข้มข้น (N)	$\frac{X}{M}$	ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (mg/g)	ค่าไอโอดีน นัมเบอร์
1	5.0015	16.30	0.03	162.72	1.97	93.33
2	11.8437	10.90	0.02	81.39		
3	18.4453	7.00	0.01	58.13		

การหาค่าการดูดซับไอโอดีนหาได้โดยใช้ Three-Point Adsorption Isotherm โดยเขียนกราฟระหว่างค่าปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. คำนวณน้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น ดังสมการ (ค.4)

$$A = N_2 I (126.93)$$

ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน = 0.0998 N

ปริมาตรสารละลายไอโอดีน = 100 mL

$$A = 0.0998 \times 100 \times 126.93$$

$$= 1266.76 \text{ mg}$$

ดังนั้น น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น 1266.76 มิลลิกรัม

2. คำนวณน้ำหนักของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลพอดีกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 มิลลิลิตรดังสมการ (ค.5)

$$B = N_1 (126.93)$$

น้ำหนักสมมูลของไอโอดีน = 126.93 g/meq

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต = 0.0995 N

$$B = 0.0995 \times 126.93$$

$$= 12.63 \text{ mg}$$

ดังนั้น น้ำหนักของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลพอดีกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 12.63 มิลลิกรัม

3. คำนวณสัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นต่อปริมาตรสารละลายที่นำมาไทเทรตดังสมการ (ค.6)

$$DF = (I + H)/F$$

ปริมาตรสารละลายไอโอดีน = 100 mL

ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก = 10 mL

ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไทเทรต = 50 mL

$$\text{Dilution Factor (DF)} = (100 + 10)/50$$

$$= 2.2$$

ดังนั้น สัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นต่อปริมาตรสารละลายที่นำมาไทเทรตเท่ากับ 2.2

4. กำหนดหาปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g) ดังสมการ (ค.3)

$$\frac{X}{M} = \frac{[A - (DF \times B \times S)]}{W}$$

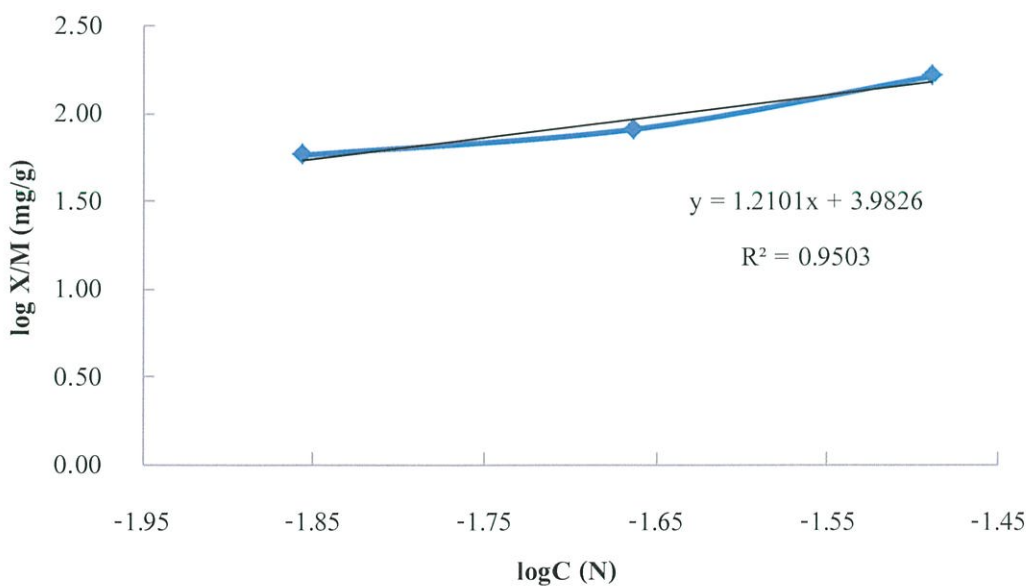
ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ = 5.0015 g

ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต = 16.30 mL

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์} &= \frac{[1266.76 - (2.2 \times 12.63 \times 16.30)]}{5.0015} \\ &= 162.72 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ (X/M) ครั้งที่ 1 เท่ากับ 162.72 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ ก-2 ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

ค่าการดูดซับไอโอดีนจะเป็นค่า (X/M) ที่อ่านได้จากกราฟ (ดังรูปที่ ก-2) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับเท่ากับ 0.02 N

จากกราฟ ค่าการดูดซับไอโอดีน = 1.97 mg/g

$$\text{ไอโอดีนนัมเบอร์} = 10^{1.97}$$

$$= 93.33$$

ดังนั้น ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับเท่ากับ 0.02 นอร์มอล เท่ากับ 1.97 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 93.33

ภาคผนวก ง

การเตรียมกราฟมาตรฐานสีเขียวมาลาไคท์กรีน

## ภาคผนวก ง

## การเตรียมกราฟมาตรฐานสีเขียวอมมาลาไคท์กรีน

## ง-1 การเตรียมสารละลาย

1. ชั่งสีเขียวอมมาลาไคท์กรีน 0.1000 g ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ในขวดปรับปริมาตร จะได้สารละลายมาลาไคท์กรีนเข้มข้น 100 mg/L

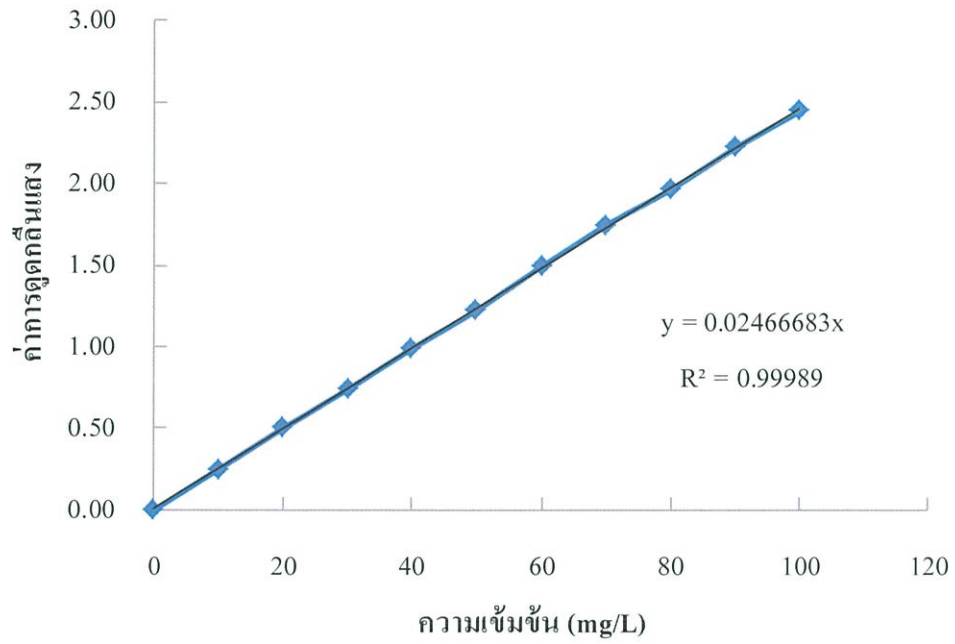
## ง-2 การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานมาลาไคท์กรีนความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 mg/L โดยปิเปตสารละลายมาลาไคท์กรีนความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 mL ตามลำดับ ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 nm

ตารางที่ ง-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาลาไคท์กรีน

ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
10	0.250
20	0.503
30	0.741
40	0.988
50	1.227
60	1.495
70	1.746
80	1.966
90	2.222
100	2.449



รูปที่ ง-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีเขียวคลอโรฟิลล์และค่าการดูดกลืนแสง

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองการดูดซับสีข้อมมาลาโคที่กรีน

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน

จ-1 ผลการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ

ตารางที่ จ-1 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของชุดควบคุม ณ pH ต่างๆ

ครั้งที่	1				2				3			
ควบคุม	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ความเข้มข้นที่วัด (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)
pH2	0.739	29.97	29.9593	2.9959	0.732	29.69	29.6755	2.9675	0.734	29.74	29.7566	2.9757
pH3	2.316	93.88	93.8913	9.3891	2.315	93.84	93.8507	9.3851	2.319	94.03	94.0129	9.4013
pH4	2.432	98.60	98.5939	9.8594	2.447	99.19	99.2020	9.9202	2.437	98.80	98.7966	9.8797
pH5	2.413	97.82	97.8237	9.7824	2.412	97.80	97.7831	9.7783	2.419	98.05	98.0669	9.8067
pH6	1.007	40.82	40.8241	4.0824	1.008	40.84	40.8646	4.0864	1.012	41.01	41.0268	4.1027
pH7	1.707	69.20	69.2022	6.9202	1.708	69.24	69.2428	6.9243	1.710	69.32	69.3239	6.9324
pH8	0.655	26.57	26.5539	2.6554	0.655	26.55	26.5539	2.6554	0.655	26.55	26.5539	2.6554
pH9	0.649	26.30	26.3106	2.6311	0.646	26.18	26.1890	2.6189	0.648	26.25	26.2701	2.6270
pH10	0.225	9.12	9.1216	0.9122	0.224	9.08	9.0810	0.9081	0.223	9.03	9.0405	0.9040

ตารางที่ จ-2 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ pH ต่างๆ

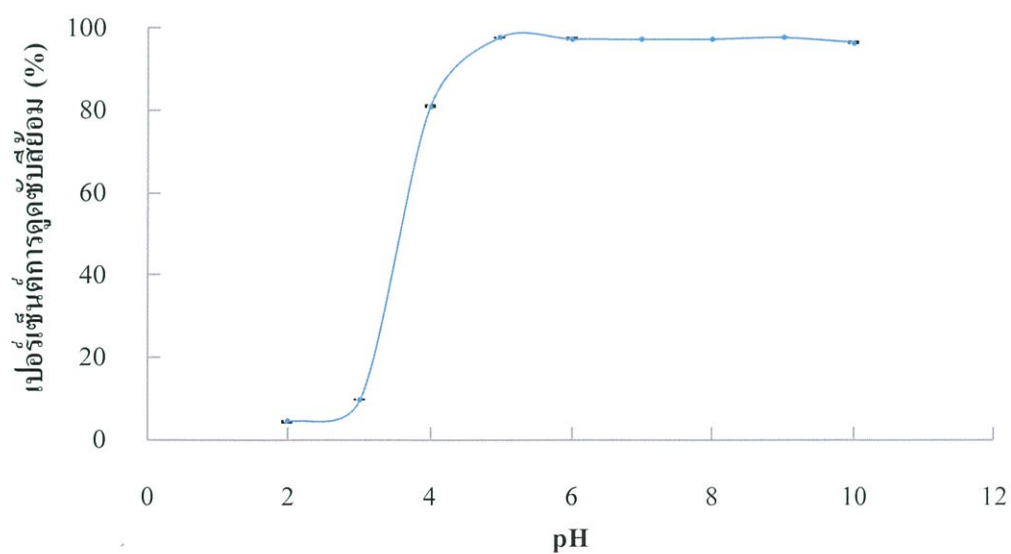
ครั้งที่	1				2				3			
ตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)
pH2	0.706	28.64	28.6214	2.8621	0.700	28.39	28.3782	2.8378	0.701	28.40	28.4187	2.8419
pH3	2.087	84.61	84.6075	8.4608	2.089	84.68	84.6886	8.4689	2.092	84.79	84.8102	8.4810
pH4	0.461	18.68	18.6891	1.8689	0.460	18.64	18.6485	1.8649	0.459	18.60	18.6080	1.8608
pH5	0.052	2.12	2.1081	0.2108	0.055	2.24	2.2297	0.2230	0.053	2.13	2.1486	0.2149
pH6	0.025	1.00	1.0135	0.1014	0.024	0.96	0.9730	0.0973	0.028	1.13	1.1351	0.1135
pH7	0.045	1.82	1.8243	0.1824	0.044	1.77	1.7838	0.1784	0.049	1.97	1.9865	0.1986
pH8	0.017	0.70	0.6892	0.0689	0.018	0.72	0.7297	0.0730	0.017	0.68	0.6892	0.0689
pH9	0.015	0.60	0.6081	0.0608	0.014	0.58	0.5676	0.0568	0.015	0.61	0.6081	0.0608
pH10	0.008	0.32	0.3243	0.0324	0.008	0.32	0.3243	0.0324	0.007	0.27	0.2838	0.0284

ตารางที่ จ-3 ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ถูกดูดซับ ณ pH ต่างๆ

ครั้งที่	1					2					3				
ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	$C_0$ (mg/L)	$C_c$ (mg/L)	$C_0-C_c$ (mg/L)	$q_c$ (mg/g)	น้ำหนัก (g)	$C_0$ (mg/L)	$C_c$ (mg/L)	$C_0-C_c$ (mg/L)	$q_c$ (mg/g)	น้ำหนัก (g)	$C_0$ (mg/L)	$C_c$ (mg/L)	$C_0-C_c$ (mg/L)	$q_c$ (mg/g)
pH2	0.2000	29.9593	28.6214	1.3378	0.67	0.2000	29.6755	28.3782	1.2973	0.65	0.2000	29.7566	28.4187	1.3378	0.67
pH3	0.2000	93.8913	84.6075	9.2837	4.64	0.2001	93.8507	84.6886	9.1621	4.58	0.2000	94.0129	84.8102	9.2026	4.60
pH4	0.2000	98.5939	18.6891	79.9049	39.95	0.2000	99.2020	18.6485	80.5535	40.28	0.2000	98.7966	18.6080	80.1887	40.09
pH5	0.2000	97.8237	2.1081	95.7156	47.86	0.2000	97.7831	2.2297	95.5534	47.78	0.2000	98.0669	2.1486	95.9183	47.96
pH6	0.2001	40.8241	1.0135	39.8105	19.90	0.2000	40.8646	0.9730	39.8916	19.95	0.2000	41.0268	1.1351	39.8916	19.95
pH7	0.2000	69.2022	1.8243	67.3779	33.69	0.2000	69.2428	1.7838	67.4590	33.73	0.2000	69.3239	1.9865	67.3374	33.67
pH8	0.2000	26.5539	0.6892	25.8647	12.93	0.2001	26.5539	0.7297	25.8242	12.91	0.2000	26.5539	0.6892	25.8647	12.93
pH9	0.2000	26.3106	0.6081	25.7025	12.85	0.2000	26.1890	0.5676	25.6215	12.81	0.2000	26.2701	0.6081	25.6620	12.83
pH10	0.2000	9.1216	0.3243	8.7972	4.40	0.2001	9.0810	0.3243	8.7567	4.38	0.2000	9.0405	0.2838	8.7567	4.38

ตารางที่ จ-4 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ณ pH ต่างๆ

ครั้งที่	1	2	3	ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)		
pH2	4.5	4.4	4.5	4.4	0.06
pH3	9.9	9.8	9.8	9.8	0.07
pH4	81.0	81.2	81.2	81.1	0.08
pH5	97.9	97.7	97.8	97.8	0.06
pH6	97.5	97.6	97.2	97.5	0.20
pH7	97.4	97.4	97.1	97.3	0.15
pH8	97.4	97.3	97.4	97.4	0.09
pH9	97.7	97.8	97.7	97.7	0.08
pH10	96.4	96.4	96.9	96.6	0.25



รูปที่ จ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับค่า pH

จ-2 ผลการศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม

ตารางที่ จ-5 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของชุดควบคุม ณ ระยะเวลาต่างๆ

ครั้งที่	1				2				3			
ควบคุม (min)	ค่าการ ดูดกลืน แสงที่วัด ได้ (A)	ความ เข้มข้น ที่วัดได้ (mg/L)	ความ เข้มข้นที่ คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสี ใน 100 mL (mg)	ค่าการ ดูดกลืน แสงที่วัด ได้ (A)	ความ เข้มข้น ที่วัดได้ (mg/L)	ความ เข้มข้นที่ คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสี ใน 100 mL (mg)	ค่าการ ดูดกลืน แสงที่วัด ได้ (A)	ความ เข้มข้น ที่วัดได้ (mg/L)	ความ เข้มข้นที่ คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสี ใน 100 mL (mg)
30	2.430	98.50	98.5129	9.8513	2.426	98.35	98.3507	9.8351	2.432	98.60	98.5939	9.8594
60	2.410	97.71	97.7021	9.7702	2.411	97.73	97.7426	9.7743	2.414	97.86	97.8642	9.7864
90	2.370	96.06	96.0804	9.6080	2.367	95.95	95.9588	9.5959	2.369	96.06	96.0399	9.6040
120	2.312	93.72	93.7291	9.3729	2.32	94.05	94.0534	9.4053	2.317	93.94	93.9318	9.3932
150	2.34	94.84	94.8642	9.4864	2.347	95.16	95.1480	9.5148	2.342	94.96	94.9453	9.4945
180	2.344	95.04	95.0264	9.5026	2.342	94.94	94.9453	9.4945	2.343	94.98	94.9859	9.4986
240	2.237	90.69	90.6886	9.0689	2.239	90.78	90.7697	9.0770	2.243	90.93	90.9318	9.0932
300	2.351	95.31	95.3102	9.5310	2.354	95.44	95.4318	9.5432	2.354	95.42	95.4318	9.5432
360	2.327	94.34	94.3372	9.4337	2.334	94.61	94.6210	9.4621	2.328	94.39	94.3778	9.4378

ตารางที่ จ-6 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ ระยะเวลาต่างๆ

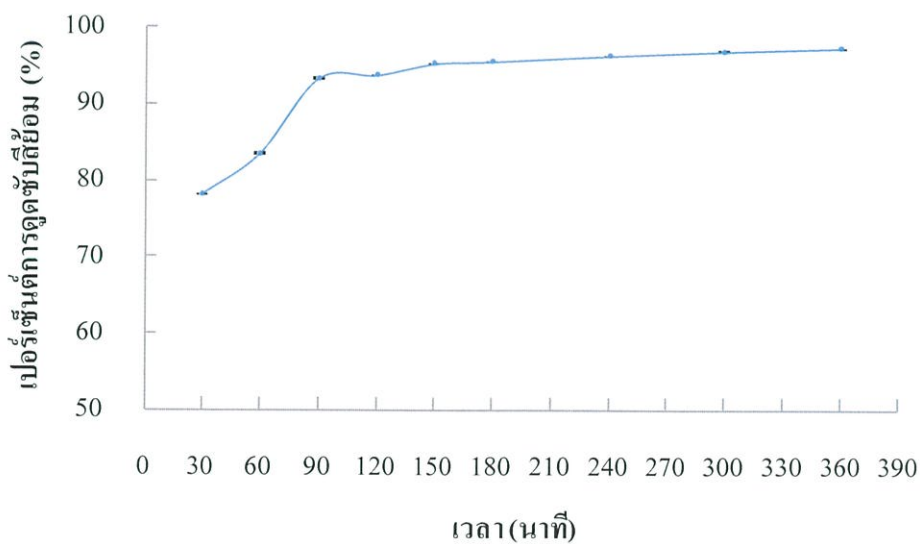
ครั้งที่	1				2				3			
ตัวอย่าง (min)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)
30	0.529	21.45	21.4458	2.1446	0.531	21.53	21.5269	2.1527	0.534	21.66	21.6485	2.1649
60	0.402	16.29	16.2972	1.6297	0.398	16.14	16.1350	1.6135	0.397	16.09	16.0945	1.6094
90	0.161	6.54	6.5270	0.6527	0.162	6.55	6.5675	0.6568	0.157	6.38	6.3648	0.6365
120	0.147	5.96	5.9594	0.5959	0.146	5.92	5.9189	0.5919	0.148	5.99	6.0000	0.6000
150	0.114	4.61	4.6216	0.4622	0.113	4.59	4.5811	0.4581	0.114	4.63	4.6216	0.4622
180	0.107	4.35	4.3378	0.4338	0.108	4.36	4.3783	0.4378	0.106	4.31	4.2973	0.4297
240	0.085	3.45	3.4459	0.3446	0.087	3.51	3.5270	0.3527	0.084	3.39	3.4054	0.3405
300	0.075	3.04	3.0405	0.3041	0.074	3.00	3.0000	0.3000	0.078	3.15	3.1621	0.3162
360	0.065	3.45	2.6351	0.2635	0.064	3.51	2.5946	0.2595	0.063	3.39	2.5540	0.2554

ตารางที่ จ-7 ปริมาณการดูดซับของสีข้อมมมาลาโคที่กรีนที่ถูกดูดซับ ณ ระยะเวลาต่างๆ

ครั้งที่	1					2					3				
	ตัวอย่าง (min)	น้ำหนัก (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>0</sub> -C <sub>e</sub> (mg/L)	q <sub>e</sub> (mg/g)	น้ำหนัก (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>0</sub> -C <sub>e</sub> (mg/L)	q <sub>e</sub> (mg/g)	น้ำหนัก (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	C <sub>0</sub> -C <sub>e</sub> (mg/L)
30	0.2001	98.5129	21.4458	77.0671	38.51	0.2000	98.3507	21.5269	76.8238	38.41	0.2000	98.5939	21.6485	76.9454	38.47
60	0.2000	97.7021	16.2972	81.4049	40.70	0.2000	97.7426	16.1350	81.6076	40.80	0.2000	97.8642	16.0945	81.7697	40.88
90	0.2000	96.0804	6.5270	89.5535	44.78	0.2000	95.9588	6.5675	89.3913	44.70	0.2000	96.0399	6.3648	89.6751	44.84
120	0.2000	93.7291	5.9594	87.7697	43.88	0.2000	94.0534	5.9189	88.1346	44.07	0.2000	93.9318	6.0000	87.9319	43.97
150	0.2000	94.8642	4.6216	90.2426	45.12	0.2000	95.1480	4.5811	90.5670	45.28	0.2000	94.9453	4.6216	90.3237	45.16
180	0.2000	95.0264	4.3378	90.6886	45.34	0.2000	94.9453	4.3783	90.5670	45.28	0.2000	94.9859	4.2973	90.6886	45.34
240	0.2001	90.6886	3.4459	87.2427	43.60	0.2000	90.7697	3.5270	87.2427	43.62	0.2000	90.9318	3.4054	87.5264	43.76
300	0.2001	95.3102	3.0405	92.2697	46.11	0.2000	95.4318	3.0000	92.4318	46.22	0.2000	95.4318	3.1621	92.2697	46.13
360	0.2001	94.3372	2.6351	91.7021	45.83	0.2000	94.6210	2.5946	92.0264	46.01	0.2000	94.3778	2.5540	91.8237	45.91

ตารางที่ จ-8 ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน ณ ระยะเวลาต่างๆ

ครั้งที่	1	2	3	ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
ตัวอย่าง (min)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)		
30	78.2	78.1	78.0	78.1	0.09
60	83.3	83.5	83.6	83.5	0.12
90	93.2	93.2	93.4	93.3	0.11
120	93.6	93.7	93.6	93.7	0.05
150	95.1	95.2	95.1	95.2	0.03
180	95.4	95.4	95.5	95.4	0.04
240	96.2	96.1	96.3	96.2	0.07
300	96.8	96.9	96.7	96.8	0.09
360	97.2	97.3	97.3	97.3	0.04



รูปที่ จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนกับระยะเวลาดูดซับ

จ-3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับ

ตารางที่ จ-9 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของชุดควบคุม ณ ความเข้มข้นต่างๆ

ครั้งที่	1				2				3			
ควบคุม (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)
10	0.238	9.64	9.6486	0.9649	0.239	9.69	9.6891	0.9689	0.243	9.84	9.8513	0.9851
20	0.472	19.13	19.1350	1.9135	0.470	19.05	19.0539	1.9054	0.473	19.16	19.1755	1.9176
30	0.737	29.88	29.8782	2.9878	0.736	29.82	29.8376	2.9838	0.731	29.62	29.6349	2.9635
40	0.977	39.60	39.6078	3.9608	0.979	39.70	39.6889	3.9689	0.978	39.65	39.6484	3.9648
50	1.221	49.51	49.4997	4.9500	1.222	49.52	49.5402	4.9540	1.220	49.46	49.4591	4.9459
60	1.478	59.93	59.9185	5.9919	1.479	59.96	59.9591	5.9959	1.480	59.99	59.9996	6.0000
70	2.215	89.81	89.7967	8.9797	2.216	89.84	89.8372	8.9837	2.213	89.72	89.7156	8.9716
80	1.714	69.50	69.4860	6.9486	1.718	69.66	69.6482	6.9648	1.717	69.59	69.6076	6.9608
90	1.963	79.58	79.5806	7.9581	1.969	79.83	79.8238	7.9824	1.964	79.63	79.6211	7.9621
100	2.332	94.52	94.5399	9.4540	2.326	94.30	94.2967	9.4297	2.333	94.60	94.5805	9.4580

ตารางที่ จ-10 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ ความเข้มข้นต่างๆ

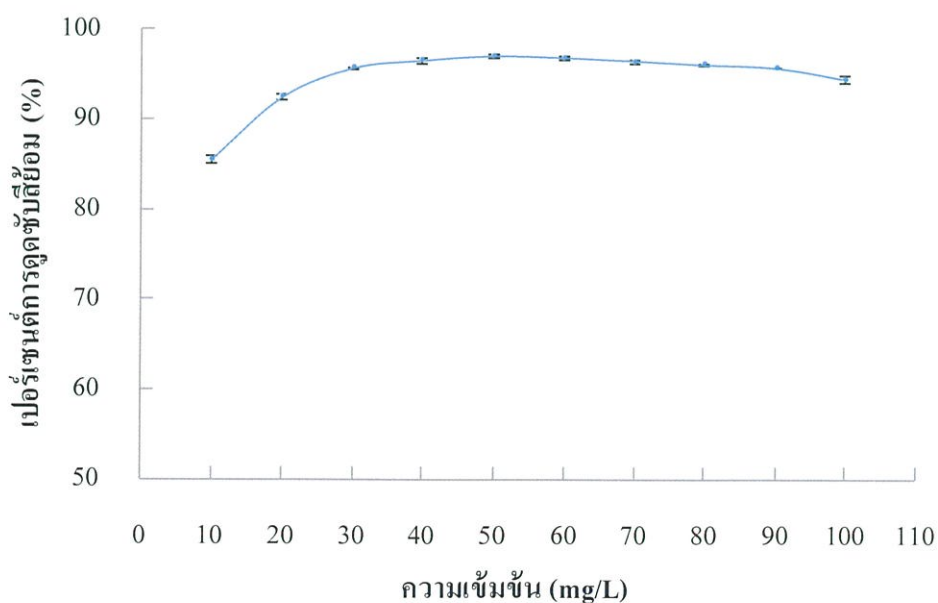
ครั้งที่	1				2				3			
ตัวอย่าง (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)
10	0.034	1.39	1.3784	0.1378	0.036	1.46	1.4594	0.1459	0.035	1.44	1.4189	0.1419
20	0.034	1.39	1.3784	0.1378	0.037	1.50	1.5000	0.1500	0.036	1.48	1.4594	0.1459
30	0.032	1.31	1.2973	0.1297	0.031	1.24	1.2567	0.1257	0.033	1.32	1.3378	0.1338
40	0.031	1.27	1.2567	0.1257	0.036	1.47	1.4594	0.1459	0.035	1.43	1.4189	0.1419
50	0.038	1.53	1.5405	0.1541	0.036	1.45	1.4594	0.1459	0.035	1.42	1.4189	0.1419
60	0.046	1.87	1.8649	0.1865	0.05	2.02	2.0270	0.2027	0.045	1.83	1.8243	0.1824
70	0.07	2.85	2.8378	0.2838	0.071	2.88	2.8784	0.2878	0.067	2.70	2.7162	0.2716
80	0.087	3.54	3.5270	0.3527	0.088	3.55	3.5675	0.3568	0.086	3.49	3.4865	0.3486
90	0.072	2.90	2.9189	0.2919	0.071	2.80	2.8784	0.2878	0.078	3.15	3.1621	0.3162
100	0.121	4.90	4.9054	0.4905	0.131	5.32	5.3108	0.5311	0.138	5.58	5.5946	0.5595

ตารางที่ จ-11 ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาโคทีกรีนที่ถูกดูดซับ ณ ระยะเวลาต่างๆ

ครั้งที่	1					2					3				
	ตัวอย่าง (mg/L)	น้ำหนัก (g)	$C_0$ (mg/L)	$C_c$ (mg/L)	$C_0-C_c$ (mg/L)	$q_c$ (mg/g)	น้ำหนัก (g)	$C_0$ (mg/L)	$C_c$ (mg/L)	$C_0-C_c$ (mg/L)	$q_c$ (mg/g)	น้ำหนัก (g)	$C_0$ (mg/L)	$C_c$ (mg/L)	$C_0-C_c$ (mg/L)
10	0.2001	9.6486	1.3784	8.2702	4.13	0.2001	9.6891	1.4594	8.2297	4.11	0.2000	9.8513	1.4189	8.4324	4.22
20	0.2000	19.1350	1.3784	17.7566	8.88	0.2001	19.0539	1.5000	17.5539	8.77	0.2000	19.1755	1.4594	17.7161	8.86
30	0.2000	29.8782	1.2973	28.5809	14.29	0.2000	29.8376	1.2567	28.5809	14.29	0.2000	29.6349	1.3378	28.2971	14.15
40	0.2000	39.6078	1.2567	38.3511	19.18	0.2000	39.6889	1.4594	38.2295	19.11	0.2000	39.6484	1.4189	38.2295	19.11
50	0.2000	49.4997	1.5405	47.9591	23.98	0.2000	49.5402	1.4594	48.0808	24.04	0.2000	49.4591	1.4189	48.0402	24.02
60	0.2001	59.9185	1.8649	58.0537	29.01	0.2000	59.9591	2.0270	57.9320	28.97	0.2000	59.9996	1.8243	58.1753	29.09
70	0.2001	79.5806	2.8378	76.7427	38.35	0.2000	79.8238	2.8784	76.9454	38.47	0.2000	79.6211	2.7162	76.9049	38.45
80	0.2000	89.7967	3.5270	86.2697	43.13	0.2000	89.8372	3.5675	86.2697	43.13	0.2000	89.7156	3.4865	86.2292	43.11
90	0.2001	69.4860	2.9189	66.5671	33.27	0.2001	69.6482	2.8784	66.7698	33.37	0.2000	69.6076	3.1621	66.4455	33.22
100	0.2001	94.5399	4.9054	89.6345	44.79	0.2000	94.2967	5.3108	88.9859	44.49	0.2000	94.5805	5.5946	88.9859	44.49

ตารางที่ จ-12 ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมมาลา โคท์กรีน ณ ความเข้มข้นต่างๆ

ครั้งที่	1	2	3	ประสิทธิภาพ การดูดซับ เฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตัวอย่าง (mg/L)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)		
10	85.7	84.9	85.6	85.4	0.42
20	92.8	92.1	92.4	92.4	0.34
30	95.7	95.8	95.5	95.6	0.15
40	96.8	96.3	96.4	96.5	0.27
50	96.9	97.1	97.1	97.0	0.12
60	96.9	96.6	97.0	96.8	0.18
70	96.4	96.4	96.6	96.5	0.10
80	96.1	96.0	96.1	96.1	0.04
90	95.8	95.9	95.5	95.7	0.22
100	94.8	94.4	94.1	94.4	0.37



รูปที่ จ-3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมมาลา โคท์กรีน กับความเข้มข้นของสารละลาย

จ-4 ผลการศึกษาปริมาณด้านกัมมันต์ที่เหมาะสม

ตารางที่ จ-13 ผลของปริมาณด้านกัมมันต์ต่อการดูดซับสีข้อมมาลาไลท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

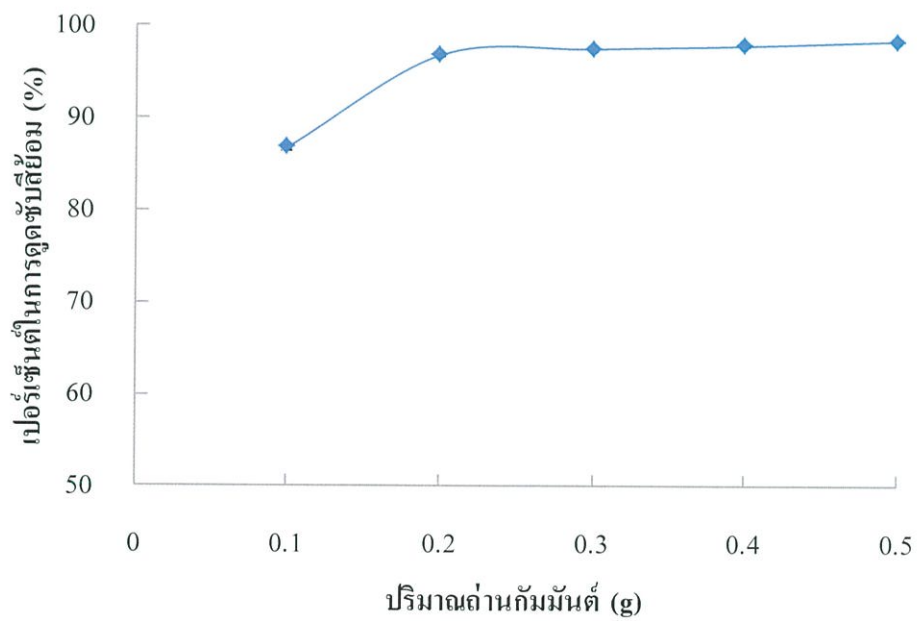
ครั้งที่	1				2				3			
ตัวอย่าง (g)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg)
ควบคุม	1.218	49.39	49.3781	4.9378	1.229	49.83	49.8240	4.9824	1.225	49.67	49.6618	4.9662
0.1	0.165	6.71	6.6891	0.6689	0.160	6.47	6.4864	0.6486	0.159	6.43	6.4459	0.6446
0.2	0.040	1.63	1.6216	0.1622	0.038	1.53	1.5405	0.1541	0.037	1.48	1.5000	0.1500
0.3	0.030	1.21	1.2162	0.1216	0.031	1.26	1.2567	0.1257	0.029	1.18	1.1757	0.1176
0.4	0.025	1.01	1.0135	0.1014	0.027	1.09	1.0946	0.1095	0.026	1.05	1.0540	0.1054
0.5	0.018	0.75	0.7297	0.0730	0.020	0.81	0.8108	0.0811	0.019	0.78	0.7703	0.0770

ตารางที่ จ-14 ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาโคทีกรีนที่ถูกดูดซับ ณ ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ

ครั้งที่	1					2					3				
ตัวอย่าง (g)	น้ำหนัก (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>c</sub> (mg/L)	C <sub>0</sub> -C <sub>c</sub> (mg/L)	q <sub>c</sub> (mg/g)	น้ำหนัก (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>c</sub> (mg/L)	C <sub>0</sub> -C <sub>c</sub> (mg/L)	q <sub>c</sub> (mg/g)	น้ำหนัก (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>c</sub> (mg/L)	C <sub>0</sub> -C <sub>c</sub> (mg/L)	q <sub>c</sub> (mg/g)
0.1	0.1000		6.6891	42.6889	42.69	0.1001		6.4864	43.3376	43.29	0.1001		6.4459	43.2159	43.17
0.2	0.2000		1.6216	47.7564	23.88	0.2001		1.5405	48.2835	24.13	0.2001		1.5000	48.1618	24.07
0.3	0.3000	49.3781	1.2162	48.1618	16.05	0.3001	49.8240	1.2567	48.5672	16.18	0.3001	49.6618	1.1757	48.7294	16.16
0.4	0.4000		1.0135	48.3645	12.09	0.4000		1.0946	48.4862	12.18	0.4000		1.0540	48.6078	12.15
0.5	0.5000		0.7297	48.6484	9.73	0.5000		0.8108	49.0132	9.80	0.5001		0.7703	48.8915	9.78

ตารางที่ จ-15 ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีน ณ ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ

ครั้งที่	1	2	3	ประสิทธิภาพ การดูดซับ เฉลี่ย (%)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)
ตัวอย่าง (g)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)	ประสิทธิภาพ การดูดซับ (%)		
0.1	86.5	87.0	87.0	86.8	0.32
0.2	96.7	96.9	97.0	96.9	0.14
0.3	97.5	97.5	97.5	97.5	0.08
0.4	97.9	97.8	97.9	97.9	0.07
0.5	98.5	98.4	98.4	98.5	0.07



รูปที่ จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนกับปริมาณถ่านกัมมันต์

## จ-5 การคำนวณผลการศึกษาสภาพที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

### จ-5.1 ความเข้มข้นที่คำนวณได้

จากรูปที่ ง-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมมาลาไคท์กรีนและค่าการดูดกลืนแสง

$$\text{จะได้} \quad y = 0.0246683x$$

เมื่อ  $y =$  ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

$x =$  ความเข้มข้นที่คำนวณได้

ตัวอย่างการคำนวณ; ที่ pH = 2 ครั้งที่ 1

$$0.706 = 0.0246683x$$

$$\text{จะได้} \quad x = 28.6214 \text{ mg/L}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้ที่ pH = 2 ครั้งที่ 1 เท่ากับ 28.6214 มิลลิกรัมต่อลิตร

### จ-5.2 จำนวนปริมาณการดูดซับ

$$q_c = \frac{[(C_0 - C_c) \times V]}{W} \quad (\text{จ.1})$$

เมื่อ  $q_c =$  ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (mg/g)

$C_0 =$  ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนก่อนการดูดซับ (mg/L)

$C_c =$  ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนหลังการดูดซับ (mg/L)

$V =$  ปริมาตรสารละลาย (L)

$W =$  น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ (g)

ตัวอย่างการคำนวณ; ที่ pH = 2 ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} q_c &= \frac{[(29.9593 - 28.6214) \times \frac{100}{1000}]}{0.2000} \\ &= 0.67 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาโคทีกรีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่  
 $\text{pH} = 2$  ครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.67 มิลลิกรัมต่อกรัม

### จ-5.3 กำหนดประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \frac{(C_0 - C_c)}{C_0} \times 100 \quad (\text{จ.2})$$

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายก่อนการดูดซับ (mg/L)

$C_c$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายหลังการดูดซับ (mg/L)

ตัวอย่างการคำนวณ; ที่  $\text{pH} = 2$  ครั้งที่ 1

เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg) ทั้งชุดควบคุมและตัวอย่าง

ควบคุม

ใน 1000 mL มี 29.9593 mg

ใน 100 mL มี  $\frac{100 \times 29.9593}{1000} = 2.9959$  mg

ตัวอย่าง

ใน 1000 mL มี 28.6214 mg

ใน 100 mL มี  $\frac{100 \times 28.6214}{1000} = 2.8621$  mg

ประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (\%)} &= \frac{2.9959 - 2.8621}{2.9959} \times 100 \\ &= 4.47\% \end{aligned}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับที่  $\text{pH} = 2$  ครั้งที่ 1 เท่ากับ 7.2013%

ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ย

$$\frac{0.67 + 0.65 + 0.67}{3} = 1.99\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ยที่  $\text{pH} = 2$  เท่ากับ 1.99%

จ-6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

จ-6.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน

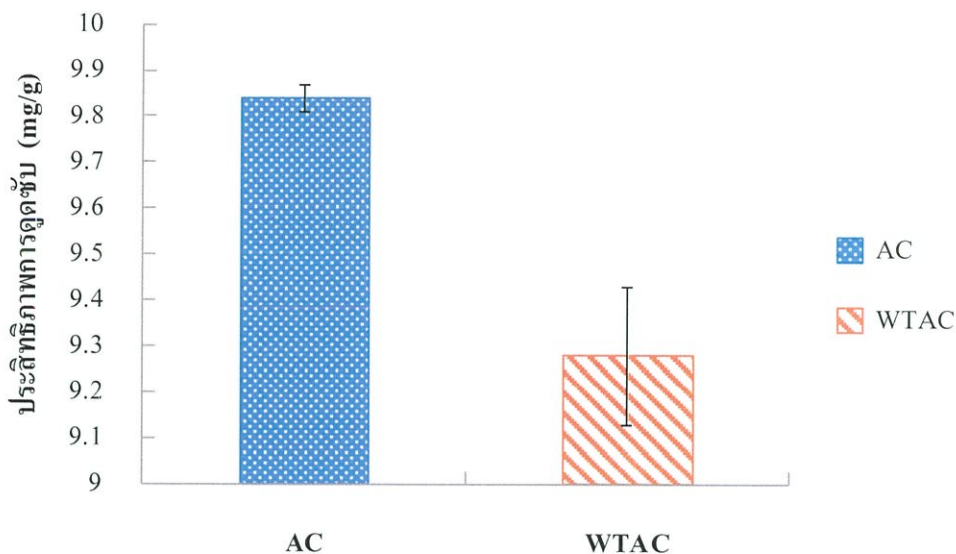
ตารางที่ จ-16 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า ณ ประสิทธิภาพการดูดซับที่เหมาะสม

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณได้ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100ml (mg)	ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	ปริมาณการดูดซับเฉลี่ย (mg/g)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%การดูดซับ	%การดูดซับเฉลี่ย
ควบคุม	1	0	1.22	49.46	49.4591	4.9459	9.84	9.84	0.03	99.5	99.4
AC		0.5	0.006	0.25	0.2432	0.0243					
ควบคุม	2	0	1.224	49.63	49.6213	4.9621	9.89			99.7	
AC		0.5	0.004	0.15	0.1622	0.0162					
ควบคุม	3	0	1.219	49.43	49.4186	4.9419	9.81			99.3	
AC		0.5001	0.008	0.31	0.3243	0.0324					
ควบคุม	4	0	1.223	49.59	49.5808	4.9581	9.83			99.1	
AC		0.5	0.011	0.43	0.4459	0.0446					
ควบคุม	5	0	1.221	49.51	49.4997	4.9499	9.82			99.2	
AC		0.5001	0.01	0.41	0.4054	0.0405					
ควบคุม	6	0	1.226	49.69	49.7024	4.9702	9.86			99.3	
AC		0.5002	0.009	0.36	0.3649	0.0365					

ตารางที่ จ-17 ผลค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ณ ประสิทธิภาพการดูดซับที่เหมาะสม

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณได้ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน100ml (mg)	ปริมาณการดูดซับ (mg/g)	ปริมาณการดูดซับเฉลี่ย (mg/g)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%การดูดซับ	%การดูดซับเฉลี่ย
ควบคุม	1	0	1.177	47.71	47.7159	4.7716	9.43	9.28	0.15	98.8	98.8
WTAC		0.5000	0.014	0.58	0.5676	0.0568					
ควบคุม	2	0	1.175	47.62	47.6348	4.7635	9.40			98.6	
WTAC		0.5000	0.016	0.65	0.6486	0.0649					
ควบคุม	3	0	1.180	47.83	47.8375	4.7838	9.41			98.4	
WTAC		0.5000	0.019	0.77	0.7703	0.0770					
ควบคุม	4	0	1.142	46.28	46.2970	4.6297	9.18			99.2	
WTAC		0.5002	0.009	0.35	0.3649	0.0365					
ควบคุม	5	0	1.141	46.27	46.2565	4.6256	9.10			98.4	
WTAC		0.5001	0.018	0.74	0.7297	0.0730					
ควบคุม	6	0	1.143	46.32	46.3375	4.6338	9.17			99.0	
WTAC		0.5002	0.011	0.46	0.4459	0.0446					

หมายเหตุ AC คือ ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและ WTAC คือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้



รูปที่ จ-5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากชา

จ-6.1.1 ความเข้มข้นที่คำนวณได้

จากรูปที่ จ-1 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมมาลาไคท์กรีนและค่าการดูดกลืนแสง

จะได้  $y = 0.02466683x$

เมื่อ  $y =$  ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

$x =$  ความเข้มข้นที่คำนวณได้

ตัวอย่างการคำนวณ; ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ครั้งที่ 1

$$1.177 = 0.02466683x$$

$$x = 47.716$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่คำนวณได้ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.2432

จ-6.1.2 จำนวนปริมาณการดูดซับ

ตั้งสมการ (จ.1) 
$$q_c = \frac{[(C_0 - C_c) \times V]}{W}$$

ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

$$q_e = \frac{[(47.7159 - 0.5676) \times \frac{100}{1000}]}{0.5000}$$

$$= 9.43 \text{ mg/g}$$

ดังนั้น ปริมาณการดูดซับของสีย้อมมาลาโคทีกรีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1 เท่ากับ 9.43 มิลลิกรัมต่อกรัม

### จ-6.1.3 จำนวนประสิทธิภาพการดูดซับ

ดังสมการ (จ.2)      ประสิทธิภาพการดูดซับ (%) =  $\frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$

ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

เทียบเนื้อสีใน 100 mL (mg) ทั้งชุดควบคุมและตัวอย่าง  
ควบคุม

ใน 1000 mL มี 47.7159 mg

ใน 100 mL มี  $\frac{100 \times 47.7159}{1000} = 4.7716 \text{ mg}$

ตัวอย่าง

ใน 1000mL มี 0.5676 mg

ใน 100 mL มี  $\frac{100 \times 0.5676}{1000} = 0.0568 \text{ mg}$

ประสิทธิภาพการดูดซับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (\%)} = \frac{4.7716 - 0.0568}{4.7716} \times 100$$

$$= 98.8105\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับครั้งที่ 1 เท่ากับ 98.82%

ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ย

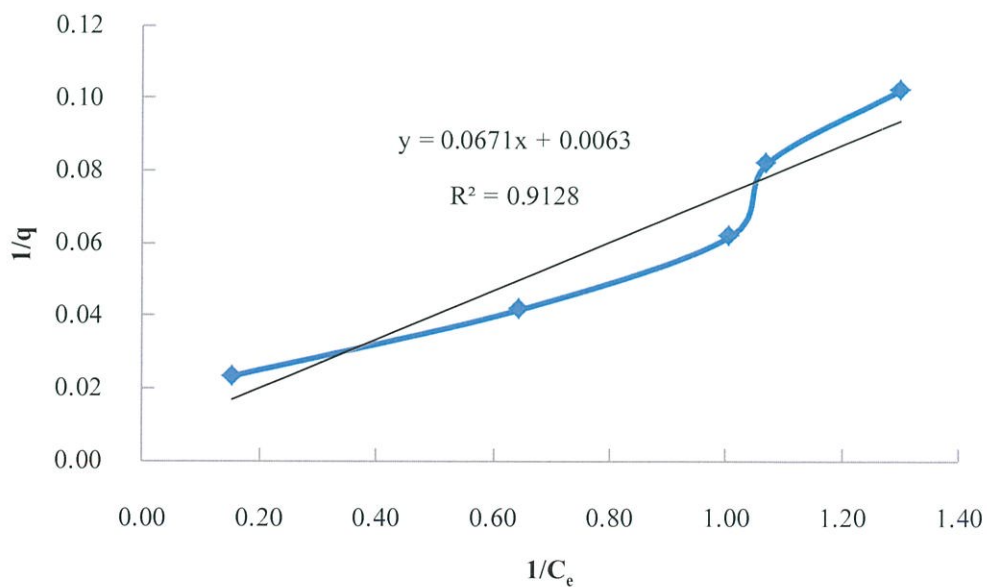
$$\frac{98.8105 + 98.6383 + 98.3898}{3} = 98.61\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 98.61%

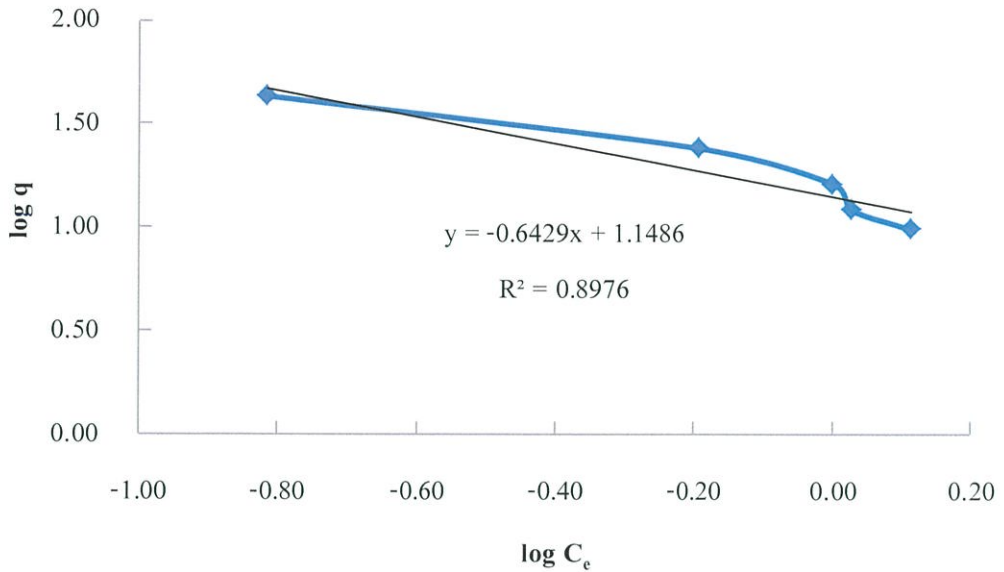
จ-6.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

ตารางที่ จ-18 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีข้อมมาลาไคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

W (g)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>c</sub> (mg/L)	C <sub>0</sub> -C <sub>c</sub> (mg/L)	q <sub>c</sub> (mg/g)	Langmuir Isotherm		Freundlich Isotherm	
					1/C <sub>c</sub>	1/q <sub>c</sub>	logC <sub>c</sub>	logq <sub>c</sub>
0.1001	49.6231	6.5405	43.0808	43.0521	0.1529	0.0232	-0.8156	1.6340
0.2001		1.5540	48.0672	24.0256	0.6442	0.0416	-0.1912	1.3807
0.3001		1.0000	48.6213	16.2035	1.0046	0.0617	0.0010	1.2096
0.4000		0.9459	48.6754	12.1688	1.0698	0.0822	0.0268	1.0852
0.5000		0.7703	48.8510	9.7696	1.3007	0.1024	0.1138	0.9899



รูปที่ จ-6 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm



รูปที่ จ-7 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm

#### จ-6.2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

$$q_c = \frac{X}{M} = \frac{Q_0 b C_c}{1 + b C_c} \quad (\text{จ.3})$$

เมื่อ  $q_c$  = ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (mg/g)

$Q_0$  = การดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (mg/g)

$C_c$  = ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนหลังการดูดซับ (mg/L)

$b = K_L$  = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (L/mg)

สามารถจัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรงดังสมการ (จ.4 หรือ จ.5)

$$\frac{C_c}{q_c} = \frac{1}{Q_0 K_L} + \frac{C_c}{Q_0} \quad (\text{จ.4})$$

หรือ

$$\frac{1}{q_c} = \frac{1}{K_L Q_0} \frac{1}{C_c} + \frac{1}{Q_0} \quad (\text{จ.5})$$

เมื่อนำข้อมูลในสมการ (จ.5) มาเขียนกราฟระหว่าง  $1/q_c$  และ  $1/C_c$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/K_L Q_0$  และจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ  $1/Q_0$

จากรูปที่ จ-5 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm

จะได้สมการเส้นตรง  $y = 0.0671x + 0.0063$

เนื่องจากค่าความชันเท่ากับ  $1/K_L Q_0$  ดังนั้น  $K_L = 0.0939 \text{ L/mg}$

จุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/Q_0$  ดังนั้น  $Q_0 = 158.73 \text{ mg/g}$

คำนวณหาปัจจัยการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ )

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (\text{จ.6})$$

$$\begin{aligned} \text{ปัจจัยการแยก} &= \frac{1}{1 + (0.0939 \times 49.6213)} \\ &= 0.1767 \end{aligned}$$

ดังนั้น ปัจจัยของการแยก เท่ากับ 0.1767

จ-6.2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm)

$$q_e = \frac{X}{M} = K_F C_e^{1/n} \quad (\text{จ.7})$$

เมื่อ  $K_F$  = ค่าคงที่ฟรอยด์ลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (L/g)

$n$  = ค่าคงที่ฟรอยด์ลิช แสดงถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

สามารถจัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรงดังสมการ (จ.8)

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (\text{จ.8})$$

เมื่อนำข้อมูลในสมการ (จ.8) มาเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกนในแนวตั้งเท่ากับ  $\log K_F$

จากรูปที่ จ-6 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm

จะได้สมการเส้นตรง  $y = -0.6429x + 1.1486$

เนื่องจากค่าความชันเท่ากับ  $1/n$  ดังนั้น  $1/n = 0.6429$  และ  $n = 1.5555$

จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_F$  ดังนั้น  $K_F = 14.08 \text{ L/g}$

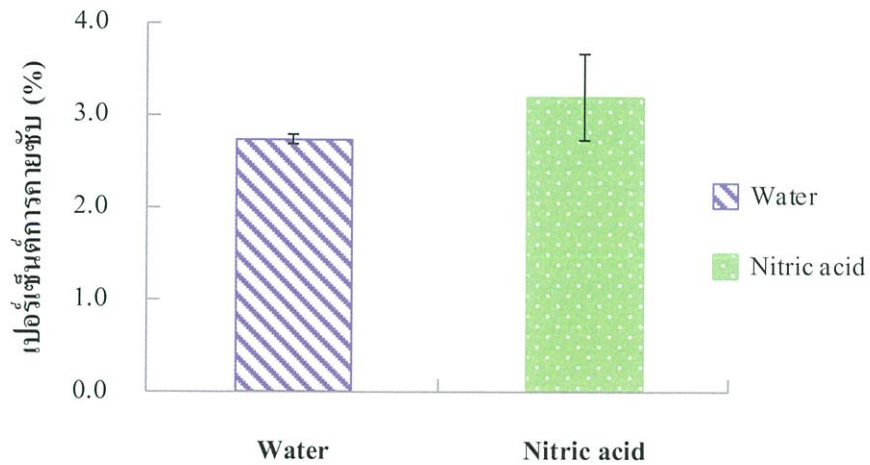
### จ-7 ผลการศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ)

ตารางที่ จ-19 ความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ) ด้วยน้ำกลั่น

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 ml (mg)	% Desorption
น้ำกลั่น	1	0.031	1.26	1.2567	0.1257	2.67
	2	0.032	1.29	1.2973	0.1297	2.76
	3	0.032	1.31	1.2973	0.1297	2.76
%Desorption เฉลี่ย						2.73
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)						0.05

ตารางที่ จ-20 ความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ) ด้วยกรดไนตริก

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (A)	ความเข้มข้นที่วัดได้ (mg/L)	ความเข้มข้นที่คำนวณ (mg/L)	เทียบเนื้อสีใน 100 ml (mg)	% Desorption
กรดไนตริก 0.1 M	1	0.030	1.20	1.2162	0.1216	2.65
	2	0.038	1.55	1.5405	0.1541	3.38
	3	0.040	1.63	1.6216	0.1622	3.53
%Desorption เฉลี่ย						3.19
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)						0.47



รูปที่ จ-8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคายซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนกับชนิดของสารละลาย

### จ-7.1 ความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาใช้ใหม่ (คายซับ)

#### จ-7.1.1 จำนวนประสิทธิภาพการคายซับ

$$\text{ประสิทธิภาพการคายซับ (\%)} = \frac{C_{dc}}{C_{ad}} \times 100 \quad (\text{จ.9})$$

เมื่อ  $C_{ad} = C_0 - C_c$

$C_{dc}$  = ความเข้มข้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีนที่คำนวณได้เมื่อเทียบเนื้อสีในปริมาตรสารละลาย (mg)

ตัวอย่างการคำนวณ; ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการคายซับ (\%)} &= \frac{0.1257}{4.7148} \times 100 \\ &= 2.67\% \end{aligned}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการคายซับครั้งที่ 1 เท่ากับ 2.67%

ประสิทธิภาพการคายซับด้วยน้ำกลั่นเฉลี่ย

$$\frac{2.6655 + 2.7610 + 2.7562}{3} = 2.73\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการคายซับด้วยน้ำกลั่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.73%

ภาคผนวก ฉ  
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ภาคผนวก ฉ  
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ฉ-1 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ แบบเป็นคู่

ตารางที่ ฉ-1.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH2 กับ pH3

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH2	3	4.4443	.06480	.03741
	pH3	3	9.8129	.06607	.03815

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	.004	.951	-100.480	4	.000	-5.36860	.05343	-5.51694	-5.22026
	Equal variances not assumed			-100.480	3.998	.000	-5.36860	.05343	-5.51697	-5.22023

ตารางที่ จ-1.2 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH3 กับ pH4

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH3	3	9.8129	.06607	.03815
	pH4	3	81.1371	.08228	.04751

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	.255	.640	-1170.653	4	.000	-71.32417	.06093	-71.49333	-71.15501
	Equal variances not assumed			-1170.653	3.822	.000	-71.32417	.06093	-71.49648	-71.15185

ตารางที่ ๑-1.3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH4 กับ pH5

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH4	3	81.1371	.08228	.04751
	pH5	3	97.7912	.06451	.03725

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	.333	.595	-275.881	4	.000	-16.65413	.06037	-16.82174	-16.48653
	Equal variances not assumed			-275.881	3.784	.000	-16.65413	.06037	-16.82557	-16.48270

ตารางที่ จ-1.4 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH5 กับ pH6

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH5	3	97.7912	.06451	.03725
	pH6	3	97.4565	.19997	.11545

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	4.103	.113	2.759	4	.051	.33470	.12131	-.00212	.67152
	Equal variances not assumed			2.759	2.412	.090	.33470	.12131	-.11051	.77991

ตารางที่ ๑-15 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH6 กับ pH7

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH6	3	97.4565	.19997	.11545
	pH7	3	97.3074	.15272	.08817

**Independent Samples Test**

	Levene's Test for Equality of Variances	t-test for Equality of Means								
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.335	.594	1.027	4	.363	.14913	.14527	-.25421	.55248
	Equal variances not assumed			1.027	3.741	.366	.14913	.14527	-.26547	.56374

ตารางที่ ๑-1.6 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH7 กับ pH8

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH7	3	97.3074	.15272	.08817
	pH8	3	97.3537	.08816	.05090

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	1.583	.277	-.455	4	.673	-.04630	.10181	-.32897	.23637
	Equal variances not assumed			-.455	3.200	.678	-.04630	.10181	-.35916	.26656

ตารางที่ ๑-1.7 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH8 กับ pH9

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH8	3	97.3537	.08816	.05090
	pH9	3	97.7356	.08420	.04861

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.017	.902	-5.426	4	.006	-.38190	.07038	-.57732	-.18648
	Equal variances not assumed			-5.426	3.992	.006	-.38190	.07038	-.57748	-.18632

ตารางที่ ๑-1.8 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างที่ pH9 กับ pH10

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	pH9	3	97.7356	.08420	.04861
	pH10	3	96.5780	.24521	.14157

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	6.115	.069	7.733	4	.002	1.15760	.14969	.74200	1.57320
	Equal variances not assumed			7.733	2.465	.009	1.15760	.14969	.61707	1.69813

ตารางที่ ๑-2 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ แบบเป็นคู่

ตารางที่ ๑-2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 30 นาที กับ 60 นาที

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	30mins	3	78.1285	.09491	.05480
	60mins	2	83.4369	.16603	.11740

	Levene's Test for Equality of Variances	t-test for Equality of Means								
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	2.122	.241	-47.175	3	.000	-5.30843	.11253	-5.66654	-4.95033
	Equal variances not assumed			-40.973	1.449	.003	-5.30843	.12956	-6.12770	-4.48917

ตารางที่ จ-2.2 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 60 นาที กับ 90 นาที

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	60mins	2	83.4369	.16603	.11740
	90mins	3	93.2451	.11337	.06545

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.940	.404	-80.630	3	.000	-9.80823	.12164	-10.19536	-9.42111
	Equal variances not assumed			-72.971	1.639	.001	-9.80823	.13441	-10.52749	-9.08897

ตารางที่ จ-2.3 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 90 นาที กับ 120 นาที

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	90mins	3	93.2451	.11337	.06545
	120mins	3	93.6537	.04835	.02791

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	3.004	.158	-5.742	4	.005	-.40860	.07116	-.60617	-.21103
	Equal variances not assumed			-5.742	2.704	.014	-.40860	.07116	-.64973	-.16747

ตารางที่ ๓-2.4 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 120 นาที กับ 150 นาที

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	120mins	3	93.6537	.04835	.02791
	150mins	3	95.1486	.03182	.01837

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.637	.469	-44.733	4	.000	-1.49490	.03342	-1.58768	-1.40212
	Equal variances not assumed			-44.733	3.459	.000	-1.49490	.03342	-1.59370	-1.39610

ตารางที่ จ-2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 150 นาที กับ 180 นาที

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	150mins	3	95.1486	.03182	.01837
	180mins	3	95.4332	.04368	.02522

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances	t-test for Equality of Means								
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.121	.745	-9.121	4	.001	-.28460	.03120	-.37123	-.19797
	Equal variances not assumed			-9.121	3.656	.001	-.28460	.03120	-.37454	-.19466

ตารางที่ จ-2.6 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 180 นาที กับ 240 นาที

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	180mins	3	95.4332	.04368	.02522
	240mins	3	96.1899	.07093	.04095

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.707	.448	-15.733	4	.000	-.75663	.04809	-.89016	-.62310
	Equal variances not assumed			-15.733	3.326	.000	-.75663	.04809	-.90153	-.61173

ตารางที่ ๓-2.7 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 240 นาที กับ 300 นาที

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	240mins	3	96.1899	.07093	.04095
	300mins	3	96.7843	.08780	.05069

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.257	.639	-9.121	4	.001	-.59440	.06517	-.77533	-.41347
	Equal variances not assumed			-9.121	3.831	.001	-.59440	.06517	-.77853	-.41027

ตารางที่ ๑-2.8 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระยะเวลา 300 นาที กับ 360 นาที

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	300mins	3	96.7843	.08780	.05069
	360mins	4	93.8127	6.88034	3.44017

**Independent Samples Test**

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	6.266	.054	.730	5	.498	2.97159	4.07069	-7.49244	13.43562
	Equal variances not assumed			.864	3.001	.451	2.97159	3.44054	-7.97507	13.91825

ตารางที่ ๓-3 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับ แบบเป็นคู่

ตารางที่ ๓-3.1 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 10 mg/L กับ 20 mg/L

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	10mg/L	3	85.4161	.41886	.24183
	20mg/L	3	92.4378	.33711	.19463

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	.381	.570	-22.620	4	.000	-7.02170	.31042	-7.88357	-6.15983
	Equal variances not assumed			-22.620	3.825	.000	-7.02170	.31042	-7.89933	-6.14407

ตารางที่ ๓-3.2 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 20 mg/L กับ 30 mg/L

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	20mg/L	3	92.4378	.33711	.19463
	30mg/L	3	95.6439	.15170	.08758

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	1.572	.278	-15.022	4	.000	-3.20613	.21343	-3.79870	-2.61357
	Equal variances not assumed			-15.022	2.778	.001	-3.20613	.21343	-3.91710	-2.49517

ตารางที่ ๓-3.3 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 30 mg/L กับ 40 mg/L

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	30mg/L	3	95.6439	.15170	.08758
	40mg/l	3	96.5237	.26724	.15429

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	1.710	.261	-4.959	4	.008	-.87980	.17742	-1.37239	-.38721
	Equal variances not assumed			-4.959	3.168	.014	-.87980	.17742	-1.42789	-.33171

ตารางที่ ๓-3.4 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 40 mg/L กับ 50 mg/L

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	40mg/l	3	96.5237	.26724	.15429
	50mg/L	3	97.0243	.12434	.07179

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	2.825	.168	-2.942	4	.042	-.50060	.17018	-.97308	-.02812
	Equal variances not assumed			-2.942	2.827	.065	-.50060	.17018	-1.06140	.06020

ตารางที่ ๓-3.5 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 50 mg/L กับ 60 mg/L

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	50mg/L	3	97.0243	.12434	.07179
	60mg/L	3	96.8222	.17932	.10353

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	.757	.433	1.604	4	.184	.20213	.12598	-.14765	.55192
	Equal variances not assumed			1.604	3.562	.193	.20213	.12598	-.16528	.56955

ตารางที่ ๓-3.6 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 60 mg/L กับ 70 mg/L

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	60mg/L	3	96.8222	.17932	.10353
	70mg/L	3	96.4722	.10273	.05931

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	1.598	.275	2.933	4	.043	.34993	.11932	.01866	.68121
	Equal variances not assumed			2.933	3.185	.057	.34993	.11932	-.01759	.71746

ตารางที่ ๓-3.7 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 70 mg/L กับ 80 mg/L

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	70mg/L	3	96.4722	.10273	.05931
	80mg/L	3	96.0717	.04250	.02454

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	3.417	.138	6.241	4	.003	.40057	.06419	.22235	.57878
	Equal variances not assumed			6.241	2.665	.012	.40057	.06419	.18098	.62016

ตารางที่ ๓-3.8 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 80 mg/L กับ 90 mg/L

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	80mg/L	3	96.0717	.04250	.02454
	90mg/L	3	95.7079	.21979	.12689

**Independent Samples Test**

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	8.259	.045	2.814	4	.048	.36373	.12925	.00489	.72258
	Equal variances not assumed			2.814	2.149	.098	.36373	.12925	-.15692	.88439

ตารางที่ ๓-3.9 เปรียบเทียบความแตกต่างที่ความเข้มข้น 90 mg/L กับ 100 mg/L

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	90mg/L	3	95.7079	.21979	.12689
	100mg/L	3	94.4214	.36613	.21139

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	.660	.462	5.218	4	.006	1.28653	.24655	.60200	1.97106
	Equal variances not assumed			5.218	3.276	.011	1.28653	.24655	.53798	2.03509

ตารางที่ ๓-4 วิเคราะห์ Independent-Samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างค่าปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับ แบบเป็นคู่

ตารางที่ ๓-4.1 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 0.1 g กับ 0.2 g

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	0.1g	3	86.8183	.31679	.18290
	0.2g	3	96.8679	.13638	.07874

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	4.122	.112	-50.468	4	.000	-10.04957	.19913	-10.60243	-9.49670
	Equal variances not assumed			-50.468	2.717	.000	-10.04957	.19913	-10.72235	-9.37678

ตารางที่ จ-4.2 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 0.2 g กับ 0.3 g

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	0.2g	3	96.8679	.13638	.07874
	0.3g	3	97.5491	.07826	.04518

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	1.335	.312	-7.504	4	.002	-.68120	.09078	-.93325	-.42915
	Equal variances not assumed			-7.504	3.188	.004	-.68120	.09078	-.96068	-.40172

ตารางที่ ๓-4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 0.3 g กับ 0.4 g

**Group Statistics**

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	0.3g	3	97.5491	.07826	.04518
	0.4g	3	97.8761	.07221	.04169

**Independent Samples Test**

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means							
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference		
								Lower	Upper	
%Adsorption	Equal variances assumed	.049	.836	-5.319	4	.006	-.32700	.06148	-.49770	-.15630
	Equal variances not assumed			-5.319	3.974	.006	-.32700	.06148	-.49813	-.15587

ตารางที่ ๑-4.4 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 0.4 g กับ 0.5 g

Group Statistics

	group	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
%Adsorption	0.4g	3	97.8761	.07221	.04169
	0.5g	3	98.4480	.07476	.04316

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances	t-test for Equality of Means								
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
%Adsorption	Equal variances assumed	.002	.966	-9.530	4	.001	-.57190	.06001	-.73851	-.40529
	Equal variances not assumed			-9.530	3.995	.001	-.57190	.06001	-.73859	-.40521

ภาคผนวก ช

ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าต่อระยะเวลาดูฉบับ

## ภาคผนวก ข

## ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าต่อระยะเวลาการคูดซับ

เครื่องเขย่า Orbital Shaker บริษัท Gallenkamp กำลังไฟฟ้า 150 วัตต์

$$\frac{\text{กำลังไฟฟ้า (วัตต์)} \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า}}{1000} \times \text{จำนวนชั่วโมงที่ใช้งานใน 1 วัน} = \text{จำนวนยูนิต}$$

$$\text{จำนวนยูนิต} \times \text{ค่า Ft 0.9255 บาท/ยูนิต} = \text{ค่าไฟฟ้า(บาท)}$$

ที่ระยะเวลาการคูดซับ 180 นาที (95.4%±0.04)

$$(150 \text{ วัตต์} \times 1 \text{ เครื่อง} / 1000) \times 3 \text{ h.} = 0.45 \text{ ยูนิต}$$

$$0.45 \text{ ยูนิต} \times 0.9255 \text{ บาท/ยูนิต} = 0.42 \text{ บาท}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การคูดซับ} \quad 95.4\% = 0.42 \text{ บาท}$$

$$1.00\% = 0.0044 \text{ บาท}$$

ที่ระยะเวลาการคูดซับ 240 นาที (96.2%±0.07)

$$(150 \text{ วัตต์} \times 1 \text{ เครื่อง} / 1000) \times 4 \text{ h.} = 0.60 \text{ ยูนิต}$$

$$0.60 \text{ ยูนิต} \times 0.9255 \text{ บาท/ยูนิต} = 0.56 \text{ บาท}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การคูดซับ} \quad 96.2\% = 0.56 \text{ บาท}$$

$$1.00\% = 0.0058 \text{ บาท}$$

ที่ระยะเวลาการคูดซับ 300 นาที (96.8%±0.09)

$$(150 \text{ วัตต์} \times 1 \text{ เครื่อง} / 1000) \times 5 \text{ h.} = 0.75 \text{ ยูนิต}$$

$$0.75 \text{ ยูนิต} \times 0.9255 \text{ บาท/ยูนิต} = 0.69 \text{ บาท}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การคูดซับ} \quad 96.8\% = 0.69 \text{ บาท}$$

$$1.00\% = 0.0071 \text{ บาท}$$

ที่ระยะเวลาการคูดซับ 360 นาที (97.3%±0.04)

$$(150 \text{ วัตต์} \times 1 \text{ เครื่อง} / 1000) \times 6 \text{ h.} = 0.90 \text{ ยูนิต}$$

$$0.90 \text{ ยูนิต} \times 0.9255 \text{ บาท/ยูนิต} = 0.83 \text{ บาท}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การคูดซับ} \quad 97.3\% = 0.83 \text{ บาท}$$

$$1.00\% = 0.0085 \text{ บาท}$$