



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากถุกหูกวาง  
เพื่อดูดซับโครเมียม (III) ในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่า COD

Development of Activated Carbon from the Seed of *Terminalia catappa*  
for Removal of Chromium (III) in COD Wastewater

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปัญญา มณีจักร์

สนับสนุนโดย

สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต

2555

ชื่อเรื่อง : การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออนในน้ำเสียจากการ  
วิเคราะห์ค่า COD

ผู้วิจัย : ผศ. ปัญญา มณีจักร์

สถาบัน : มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีที่พิมพ์ : 2555

สถานที่พิมพ์ : มหาวิทยาลัยรังสิต

แหล่งที่เก็บรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

จำนวนหน้า : 100 หน้า

: สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์, การดูดซับ, ไอโซเทอร์ม ลิขสิทธิ์ :

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง สำหรับใช้เป็นสารดูดซับสีโครเมียม (III) ไอออน โดยถ่านคาร์บอนไนซ์สามารถเตรียมได้จากการเผาลูกहुกวางที่อุณหภูมิต่างๆ (300 400 และ 500 องศาเซลเซียส) ในระยะเวลาต่าง ๆ กัน (1 2 และ 3 ชั่วโมง) จากนั้นกระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกัน พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านคาร์บอนไนซ์คือ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือใช้ถ่านคาร์บอนไนซ์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1 ต่อ 1 เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สถานะนี้ให้ค่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) สูงที่สุด จากนั้นศึกษากลไกการดูดซับโดยใช้แบบจำลองของ แลงเมียร์และฟรุนดลิชพบว่า ทั้งถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 เมื่อใช้แบบจำลองฟรุนดลิช แสดงว่าการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ของถ่านทั้งสองชนิดเป็นหลายชั้น และจากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออน พบว่าสอดคล้องกับ pseudo-second order การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD พบว่าถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง สามารถกำจัดโครเมียม (III) ไอออนต่อปริมาณถ่าน เท่ากับ 4.64 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งสูงกว่ากัมมันต์การค้า (Fluka 50120) ซึ่งกำจัดได้เพียง 0.61 มิลลิกรัมต่อกรัม

Title : Development of Activated Carbon from the Seed of *Terminalia catappa* for Removal of Chromium (III) ion in COD Wastewater

Researcher : Asst. Prof. Panya Maneechakr

Institution : Rangsit University

Year of Publication : 2012

Publisher : Rangsit University

Sources : Research Institute of Rangsit University

No. of page : 100 page

Keywords : Activated Carbon, Adsorption, Isotherms

Copyright :

## ABSTRACT

This research studied the preparation of carbonized and activated carbon from the seed of *Terminalia Catappa* as an adsorbent for the removal of chromium (III). The carbonized carbon was prepared by pyrolysis of *Terminalia Catappa* seed at difference temperature (300 400 and 500 °C) for variable time (1 2 and 3 hours). The obtained carbon was then activated by chemical activation using potassium hydroxide (KOH) as an activating agent with different ratio. The best condition to prepare carbonized carbon was 500 °C for 1 hour. To produce the activated carbon, one to one ratio of carbonized carbon to KOH was found to be the optimum condition under 400 °C for 3 hours. Using the Langmuir and Freundlich absorption models, it was found that both carbonized and activated carbon showed  $R^2$  approaching 1 when Freundlich model was applied. The adsorption kinetics was found to follow the pseudo-second-order kinetic model. In addition, adsorption of chromium (III) ion in COD waste water was examined. Similarly, the activated carbon sample got rid of chromium (III) ion from waste water of 4.64 mg/g. It showed that it and was higher than that of the commercially available activated carbon (Fluka 50120), which was only 0.61 mg/g.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ มีจุดประสงค์เพื่อหาวัตถุดิบราคาถูก และลดต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเลือกผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ด้วยถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณของลูกหูกวาง ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะให้น้อยลง

ในงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทัศนีย์ ปัญจานนท์ คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต ที่อนุวัติทุนวิจัย

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวเลิศ ที่ช่วยอ่านและแก้ไขต้นฉบับ รวมถึงให้ข้อเสนอแนะในด้านการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิตที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

นอกจากบุคคลดังกล่าวข้างต้นแล้ว ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในทุกด้านและเป็นกำลังใจในขณะที่ทำงานวิจัยนี้

ประ โยชน์ใด ๆ ที่เกิดจากงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดา มารดา และครู อาจารย์ทุกท่าน ผู้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปัญญา มณีจักร์

มีนาคม 2556

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายคำย่อและสัญลักษณ์	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ข้อยกเว้นของการวิจัย	4
1.6 ระเบียบวิธีวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.8 สถานที่ทำการทดลอง และ/หรือ เก็บข้อมูล	6
1.9 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ	6
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	7
2.1 คั้นหูกวาง	7
2.2 องค์ประกอบของลูกหูกวาง	8
2.3 การคาร์บอนไนซ์	11
2.4 การกระตุ่น	12
2.5 ถ่านกัมมันต์	15
2.6 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ชนิดของถ่านกัมมันต์	17
2.8 การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์	18
2.9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)	24
2.10 การดูดซับ (Adsorption)	19
2.11 จลนศาสตร์การดูดซับ	30
2.12 โลหะโครเมียม	33
2.13 ความเป็นพิษของโครเมียมและผลต่อสุขภาพ	34
2.14 การป้องกันและการรักษาภาวะพิษจากโครเมียม	35
2.15 การกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม	35
2.16 ค่าซีไอดี	38
2.17 การทบทวนวรรณกรรม	39
<b>บทที่ 3</b> ระเบียบวิธีวิจัย	47
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	47
3.2 การเตรียมสารเคมี	48
3.3 วิธีการทดลอง	48
<b>บทที่ 4</b> ผลงานวิจัย	55
4.1 ทาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอน	55
4.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวของถ่าน	57
4.3 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกหว้า	58
4.4 การศึกษาหาค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์หลังจากการกระตุ้น	59



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออน	60
4.6 ผลของความสัมพันธ์ในการดูดซับโครเมียม(III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ และ ถ่านกัมมันต์จากลูกหวาก กับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	62
4.7 ผลของความสัมพันธ์ในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์และ ถ่านกัมมันต์จากลูกหวากกับ ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช	64
4.8 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกหวาก โดยใช้แบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order	65
4.9 ผลของการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์จากลูกหวากและถ่านกัมมันต์การค้า	70
<b>บทที่ 5</b> สรุปอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	72
<b>บรรณานุกรม</b>	74
<b>ภาคผนวก</b>	76
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	88

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแผนงานวิจัย	6
2.1 แสดงสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการกระตุ้น	14
4.1 ตัวอย่างที่ได้จากไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหวาง	63
4.2 ตัวอย่างที่ได้จากไอโซเทอร์มฟรอนคลิซของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหวาง	65
4.3 แสดงตัวอย่างที่คำนวณได้จากสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order ของการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออน	69
ตาราง ผ. 1 แสดงความสามารถในการกำจัด โครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	76
ตาราง ผ. 2 แสดงความสามารถในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นและระยะเวลาในการเผากระตุ้นต่างๆ	77
ตาราง ผ. 3 แสดงความสามารถในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นและระยะเวลาในการเผากระตุ้นต่างๆ	78
ตาราง ผ. 4 แสดงความสามารถในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นและระยะเวลาในการเผากระตุ้นต่างๆ	79
ตาราง ผ. 5 แสดงความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 30 °C	80
ตาราง ผ. 6 แสดงค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ pH ต่าง ๆ	81
ตาราง ผ. 7 แสดงค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่ pH ต่าง ๆ	82



## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตาราง ผ. 8 แสดงตัวแปรต่างๆใน ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และพหุนคติชของถ่านคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ	83
ตาราง ผ. 9 แสดงตัวแปรต่างๆใน ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และพหุนคติชของถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิต่างๆ	83
ตาราง ผ. 10 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์ จากลูกกวางโดยใช้ pseudo-first order และ pseudo-second order	84
ตาราง ผ. 11 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านกัมมันต์ จากลูกหูกวางโดยใช้ pseudo-first order และ pseudo-second order	85
ตาราง ผ. 12 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์ จากลูกกวางโดยใช้ pseudo-first order และ pseudo-second order	86
ตาราง ผ. 13 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านกัมมันต์ จากลูกหูกวางโดยใช้ pseudo-first order และ pseudo-second order	86
ตาราง ผ. 14 แสดงความสามารถในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้ง จากการวิเคราะห์ค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางและถ่านกัมมันต์การค้า	87

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	7
2.2	8
2.3	9
2.4	10
2.5	12
2.6	19
2.7	20
2.8	26
2.10	28
2.11	29
2.12	30
2.13	31
2.14	32
3.1	49
3.2	49
3.3	49
3.4	49
3.6	50
4.1	56
4.2	57

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยอัตราส่วนต่างๆและเผากระตุ้นด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆ	58
4.4 แสดงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ที่ pH ต่าง ๆ	59
4.5 แสดงการค่าการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนระหว่างค่า $q_0$ และ $C_0$ ด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง	61
4.6 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์แสดงการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง	62
4.7 ไอโซเทอร์มฟรุนดลิชแสดงการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง	64
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q_0$ (mg/L) และเวลา(min)	66
4.9 แสดงกราฟ pseudo-first order การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกหูกวาง	67
4.10 แสดงกราฟ pseudo-second order การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์	68
4.11 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม(III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางและถ่านกัมมันต์การค้า	70

## คำอธิบาย คำย่อและสัญลักษณ์

ppm = part per million

g = gram

mg = milligram

L = Liter ( $\text{dm}^3$ )

mg /L = milligram per lite

DI water = deionized water

%W/V = percentage weight by volume

%W/W = percentage weight by weight



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการนำทรัพยากรต่างๆ มาใช้เป็นจำนวนมาก และก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลภาวะทางน้ำซึ่งนับวันปัญหาน้ำเน่าเสียจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นซึ่งจะเห็นได้จากปัญหาน้ำเสียในแม่น้ำ ลำคลอง แหล่งเกษตรกรรม หรือเขตนิคมอุตสาหกรรม โดยในน้ำเสียพบว่าโลหะหนักจัดเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ จึงไม่สามารถสลายตัวได้เองในกระบวนการทางธรรมชาติ ซึ่งโลหะหนักที่ถูกปล่อยออกมาส่วนใหญ่มักเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ขาดระบบการกำจัดโลหะหนักหรือประสิทธิภาพของระบบกำจัดที่ไม่ดีพอ ตัวอย่างของโลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ โครเมียม ตะกั่วปรอท แคดเมียม ทองแดง เป็นต้น ซึ่งการกำจัดโลหะหนักจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

โครเมียมที่ปล่อยมากับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมมีวิธีการบำบัด หลากหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและ กระบวนการดูดซับ โดยปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่าง ๆ คือสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและต้องลงทุนสูง ปัญหาของการตกตะกอนคือค่าสารเคมีที่ใช้ทำให้เกิดกากตะกอน และค่าการกำจัดกากตะกอน ปัญหาของกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นคือจะต้องใช้แรงดันสูง เพราะเกิดการอุดตันของโลหะที่ผิวเยื่อแผ่น และค่าสารเคมีที่ใช้ล้างทำความสะอาด ปัญหาของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน คือต้องใช้เรซินเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ในขณะที่การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่มีความเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก มีข้อดีคือไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงในน้ำเสีย ใช้เงินลงทุนน้อย ใช้เวลาในการบำบัดไม่นาน ใช้สถานที่ไม่มาก สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียมจากอุตสาหกรรม ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งปัจจุบันมีการทำการวิจัยศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้หลายชนิด

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำในปัจจุบันนิยมใช้ค่า COD (Chemical Oxygen Demand) เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำ โดยถ้ามีค่า COD มากแสดงว่าน้ำนั้นมีสารอินทรีย์เป็นจำนวนมาก จำเป็นจะต้องใช้ออกซิเจนในการบำบัดน้ำเป็นจำนวนมากด้วย ในการวิเคราะห์ค่า COD ในน้ำที่จะใช้

สารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate:  $K_2Cr_2O_7$ ) เป็นสารออกซิไดซ์ สารอินทรีย์ และจะทำปฏิกิริยาหมด โดยจะเปลี่ยนจาก โครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) ซึ่งในน้ำ ที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ COD จะมีปริมาณ โครเมียม (III) ไอออน อยู่ประมาณ 1000 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก และยังมีโลหะอื่นอีกในปริมาณไม่มากเช่น โลหะเงิน พรอท และเหล็กเป็นต้น โดยปกติห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำจะเก็บรวบรวมน้ำที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ COD แล้วนำส่งไปบำบัด โดยที่รับจ้างบำบัดของเสียอันตรายซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะบำบัดน้ำที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ COD เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการส่งไปบำบัดที่อื่น

โดยส่วนใหญ่เราจะพบว่าผู้คนนิยมปลูกต้นहुक्วางไว้ในบริเวณต่าง ๆ เป็นจำนวนมากเพื่ออาศัยร่มเงาจากใบที่แพร่กระจายออกเป็นวงกว้าง แต่เมื่อเวลาต้นहुक्วางออกผล ผลจะตกลงมาบนพื้น ทำให้บริเวณไม่น่ามอง เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม แนวคิดในการนำลูกहुक्วางมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ คือลูกहुक्วางจะผลิตผลออกทั้งปี และผลที่เกิดขึ้นมีประโยชน์ในด้านต่าง ๆ น้อยมาก ผู้คนจึงไม่สนใจ ไม่ปล่อยทิ้งไว้ก็ต้องเก็บกวาดไปทิ้ง ดังนั้นถ้าเก็บรวบรวมมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ก็จะเกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น อีกประเด็นหนึ่งคือการผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องใช้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ถ้าจะต้องตัดต้นไม้มาทำถ่านกัมมันต์จึงไม่น่าจะคุ้มเท่าไร ดังนั้นถ้าเลือกผลิตถ่านกัมมันต์จาก ผลผลิตที่ไม่เป็นประโยชน์ของต้น ไม่น่าจะเป็นทางออกที่ดี ต้นไม้ก็ยังคงให้ร่มเงาและช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วยลดปรากฏการณ์โลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งจากการวิจัยในเบื้องต้นพบว่า ลูกहुक्วางมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนคงตัวร้อยละ 20 ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดที่จะนำเอาลูกहुक्วางมาทำให้เกิดประโยชน์ เพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจโดยการนำเอามาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกहुक्วางเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสีย จากการวิเคราะห์ค่า COD นี้ จะทำการพัฒนาการผลิตถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมกับการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน โดยจะเลือกอุณหภูมิและเวลาในการเผาให้เหมาะสมกับการดูดซับ และจะนำถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ผลิตได้มากระตุ้นด้วยโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide :KOH) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวล และเลือกอัตราส่วนของการผสมของกรดกับถ่านอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน จากนั้นจะศึกษาความเป็นกรดต่าง ในการดูดซับโลหะหนักโครเมียม (III) ไอออน ศึกษาห่มู่ฟังก์ชันัลบนพื้นที่ผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกहुक्วางที่ผลิตได้ทุกสถานะ ศึกษาว่าเป็นกลไกการดูดซับแบบแลงเมียร์หรือฟรุนดลิช ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์จากลูกहुक्วางว่าเป็นแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรืออันดับสอง และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำที่จากการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยถ่านกระตุ้นและถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกहुक्วาง



## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางให้ดูดซับโครเมียม (III) ไอออน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ของถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง
3. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเผา และความเป็นกรดต่าง ในการดูดซับโลหะหนักโครเมียม (III) ไอออน ด้วยถ่านกัมมันต์
4. เพื่อศึกษากลไกการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ด้วยถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง
5. เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ด้วยถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง
6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยถ่านกระตุ้นและถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกहुกวาง

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

การเตรียมถ่านคาร์บอนไนซ์ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงและอ็อกซิเจนจะทำให้ อะตอมของคาร์บอนจับเรียงตัวแบบโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเมื่อนำไปดูดซับสารมีขั้วหรือพวกไอออน จะดูดซับได้ไม่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาอุณหภูมิและเวลาในการผลิตถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารมีขั้วหรือพวกไอออน โดยจะเทียบกับถ่านกัมมันต์การค้าที่ผลิตด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงและอ็อกซิเจน ดังนั้นสมมติฐานการวิจัยนี้คือ ถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านได้จะสามารถดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์การค้า

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตวิจัยที่ขอทุนวิจัยครั้งนี้

1. วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับโครเมียม คือ ลูกहुกวาง บริเวณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
2. ศึกษาอุณหภูมิ ( 300 – 500 °C) และระยะเวลา ( 60 – 180 นาที) ที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ถ่านจากลูกहुกวางโดยใช้การดูดซับโครเมียม (III) ไอออน เปรียบเทียบหาการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ที่ดีที่สุด ของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ผลิตได้
3. ผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางโดยการกระตุ้นด้วยโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออน
  - 3.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างถ่านต่อ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก

3.2 ศึกษาอุณหภูมิ (300 – 500 °C) และระยะเวลา (60 – 180 นาที) ที่เหมาะสมในการกระตุ้น

4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR ที่ผลิตได้ทุกสภาวะ

5. ศึกษาการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์

5.1 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์

5.2 ศึกษาค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์

5.3 ศึกษาว่าเป็นกลไกการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนหรือฟิสิกส์

6. ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรืออันดับสอง

7. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยถ่านกระตุ้นและถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกहुกวาง

## 1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. เตาเผาที่ใช้ในการเผาลูกहुกวางให้เป็นถ่านคาร์บอนไนซ์ เป็นเตาเผาแบบ ไม่อับอากาศ จึงไม่สามารถป้องกันก๊าซออกซิเจนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ อุณหภูมิที่ใช้จึงไม่สามารถปรับให้สูงกว่า 550 °C

2. ภาชนะที่ใช้ในการเผาเป็นภาชนะโลหะมีฝาปิดสนิท เพื่อกันก๊าซออกซิเจน

3. การเผากระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์ให้เป็นถ่านกัมมันต์จะเลือกใช้ไปเตสซีเอ็มไฮดรอกไซด์ แทนการใช้กรดซัลฟูริก เนื่องจากเมื่อเผากระตุ้นกรดซัลฟูริกให้เกิดไอกรดซึ่งเป็นอันตรายมาก

## 1.6 ระเบียบวิธีวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลของถ่านกัมมันต์
2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในเผาถ่านหุขวางให้เป็นถ่านเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์
3. ผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหุขวางเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาหาอัตราส่วนและสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอน และถ่านกัมมันต์จากถ่านหุขวาง ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR
5. ศึกษาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์หลังจากกระตุ้น
6. การศึกษากลไกการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ของถ่านกัมมันต์ ว่าเป็นแบบแลกเปลี่ยนหรือฟิสิกส์
7. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ของถ่านกัมมันต์
8. นำถ่านกัมมันต์จากถ่านหุขวางไปดูดซับโครเมียมในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD
9. สรุปผลการทดลอง
10. จัดทำรายงานผลการวิจัย

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหุขวางเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออน
2. ทราบประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากถ่านหุขวาง
3. ทราบกลไกการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ด้วยถ่านกัมมันต์จากถ่านหุขวาง
4. ช่วยลดปริมาณของถ่านหุขวาง ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะให้น้อยลง
5. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ สำหรับบำบัดโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ต่อไป

### 1.8 สถานที่ทำการทดลอง และ/หรือ เก็บข้อมูล

สถานที่ทำการทดลอง ห้องทดลอง 4/1 -302 อาคารปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

เก็บข้อมูล เก็บลูกหนูวางบริเวณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

### 1.9 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

#### ตารางที่ 1.1 ตารางแผนงานวิจัย

การดำเนินงาน	ช่วงที่ 1			ช่วงที่ 2		
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. รวบรวมข้อมูลของถ่านกัมมันต์						
2. ผลิตถ่านกัมมันต์						
3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในเผาให้เป็นถ่าน						
4. การศึกษาหาอัตราส่วนและ สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ด้วย โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์						
5. ศึกษาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับของ ถ่าน กัมมันต์หลังจากกระตุ้น						
6. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นที่ผิวของถ่านคาร์บอน						
7. ศึกษาว่าเป็นกลไกการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนหรือฟิสิกส์						
8. ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์จากลูกหนู กวาง						
9. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ใน น้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD						
10.สรุปผลการทดลองและจัดทำ รายงานผลการวิจัย						

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ต้นหูกวาง



ภาพที่ 2.1 ต้นหูกวางและลูกหูกวาง

ชื่อวิทยาศาสตร์	: <i>Terminalia catappa</i>
วงศ์	: COMBRETACEAE
ชื่อสามัญ	: Tropical Almond , Olive - bark Tree
ชื่อพื้นเมือง	: โคน (นราธิวาส), คัดมือ ตัดมือ (ตรัง), ตาปิง (พิจิตร, โลก, สตูล), ตาแป๊ะ (มลายู-นราธิวาส), หลุมปึง (สุราษฎร์ธานี), หูกวาง (ภาคกลาง)
ลักษณะทางพฤกษศาสตร์	
ต้น	: ขนาดกลาง ผลัดใบ สูง 15 – 20 เมตร เรือนยอดค่อนข้างกลม
เปลือก	: สีเทาเรียบ แตกกิ่งตามแนวนอนเป็นชั้น ๆ
ใบ	: ใบเดี่ยว เรียงเวียนสลับถี่ที่ปลายกิ่ง แผ่นใบรูปไข่กลับ กว้าง 8 - 15 เซนติเมตร ยาว 12- 25 เซนติเมตร ปลายใบเป็นติ่งแหลมอ่อน โคนใบแคบ เว้า และมีต่อม 1 คู่ แผ่นใบหนา มีขนนุ่ม ขอบใบเรียบ
ดอก	: ดอกเล็ก สีขาวนวล ออกเป็นช่อ ตามง่ามใบบริเวณปลายกิ่ง
ผล	: รูปไข่หรือรีป้อมและแบนเล็กน้อย กว้าง 2 - 5 เซนติเมตร ยาว 3 - 7 เซนติเมตร สีเขียว เมื่อแก่จะแห้งเป็นสีดำคล้ำ



การขยายพันธุ์	: โดยเมล็ด
นิเวศวิทยา	: ขึ้นตามหาดทราย หาดหิน และขึ้นได้ทั่วไป ออกดอก กุมภาพันธ์ - เมษายน และ สิงหาคม - ตุลาคม
ประโยชน์	: เปลือกและผลมีรสฝาดมาก ใช้แก้ท้องเสีย ย้อมหนังสือ ทำหมึก เมล็ดในผลรับประทานได้ ให้น้ำมัน คล้ายน้ำมันอัลมอนด์

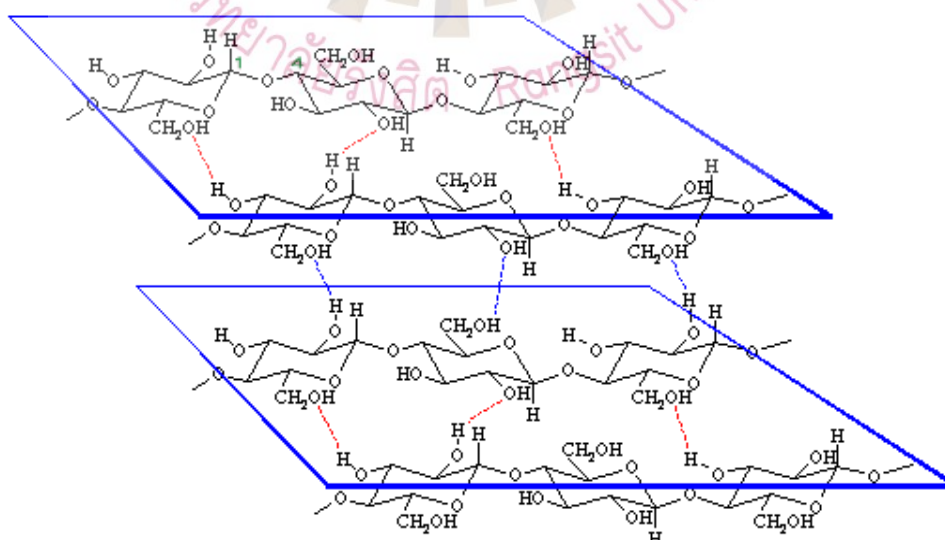
## 2.2 องค์ประกอบของลูกหวาง

### 1. สารที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์

เป็นสารประเภทพอลิแซคคาไรด์ หลายๆชนิดรวมกัน ประกอบด้วยเพกตินที่อยู่ในรูป แคลเซียมเพกเตต และแมกนีเซียมเพกเตต อยู่ตรงกลางระหว่างผนังเซลล์ชั้นแรกของเซลล์ 2 เซลล์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสอยู่ที่ผนังเซลล์ชั้นแรก (Primary cell wall) ด้านนอกสุดของเซลล์ ลิกนิน ซูเบอร์ิน คิวติน ทำให้น้ำไม่สามารถผ่านผนังเซลล์ชั้นนี้ได้ อยู่ที่ผนังเซลล์ชั้นที่ 2 (Secondary cell wall) เป็นผนังชั้นในสุด สร้างขึ้นหลังจากที่เซลล์หยุดขยายตัว

#### ก. โครงสร้างของเซลลูโลส

โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคสเช่นเดียวกับแป้งและเป็นชนิดสายตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา แต่พันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลของเซลลูโลสจะเป็นชนิดเบต้า จึงทำให้กลูโคสที่ต่อกันอยู่ในสายของเซลลูโลสยึดตัวออกในแนวเส้นตรงได้ แต่ละสายของเซลลูโลสมีกลูโคสเชื่อมต่อกันอยู่ ประมาณ 2,000 ถึง 10,000 หน่วย ดังภาพที่ 2.2

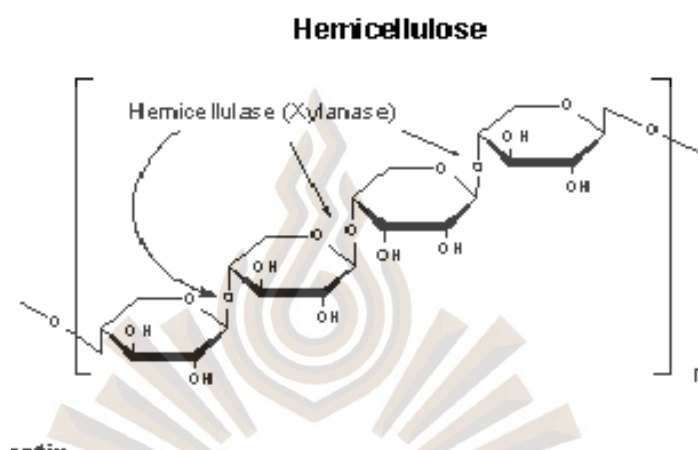


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส [1]



### ข. โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสเป็นประเภทพอลิแซคคาไรด์เหมือนกับเซลลูโลสแต่มีจำนวนคาร์บอนเฉลี่ยในโมเลกุลน้อยกว่า ประกอบด้วย น้ำตาล 5 ชนิด คือ เฮกโซส ประกอบด้วย กลูโคส แมนโนส กาแลคโทส และเพนโทส ประกอบด้วย ไซโลส และอะราบิโนส ดังภาพที่ 2.3



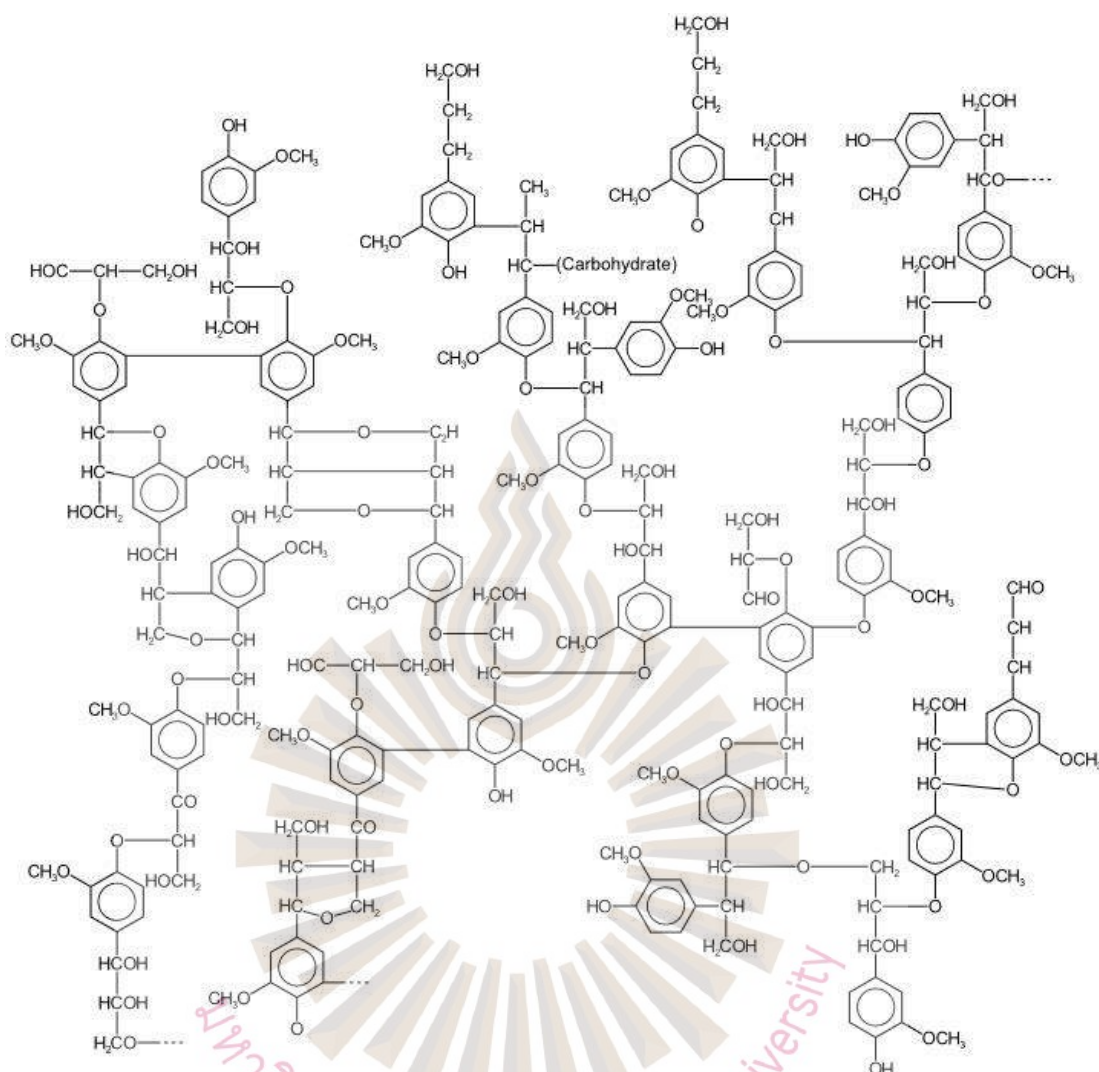
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [2]

### ข. โครงสร้างของลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไม่มีรูปผลึก จะเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใย (middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน และมีบางส่วนผสมอยู่ในเส้นใยด้วย โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ phenylpropane หรือสารประกอบ hydrocarbon ที่มี carbon 9 อะตอม ประมาณร้อยละ 65-67 ปัจจุบันยังไม่สามารถแยกลิกนินบริสุทธิ์ออกมาได้ ดังนั้น การศึกษาถึงโครงสร้างของลิกนินจึงยังไม่ชัดเจนแต่ อาจวิเคราะห์ได้เป็น  $C_9H_{8.83}O_{2.37}(OCH_3)_{0.96}$  โดยมี น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 3,000–30,000 ดังภาพที่ 2.4

ลิกนิน เป็นส่วนสำคัญในการดำเนินการของน้ำในลำต้นพืช ส่วนประกอบของ พอลิแซคคาไรด์ของผนังเซลล์พืชเป็นส่วนใหญ่ที่ชอบน้ำมาก และทำให้การซึมผ่านลงไปใต้น้ำ ในขณะที่ลิกนินเป็นส่วนที่ไม่ชอบ โดยลิกนินจะขัดขวางการดูดซึมน้ำที่ผนังเซลล์ ดังนั้นลิกนินทำหน้าที่ในการลำเลียงน้ำ และยังมีบทบาทสำคัญในวงจรคาร์บอน เนื่องจากลิกนินเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ย่อยสลายช้าที่สุดของพืชที่ตายแล้ว ซึ่งเมื่อสลายตัวจะกลายเป็นฮิวมัส

ลิกนิน สามารถละลายได้ในสารละลายเบส เช่นสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน [3]

ค. ซูเบอร์ิน คิวติน และแพคติน

สารเหล่านี้เป็นสารเคลือบอยู่ภายนอกเซลล์ ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ และป้องกันการซึมผ่านของสารบางชนิด

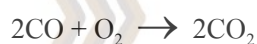
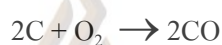
## 2. สารที่ไม่ใช่องค์ประกอบของผนังเซลล์

อาจเรียกว่าสารแทรก เป็นกรดหรือเป็นกลางก็ได้ มีตั้งแต่ สารไอโซพรีน เทอร์พีน สเตโรไรโซคลิก กรดเรซิน สารโพลีฟีนอลต่างๆ และอัลคาลอยด์ เป็นต้น และเป็นสารประกอบที่เป็นคุณสมบัติของพันธุ์ไม้แต่ละชนิด สารประกอบเหล่านี้ จะทำให้พืชแต่ละชนิดมีสี กลิ่น รส และความแข็งแรงที่แตกต่าง กันออกไป สารพวกนี้มีประมาณร้อยละ 5-30 โดยมวล ซึ่งรวมไปถึง สารส่วน

น้อย (minor constituent) เป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดเอ้า อันได้แก่ สารประกอบแคลเซียม โปแทสเซียม ฟอสเฟต และซิลิกา เป็นต้น สารพวกนี้มีประมาณร้อยละ 0.1-3 โดยมวล

### 2.3 การคาร์บอนไนซ์ [4]

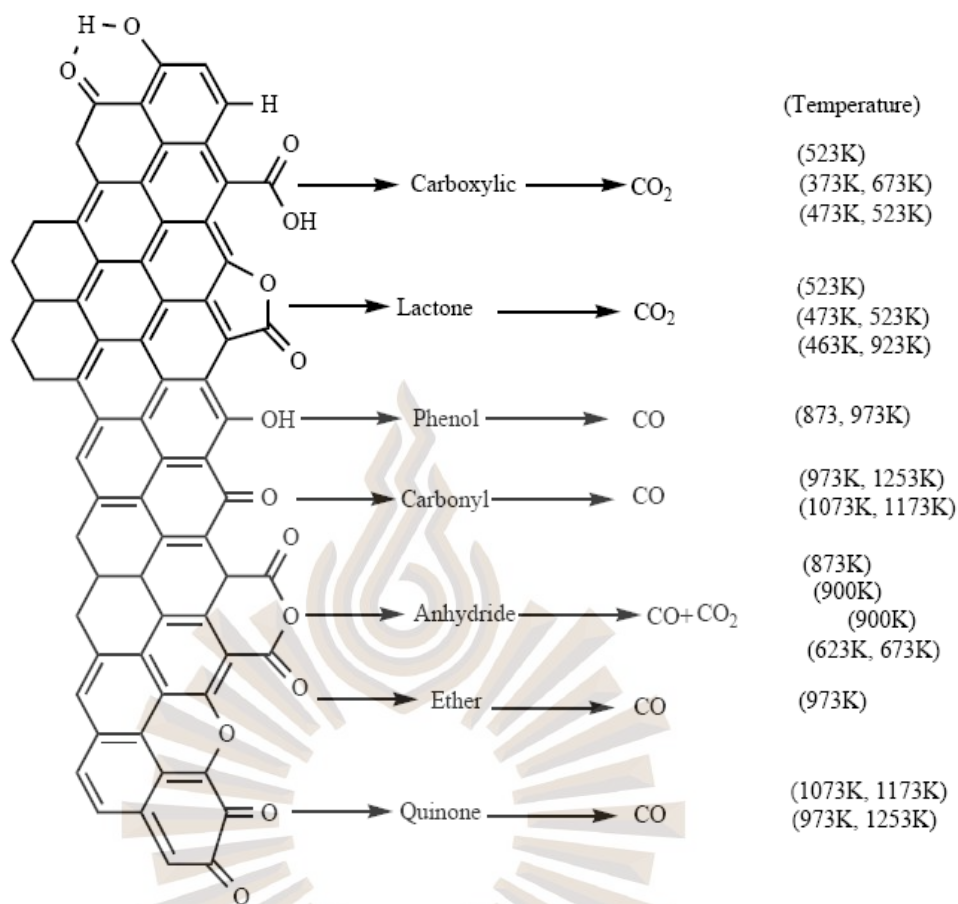
การคาร์บอนไนซ์ คือ การทำให้เกิดเป็นคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์หลักโดยการให้ความร้อนแก่ไม้ที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียสในสถานะที่มีแก๊สออกซิเจนต่ำหรือไม่มีเลย หรือก็คือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เพื่อให้ได้เป็นคาร์บอนในปริมาณมากๆ ดังสมการการเผาไหม้



เมื่อเกิดปฏิกิริยาในสถานะที่มีแก๊สออกซิเจน จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์และเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อลดแก๊สออกซิเจนจะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และได้คาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ ทั้งยังเป็นการไถ่ร่างกายในโมเลกุลของสาร และสลายพันธะบางพันธะด้วย

การที่เซลล์ลูโลสเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการสลายพันธะออกและเกิดเป็นวงแหวนอะโรมาติกมากขึ้นด้วย ดังภาพที่ 2.5





ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของถ่าน [5]

#### 2.4 การกระตุ้น [4]

การกระตุ้น (activation) คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยน โครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active centers)

## 1. การกระตุ้นทางกายภาพ

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ฯลฯ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิมตัวยิ่งยวด (steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) แก๊สออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และอากาศ (air) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือ

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี (700–1200 องศาเซลเซียส)

## 2. การกระตุ้นทางเคมี

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นมีข้อดีคือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นแสดงในตาราง สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 แสดงสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการกระตุ้น

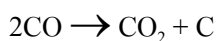
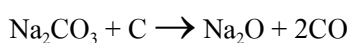
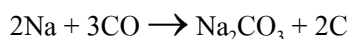
ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดบอริก ( $H_3BO_3$ )	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ )
กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ )	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaCl <sub>2</sub> )	ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl <sub>2</sub> )
กรดไนตริก ( $HNO_3$ )	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	โพแทสเซียมซัลไฟด์ ( $K_2S$ )
กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ )		โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (KSCN) แคลเซียมฟอสเฟต ( $Ca_3(PO_4)_2$ ) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl <sub>2</sub> )

ก. การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ )

กรดฟอสฟอริกเป็นสารที่มีความสามารถในการทำละลายสูง ทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุได้เป็นอย่างดี จากการศึกษาของนักวิจัยหลาย กลุ่ม พบว่าการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลนั้นทำให้โครงสร้างของเซลล์โลสเกิดความเสถียร และองค์ประกอบของฟอสเฟตยังทำให้โครงสร้างของเซลล์โลสเกิดการขยายตัว ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างหลังจากการให้ความร้อน

ข. การกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

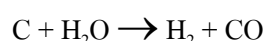
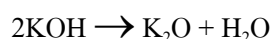
เมื่อนำเอาวัสดุดิบที่ต้องการที่เป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ ปฏิกิริยาที่เกิดในการกระตุ้นด้วยสารประกอบของโซเดียม มีดังนี้



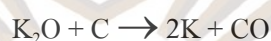


### ก. การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์มาผสมกับสารละลายที่มีไอออนของโพแทสเซียมไอออนของธาตุดังกล่าวจะแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในวัตถุดิบ กลไกของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวสูง แสดงดังนี้



สมการการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และน้ำ ซึ่งเป็นสารทำให้คาร์บอนในถ่านเกิดปฏิกิริยาสลายตัวกลายเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนหรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ดังสมการ



ที่อุณหภูมิสูงโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวจึงทำให้แทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น

## 2.5 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอกทีเวตเตดคาร์บอน (Activated carbon) เป็นการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้มีสมบัติในการดูดซับสูงเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก โดยกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ เพื่อทำให้เกิดรูพรุนขนาดนาโนเมตรจำนวนมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายในผนังรูพรุน ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ขึ้น ลักษณะโดยทั่วไปเป็นของแข็งสีดำ มีทั้งที่เป็นเม็ดและเป็นผง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสประมาณ 400–2000 ตารางเมตรต่อกรัม และรูพรุน (porous) ของถ่านกัมมันต์มีขนาดอยู่ระหว่าง 20–20000 อังสตรอม วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์มีมากมาย เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน กระจุก แกลบ ขี้เลื่อย ช้างข้าวโพด เปลือกของผลไม้บางชนิด รวมทั้งของเหลือทิ้งจากการเกษตรกรรม เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบต่างชนิดกันจะมีคุณภาพแตกต่างกัน

## 2.6 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่ผ่านมาพบว่า ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์แต่ไม่สมบูรณ์เท่าแกรไฟต์ โดยโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะเกิดเมื่อชั้นแกรไฟต์ถูกเผาไหม้ไปอย่างสมบูรณ์ขณะการกระตุ้น (Activation) แล้วมีอิเล็กตรอนอิสระที่เกาะอยู่กับพันธะระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนและอะตอมของออกซิเจน ซึ่งนับว่ามีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โครงสร้างของแกรไฟต์มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้น (layered structure) เรียงตัวซ้อนกันประมาณ 3 - 30 ชั้นต่อความหนา 10 - 100 อังสตรอม ซึ่งชั้นของแกรไฟต์จะเรียงตัวกันอย่างไม่สมบูรณ์ทำมุมไม่แน่นอน และแต่ละชั้นซ้อนกันไม่เป็นระเบียบระยะห่างแต่ละชั้นประมาณ 3.6 อังสตรอม ซึ่งมากกว่าแกรไฟต์ ในแต่ละชั้นของคาร์บอน ยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ชนิด เอสพี<sup>2</sup> (sp<sup>2</sup>) ในรูปวงแหวนคล้ายกับสารประกอบอะโรมาติกระหว่างอะตอมของคาร์บอนยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's forces) เป็นแบบบรรจุชิดที่สุดรูปหกเหลี่ยม (hexagonal closest-packed structure : hcp) ซึ่งมีลักษณะในแต่ละชั้นเป็นแบบ ABABAB... หรือแบบบรรจุชิดที่สุด รูปลูกบาศก์ (cubic closest-packed structure : ccp) ซึ่งมีลักษณะในแต่ละชั้นเป็นแบบ ABCABC...

โครงสร้างเคมีต่างๆไปของถ่านกัมมันต์ จัดว่าคล้ายกับโครงสร้างของแกรไฟต์ คือ เป็นหกเหลี่ยมต่อกัน และเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ตามแนวราบ ซึ่งแต่ละชั้นประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวจับกันเป็นรูปวงแหวนหกเหลี่ยม (Hexagonal ring) และยังมีโซ่สายไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon chains) ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมดเหลือติดอยู่บ้าง

การเกิดการดูดซับของหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์นั้น มีอยู่หลายกลุ่มด้วยกัน เช่น

1. หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl groups)
2. หมู่ฟีนอลิก ไฮดรอกซิล (Phenolic hydroxyl groups)
3. หมู่ควินิน (Quinine type carbonyl groups)
4. หมูนอร์มอล แลคโตน (Normal lactones)
5. ฟลูออเรสซินชนิดแลคโตน (Fluorescein type lactones)
6. กรดคาร์บอกซิลิก แอนไฮไดรด์ (Carboxylic acid anhydrides)
7. ไซคลิก เปอร์ออกไซด์ (Cyclic peroxide)

## 2.7 ชนิดของถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งชนิดโดยใช้หลักการแบ่งหลายอย่าง ได้แก่

### 1. แบ่งตามลักษณะทางกายภาพของถ่าน

ก. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered Activated Carbon, PAC) มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวมาก ถ่านผงเหมาะกับการใช้งานแบบเติมลงในภาชนะของเหลวโดยตรง

ข. ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon, GAC) ถ่านกัมมันต์ในรูปเกล็ดนิยมใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอของสาร เนื่องจากขนาดเกล็ดใหญ่กว่าผงทำให้แก๊สไหลผ่านได้ง่ายกว่า

ค. ถ่านกัมมันต์อัดแท่ง (Extruded Activated Carbon, EAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่นำไปขึ้นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.8-4.5 มิลลิเมตร ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือดูดซับแก๊ส เนื่องจากทำให้ความดันแก๊สตก (pressure drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดแท่งยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง อีกทั้งทำให้เกิดตะกอนน้อยด้วย

ง. ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เติมโมเลกุลสารอินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น อนุภาคโลหะเงิน ทำให้ถ่านสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ นอกเหนือจากสมบัติในการกรองสาร ดังนั้นจึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำของเครื่องกรองน้ำ

จ. ถ่านกัมมันต์เคลือบโพลีเมอร์ (Polymers Coated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยสารโพลีเมอร์บางชนิดที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible polymer) โดยใช้เทคนิคพิเศษ ซึ่งชั้นเคลือบโพลีเมอร์มีสมบัติยอมให้สารบางอย่างผ่านไปได้ ถ่านชนิดนี้ถูกใช้เป็นตัวดูดซับสารพิษหรือยาสำหรับกระบวนการฟอกเลือดที่เรียกว่า ฮีโมเพอร์ฟิวชัน (Hemoperfusion)

### 2. แบ่งตามชนิดการกระตุ้น

ก. การกระตุ้นทางเคมี เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้น ถ่านพวกนี้มักจะมีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้แก๊สออกซิไดซ์เป็นสารกระตุ้น เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับแก๊ส และไอระเหย

### 3. แบ่งตามขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ก. ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 2 นาโนเมตร (nm) มักนำไปใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับแก๊สและไอระเหย

ข. ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดปานกลาง (Mesopore) หรือ ทรานซิชันนอลพอร์ (Transitional pore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 2–50 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

ค. ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสี และการผลิตยา

### 2.8 การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลายหน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละอุตสาหกรรมจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

#### 1. ถ่านกัมมันต์ประเภทใช้กับของเหลว

- ก. อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ฟอกสี และทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ขึ้น
- ข. อุตสาหกรรมน้ำมัน และไขมันสำหรับบริโภคใช้ฟอกสี ใช้แยกสบู่ และเปอร้อออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมัน
- ค. อุตสาหกรรมอาหารใช้ดูดกลิ่น และฟอกสีผลิตภัณฑ์อาหาร
- ง. อุตสาหกรรมเครื่องเค็มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ ใช้ดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการทำให้เครื่องเค็มรสชาติดีขึ้น
- จ. อุตสาหกรรมเคมีและยา เช่น อะเซทานิไลด์ (Acetanilide) คาเฟอีน (Caffeine) กลีเซอริน (Glycerin) และ แคลเซียม เฟอโรไซยาไนด์ (Calcium Ferrocyanide)

#### 2. ถ่านกัมมันต์ประเภทใช้ในการดูดแก๊สและไอ

- ก. อุตสาหกรรมทำน้ำกากป้องกันแก๊สพิษ และไอของสารอินทรีย์
- ข. อุตสาหกรรมการนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
- ค. อุตสาหกรรมปรับอากาศ ดูดมลพิษในอากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน
- ง. อุตสาหกรรมทำนุหรี โดยใช้เป็นก้นกรอง

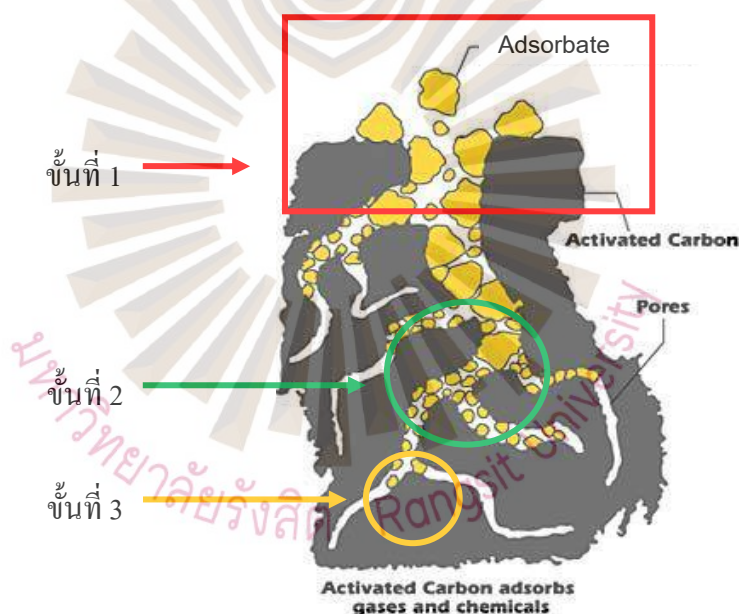
## 2.9 การดูดซับ (Adsorption)

### 1. ขั้นตอนการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) เข้าถึงตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับลงบนพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับจะเป็นแบบ monolayer และเกิดขึ้นเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่



ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการดูดซับ [6]

ขั้นที่ 1 การแพร่ของตัวถูกดูดซับเข้าสู่ช่องว่างของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 2 ตัวถูกดูดซับเข้าบรรจุในหลุม (hole) ของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 3 เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับ



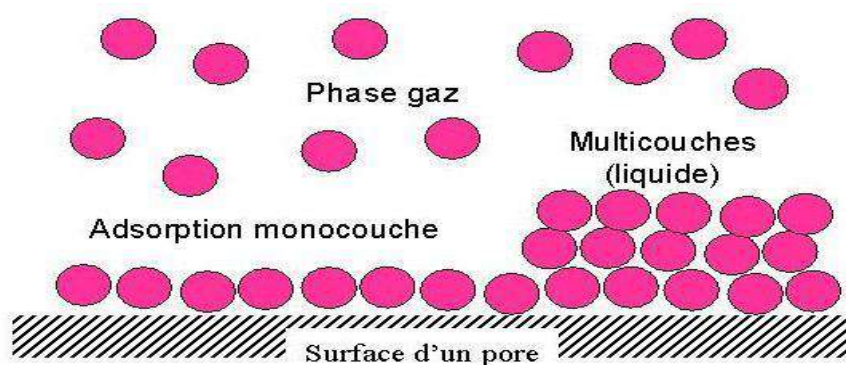
## 2. ลักษณะของการดูดซับ

### ก. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ทำให้องค์ประกอบยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ เรียกว่า แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waal's force) ซึ่งได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว แรงลอนดอน (London Force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งมีทิศทางไม่แน่นอน และยังพบว่าไม่มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อย การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับจะทำได้ง่ายและการดูดซับอาจเกิดซ้อนกันแบบหลายชั้น (Multilayer)

### ข. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

เกิดจากการสร้างพันธะเคมีบนผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะต้องใช้ความร้อนที่สูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการเกิดจะขึ้นกับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม องค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ โดยการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวเฉพาะบางแห่งเท่านั้น ต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมา ซึ่งพันธะระหว่างอะตอมมักจะแข็งแรงและมีการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)



ภาพที่ 2.7 การดูดซับแบบ multilayer และ monolayer [7]



### 3. แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย จะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (physical force) และแรงทางเคมี (chemical force) โดยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงไฟฟ้าสถิต เกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น ion exchange ส่วนแรงทางเคมี จะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) เกิดเป็นสารประกอบติดผิวตัวดูดซับด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bonding)

#### ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals forces)

แรงที่เกิดจากโมเลกุลมีขั้วกับ โมเลกุลมีขั้ว เกิดจากอะตอมกลุ่มร่วมพันธะมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกัน และอะตอมกลางมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทำให้สภาพขั้วภายในโมเลกุลมีด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกและด้านหนึ่งเป็นขั้วลบ แต่ละโมเลกุลจะหันด้านที่สภาพขั้วตรงกันข้ามกันเข้าหากันเกิดเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลขึ้น แรงที่เกิดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว จัดเป็น แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆเหล่านี้ เกิดจากผล 3 อย่าง ดังนี้

1) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

2) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar molecule) เกิดจากผลของการกระจายตัว (dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและ ถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่ จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

3) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

#### ข. แรงลอนดอน (London force)

เป็นแรงที่เกิดจากโมเลกุลไม่มีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างมวลวัตถุที่มีมวลทุกชนิดจะมีแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ ระหว่างมวลเกิดขึ้นเช่น แรงดึงดูดระหว่างโลกกับดวงจันทร์ โมเลกุลต่างๆ ไปก็เช่นกันเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้กันระยะหนึ่งจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างมวลขึ้น โมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลมากก็จะมีแรงดึงดูดระหว่างมวลมากด้วย

ค. พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

เป็นแรงระหว่างโมเลกุลมีขั้วที่เกิดกับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง เช่น F O และ N สร้างพันธะกับ H เช่น โมเลกุล HF NH<sub>3</sub> H<sub>2</sub>O สารประกอบเหล่านี้จะมีจุดเดือดที่สูงกว่าปกติ

ง. แรงทางเคมี (Chemical force)

เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของ หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับกับ ไอออนของโลหะหนักแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

1. เป็นพันธะที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์
2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

4. ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมีและทางกายภาพมีความแตกต่างกัน ดังนี้

ก. การแยกโมเลกุลที่ถูกดูดซับทางเคมีออกจากตัวดูดซับไม่สามารถทำได้หรือทำได้ยาก ในขณะที่โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับทางกายภาพสามารถแยกออกได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน

ข. ในการดูดซับทางเคมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะสร้างพันธะเคมีที่ผิวของตัวดูดซับด้วยการให้และใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ส่วนการดูดซับทางกายภาพ จะเกิดจากผลของแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล และอิทธิพลของการแพร่

ค. การดูดซับทางเคมีนั้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และการดูดซับจะหยุดลง เมื่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวดูดซับหมดไป ในขณะที่การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์นั้น ตัวถูกดูดซับจะยึดเกาะบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (multilayer)

ง. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการดูดซับทางเคมีจะเพิ่มขึ้น แต่อัตราการดูดซับทางกายภาพจะลดลง

## 5. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

ตัวดูดซับจะสามารถเกาะหรือกระจายที่ผิวของตัวดูดซับได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ ตัวดูดซับ และสถานะในการดูดซับ โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

### ก. คุณสมบัติของตัวดูดซับ

#### 1) ขนาดและพื้นที่ผิวของคาร์บอน

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคาร์บอน คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับแบบแปรผกผันกับขนาดของคาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนเกล็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive Capacity) นั่นคือ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของคาร์บอนได้มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดของคาร์บอนจึงมีบทบาทน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิว คาร์บอนทั้งแบบผงและแบบเกล็ดจึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายถึงการมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันด้วย (แต่อัตราไม่เท่ากัน)

#### 2) หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่ผิวหน้า

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับ จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากสามารถยึดเหนี่ยวตัวดูดซับ แล้วเกิดเป็นการดูดซับทางเคมีได้ โดยหมู่ฟังก์ชันประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิล ( $C=O$ ) หมู่เอมีน ( $-NH_2$ ) และหมู่ซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ซึ่งจะเป็นประจุลบในสารละลาย สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนัก

### ข. คุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ

#### 1) ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายมีความสัมพันธ์กับการละลาย คือถ้าตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายสูง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลายมีค่ามาก โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากสารละลายไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่สูงส่วนสารที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับได้ดีกว่า

## 2) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักและขนาดของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล ทำให้ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์ลดลง และการดูดซับในรูพรุน จะเกิดได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย เพราะตัวถูกดูดซับ สามารถเข้าไปในรูพรุน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ

### ค. สภาพะในการดูดซับ

#### 1) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH ของสารละลายมีผลต่อการเปลี่ยนรูป (species) ของโลหะหนัก เช่น การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักกลุ่มประจุบวกสอง (divalency ion) เช่น ตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) นิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) สังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) โครเมียม ( $Cr^{3+}$ )

#### 2) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ถ้าเป็นชนิดดูดความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และอัตราเร็วของการดูดซับจะแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้น ไม่มีผลต่อการดูดซับ

## 2.10 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) [8]

เมื่อเกิดการดูดซับตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆแต่จะไม่ได้ maximum capacity เพราะมีผลของการถ่ายเทมวลสารเข้ามาดูดซับไปพร้อมๆกัน จนกระทั่งอัตราการดูดซับ (adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (desorption) ซึ่งเรียกว่า ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ สภาวะสมดุลนี้ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $q_e$ , mg/g) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ , mg/L) ณ อุณหภูมิคงที่

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นเส้นที่ลากขึ้นมาเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสารหรือไอออนบนผิวของตัวดูดซับต่างๆ เส้นนี้เกิดจากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่างๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทอมใน 5 ลักษณะ ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งจำแนกจากลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทอมในช่วงเริ่มต้น

Type I Isotherm (ภาพที่ 2.8 a) พบมากที่สุดเป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมที่ผิวของตัวดูดซับได้หนาหนึ่งโมเลกุล (single layer adsorption) พบทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ micro powders ซึ่งปริมาณของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้หนึ่ง จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น microporous (1.5 นาโนเมตร) และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

Type II Isotherm (ภาพที่ 2.8 b) พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่านันต์) โดยจะเกิดบน nonporous powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า microporous (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point of knee of isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว และถ้าเพิ่ม relative pressure จะทำการดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ multilayer

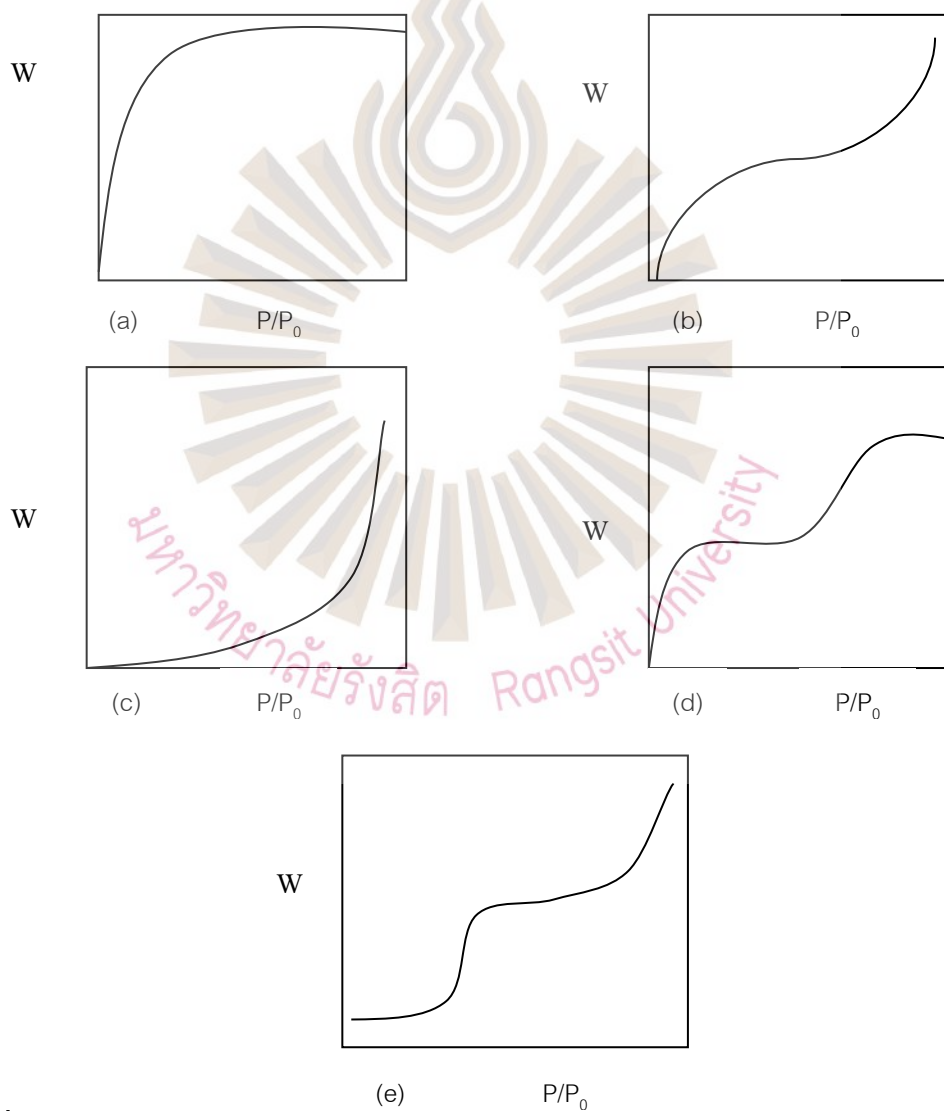
Type III Isotherm (ภาพที่ 2.8 c) การดูดซับคล้าย Type II แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (heat of adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (the adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

Type IV Isotherm (ภาพที่ 2.8 d) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรูพรุนประมาณ 15-1,000 อังสตรอม การดูดซับคล้าย Type II สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคบปิดภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อ relative pressure เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น



ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนของเส้นกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับใน Isotherm Type II คือเกือบเป็น monolayer สมบูรณ์

Type V Isotherm (ภาพที่ 2.8 e) การดูดซับคล้าย Type III ในช่วงความเข้มข้นต่ำแต่การดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV เป็นปรากฏการณ์ดูดซับที่เป็นผลจากแรงดึงดูดและตัวดูดซับมีค่าน้อยๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15 - 1,000 อังสตรอม



ภาพที่ 2.8 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ [8] (w : Weight adsorbed ; P<sub>0</sub> : adsorbate equilibrium pressure ; P : adsorbate saturated equilibrium pressure ; P/P<sub>0</sub> relative pressure)



### สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์ม

การอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับ จะนิยมเปลี่ยนรูปเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรงแล้วคำนวณค่าต่างๆ ด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายการดูดซับ โดยสมการที่ใช้มีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้และอธิบายในที่นี้ ได้แก่ รูปแบบของสมการ Langmuir adsorption isotherm และ Freundlich adsorption isotherm

#### ก. ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ [ 9, 10 ]

แบบจำลองนี้พัฒนามาจากแนวความคิดที่ว่า เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น จำนวนตัวถูกดูดซับ ที่ถูกจับกับตำแหน่ง binding sites บนตัวดูดซับก็มากขึ้น ขั้วขวางการจับของโมเลกุลอื่น ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงเป็นสัดส่วนระหว่างตำแหน่ง binding sites ที่ว่างบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และที่สภาวะสมดุลอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ ลักษณะการดูดซับจึงเป็นลักษณะชั้นเดียว ( monomolecular layer) โดยมีสมมุติฐาน ดังนี้

1. การดูดซับมีลักษณะเป็นชั้นเดียว ( monomolecular layer) คือ มีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว อีออนหรือ โมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกันหรือชั้นของตัวถูกดูดซับมีความหนาเท่ากันหมด
2. เมื่อดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะไม่มีเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ผิวสัมผัส และตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน
3. พื้นที่ผิวในการดูดซับ มีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกัน เป็น homogeneous surface
4. พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆพื้นที่ของตัวดูดซับ



ภาพที่ 2.9 แสดงการดูดซับแบบ monolayer

A คือ adsorbate, B คือ adsorbent , AB คือ adsorbate & adsorbent

การคำนวณสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q_e = \frac{Q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L Q_0} + \frac{C_e}{Q_0}$$

$q_e$  หมายถึงปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

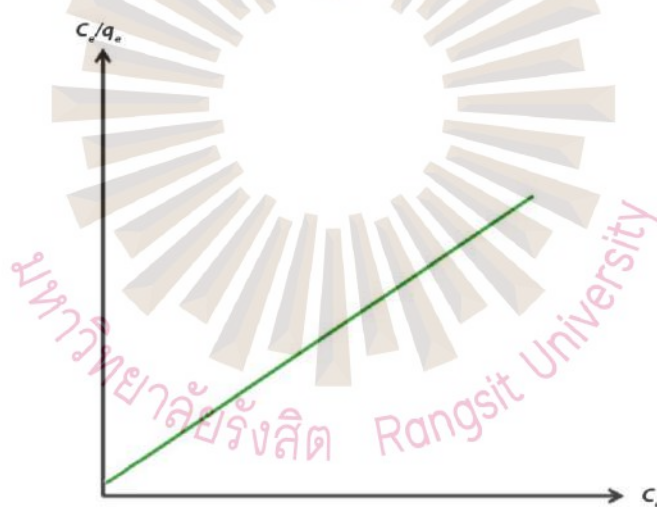
$Q_0$  หมายถึงปริมาณการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  หมายถึงความเข้มข้นที่สถานะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_L$  หมายถึงค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

จากนั้นทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_e$  และค่า  $\frac{C_e}{q_e}$  เพื่อคำนวณหาค่าความชัน

$$\frac{1}{Q_0} \text{ และจุดตัดแกน } y \text{ } \frac{1}{K_L Q_0}$$

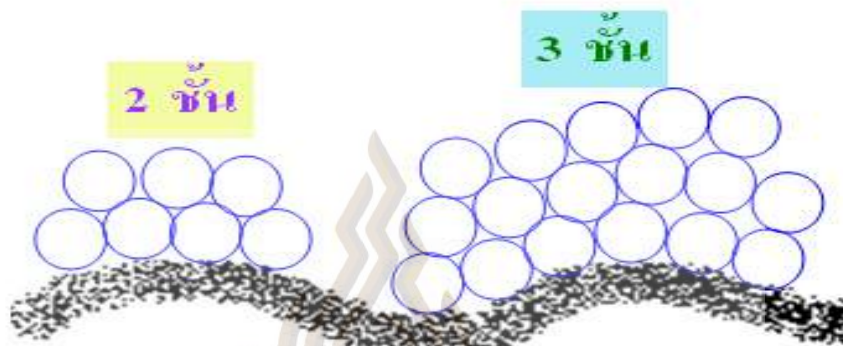


ภาพที่ 2.10 กราฟเส้นตรงในสมการแลงเมียร์

จากกราฟ จะสามารถคำนวณค่า  $K_L$  จากจุดตัดแกน  $y$  และค่า  $Q_0$  จากความชัน และพิจารณาค่า  $R^2$  ของกราฟเส้นตรงได้ โดยถ้าค่า  $R^2$  มีค่าใกล้กับ 1 หรือเท่ากับ 1 แสดงว่า กลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

### ข. ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช

โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich (ค.ศ.1880– 1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงการดูดซับแบบ multilayer [11]

การคำนวณสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้สมการดังนี้

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

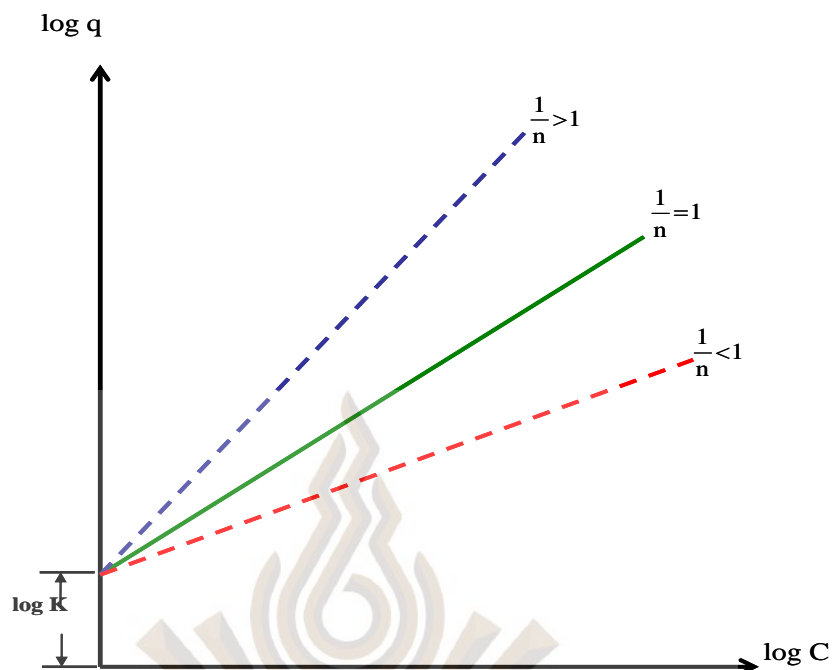
$q_e$  หมายถึงปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อกรัมของสารดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  หมายถึงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_f$  หมายถึงค่าคงที่ในสมการ Freundlich

$n$  หมายถึงค่าคงที่ในสมการ Freundlich

ค่า  $K$  เป็นค่าคงที่ของการดูดซับ เมื่อค่า  $K_f$  มีค่ามาก แสดงว่าการดูดซับเกิดได้ดีมากบนตัวดูดซับ ค่า  $\frac{1}{n}$  เป็นดัชนีเลขยกกำลัง เมื่อ  $\frac{1}{n}$  มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าค่า  $q_e$  แปรผันตรงกับค่า  $C_e$  ถ้าค่า  $\frac{1}{n}$  มากกว่า 1 แสดงว่าค่า  $q_e$  เป็นสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลกับค่า  $C_e$  จากนั้นทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log C_e$  และค่า  $\log q_e$  เพื่อคำนวณหาค่าความชัน  $\frac{1}{n}$  และจุดตัดแกน  $y$  ( $\log K_f$ )



ภาพที่ 2.12 กราฟเส้นตรงในสมการฟรุนดลิช [12]

จากกราฟ จะสามารถคำนวณค่า  $\frac{1}{n}$  จากความชัน และค่า  $K_f$  จากจุดตัดแกน y และพิจารณาค่า  $R^2$  ของกราฟเส้นตรงได้ โดยถ้าค่า  $R^2$  มีค่าใกล้กับ 1 หรือเท่ากับ 1 แสดงว่า กลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดลิชซึ่งเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

### 2.11 จลนศาสตร์การดูดซับ

เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง (pseudo-second order) โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการกลายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกรอบครอง [13,14,15,16 ]

**สมการแบบจำลอง pseudo-first order แสดงดังสมการ**

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

อินทิเกรตสมการดังกล่าว จะได้สมการใหม่ดังนี้

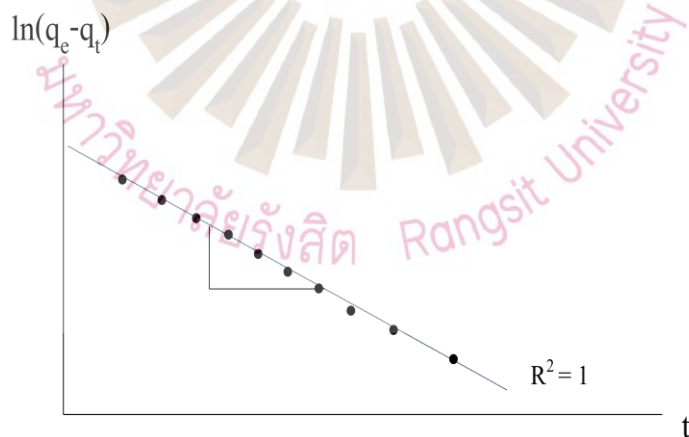
$$-\ln(q_e - q_t) + \ln q_e = k_1 t$$

หลังจากนั้นจัดให้ได้สมการเส้นตรงของแบบจำลอง pseudo- first order ดังสมการ

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

- เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_t$  คือ ปริมาณการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง  
 $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

จากนั้นทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(q_e - q_t)$  และ  $t$  เพื่อคำนวณหาค่าความชัน ( $-k$ ) และจุดตัดแกน  $y$  ( $\ln q_e$ ) ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 จลนศาสตร์การดูดซับแบบจำลอง pseudo-first order



สมการเส้นตรงของแบบจำลอง pseudo- second order แสดงดังสมการ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

อินทิเกรตสมการดังกล่าว จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{1}{q_e - q_t} - \frac{1}{q_e} = k_2 t$$

หลังจากนั้นจัดให้ได้สมการเส้นตรงของแบบจำลอง pseudo- second order ดังสมการ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

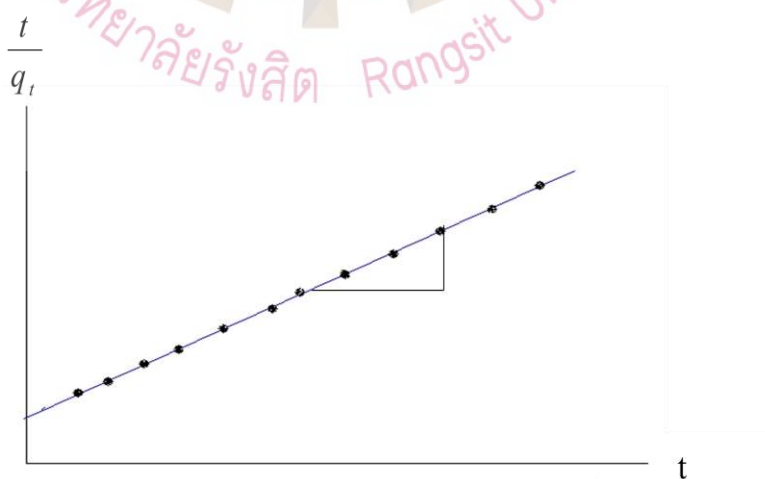
$q_t$  คือ ปริมาณการดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สอง

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

จากนั้นทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\frac{t}{q_t}$  และ  $t$  เพื่อคำนวณหาความชัน ( $\frac{1}{q_e}$ ) และจุดตัด

แกน  $y$  ( $\frac{1}{k_2 q_e^2}$ ) ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 จลนศาสตร์การดูดซับแบบจำลอง pseudo- second order

## 2.12 โลหะโครเมียม [12]

โครเมียมเป็นโลหะหนักสีขาวยเงิน มีลักษณะเป็นมันวาว มีความแข็งแรง มีความมันเงาและต้านทานการผุกร่อนได้ดีจึงมีการนำโครเมียมไปผสมกับเหล็กและนิกเกิล เป็นโลหะผสม (สแตนเลส) ที่ต้านทานการเกิดสนิม นอกจากนี้โครเมียมยังนำไปใช้ในการชุบโลหะ ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องประดับ เพื่อป้องกันการกัดกร่อน เป็นองค์ประกอบการผลิตเม็ดสีของอุตสาหกรรมสีทาและอุตสาหกรรมพอยก้อม ในขณะที่อุตสาหกรรมแก้วใช้โครเมียมผสมลงไป เพื่อให้แก้วมีสีส้มและเกิดความเงางาม เนื่องจากโลหะโครเมียมมีสีมากมายตามชนิดของสารประกอบ เช่น สีเขียวของโครเมียมออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) สีเหลืองของสารประกอบตะกั่ว ( $\text{PbCrO}_4$ ) และสีเหลืองของสารประกอบสังกะสี ( $\text{ZnCrO}_4$ ) โรงงานอุตสาหกรรมในเขตกรุงเทพมหานคร มีการปล่อยโลหะหนักโครเมียม ลงสู่แหล่งน้ำอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 448 มิลลิกรัมต่อลิตร

โครเมียมสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามคุณสมบัติทางเคมีได้เป็น

1. โลหะโครเมียม และอัลลอยด์ กลุ่มนี้จะรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และอัลลอยด์ของโครเมียม(chromium containing-alloy) โดยทั่วไปกลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น

2. สารประกอบโครเมียม(II) (divalent chromium compound) หรือ สารประกอบโครมัส (chromous compounds) ได้แก่ โครเมียม (II) คลอไรด์ (chromium chloride ( $\text{CrCl}_2$ )) และ โครเมียม (II) ซัลเฟต (chromium sulfate ( $\text{Cr}(\text{SO}_4)_2$ )) กลุ่มนี้จะมีความเป็นพิษน้อย

3. สารประกอบโครเมียม(III) ไอออน (trivalent chromium compound) หรือ สารประกอบโครมิก(chromic compound) เป็นที่ทราบกันว่า โครเมียม (III) เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายในกระบวนการเผาผลาญกลูโคส (glucose metabolism) ส่วนสารประกอบ อื่นๆที่พบในกลุ่มนี้ ได้แก่ โครเมียม (III) ออกไซด์ (chromic oxide ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )), โครเมียม (III) ซัลเฟต(chromium sulfate ( $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ )), โครเมียม (III) คลอไรด์ (chromium chloride ( $\text{CrCl}_3$ )), และ โครเมียมโพแทสเซียมซัลเฟต (chromium potassium Sulfate ( $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$ ))

4. สารประกอบโครเมียม(VI) (hexavalent chromium compound) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อยคือ

4.1 กลุ่มที่ละลายน้ำได้ (water-soluble hexavalent compounds) ได้แก่ กรดโครมิก(chromic acid), กรดโครมิกแอนไฮไดรด์ (anhydride of chromic acid), โมโนโครเมต (monochromate), ไดโครเมตของโซเดียม, โพแทสเซียม, แอมโมเนียม, ซีเซียม, รูบิเดียม และลิเทียม เป็นต้น

4.2 กลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble hexavalent compounds) ได้แก่ ซิงค์โครเมต (zinc chromate), แคลเซียมโครเมต (calcium chromate), ตะกั่วโครเมต (lead chromate), แบเรียมโครเมต (barium chromate), สตรอนเทียมโครเมต (strontium chromate) และซินเทอร์โครเมียมไตรออกไซด์ (sintered chromium trioxide) เป็นต้น

โครเมียมที่พบในน้ำมีอยู่ 2 รูปแบบคือ โครเมียม (III) และ โครเมียม (VI) เนื่องจากโครเมียม (VI) มีความสามารถในการละลายน้ำสูง จึงมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้มากซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบหายใจ ระบบประสาท ตับ ไต การเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม นอกจากนี้ยังเป็นสารก่อมะเร็งต่อมนุษย์ที่ปอดและโพรงจมูก ดังนั้นกระทรวงอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม จึงได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนโครเมียม (III) ไอออน ต้องมีปริมาณไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียม (VI) ต้องมีปริมาณไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 2.13 ความเป็นพิษของโครเมียมและผลต่อสุขภาพ (toxicity and health effect)

ในกรณีที่ร่างกายได้รับโครเมียมในปริมาณที่สูงเกินกว่าที่ร่างกายจะรับได้ ก็จะก่อให้เกิดภาวะพิษโครเมียมได้ ทั้งในลักษณะการเกิดพิษแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง

#### 1. ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (acute toxicity)

มักพบในกรณีที่ได้รับโดยการกิน โครเมียม(VI) เช่น chromic acid จะทำให้เกิด อูจจาระร่วงเฉียบพลัน (acute gastroenteritis) ร่วมกับการอาเจียน (yellow-green vomitus) หรือ อาเจียนเป็นเลือด (hematemesis) เซลล์ตับ ตาย (hepatic necrosis) เลือดออกตามทางเดินอาหาร (gastrointestinal hemorrhage acute tubular necrosis) และ ไตวาย (renal failure) นอกจากนี้ ในรายที่กินโครเมียม (VI) ในปริมาณมากๆจะทำให้มีอาการเวียนศีรษะ หิวน้ำ ปวดท้อง ถ่ายเป็นเลือด ในรายที่รุนแรงอาจพบความผิดปกติเหล่านี้ร่วมด้วย เช่น การทำงานของตับผิดปกติ เกิดการแข็งตัวของเลือดอย่างรุนแรง เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย และอาจเสียชีวิตได้ ปริมาณที่ทำให้เสียชีวิตได้ในผู้ใหญ่ คือ 1-3 กรัม

#### 2. ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (chronic toxicity)

มักพบในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมเป็นเวลานานๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ ความเป็นพิษต่อผิวหนังและ เยื่อเมือกมักมีสาเหตุจากการสัมผัส โครเมียม (VI) เป็นระยะเวลานานๆ จะเกิดแผลบริเวณผิวหนังที่ต้องสัมผัส โครเมียมเป็นประจำที่เรียกว่า chrome hole หรือ chrome sore พบมากในคนงานที่ใช้ chromic acid, ammonium dichromate, potassium chromate

และ sodium dichromate ถ้าแผลไม่ลึกมากเมื่อรักษาด้วยยาประมาณ 3 อาทิตย์แผลจะหาย ในรายที่รุนแรงทำให้เกิด ผิวหนังอักเสบ ซึ่งเป็นอาการผิดปกติที่เกิดขึ้นร่วมกับ ระบบภูมิคุ้มกันจะพบการอักเสบของผิวหนังแบบเรื้อรังและจัดเป็นความว่องไวของโครเมียมชนิดช้า นอกจากนี้ในรายคนงานที่ต้องสัมผัสกับ chromate dust จะพบตาแดงการระคายเคืองอย่างรุนแรง อาการแพ้ เลือดกำเดาไหล และที่พบบ่อยคือ แผลในกระเพาะหรือ แผลในโพรงจมูก การเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogenicity) โดย The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ US Toxicology Program จำแนก โครเมียม (VI) เป็นสารก่อมะเร็ง ด้วยความสามารถในการละลายน้ำที่ดีของสารประกอบโครเมียม เช่น สตรอนเทียม (strontium) และ ซิงค์(II)โครเมต (zinc chromates) จึงพบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดมะเร็งปอด ซึ่งพบค่อนข้างมากกว่ามะเร็งชนิดอื่น มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดมะเร็งปอดในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับ โครเมียม (VI) เป็นเวลามากกว่า 30 ปีขึ้นไปจะมีความเสี่ยงสูงกว่าคนงานที่มีอายุงานน้อยกว่า

#### 2.14 การป้องกันและการรักษาภาวะพิษจากโครเมียม

การป้องกัน โดยเฉพาะในกลุ่มคนงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครเมียม ทำได้โดยการใส่ หน้ากากป้องกัน การหายใจเอาโครเมียมเข้าไป การใส่ถุงมือ ในขณะที่ปฏิบัติงาน การล้างมือและการทำความสะอาดร่างกายหลังการทำงานทุกครั้ง นอกจากนี้จะต้องมีการเฝ้าระวังการเกิดพิษของโครเมียม โดยการตรวจร่างกายและตรวจระดับโครเมียมเป็นประจำ

การรักษาแบบประคับประคอง หลังจากที่มีการวินิจฉัยว่าเป็นพิษจากโครเมียมชนิดใดแล้ว การรักษาที่สำคัญมุ่งเน้นป้องกันภาวะแทรกซ้อนที่อาจจะเกิดขึ้น ได้แก่ ภาวะช็อค, ไตวายและการไหลเวียนของโลหิตไม่ปกติ เป็นต้น

การรักษาที่จำเพาะ สำหรับภาวะพิษของโครเมียมไม่มี specific antidote การรักษาจึงเป็นแบบ รักษาตามอาการ ปัจจุบันมีรายงานการศึกษาว่าการให้วิตามินซีในปริมาณสูงๆ หลังจากเกิดภาวะพิษของโครเมียมทันที จะช่วยลดความรุนแรงจากภาวะพิษของโครเมียม

#### 2.15 การกำจัดโครเมียม (VI) จากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการกำจัดโครเมียม (VI) ออกจากน้ำทิ้งในแต่ละกระบวนการอาจประกอบด้วยวิธีการต่างๆกัน ได้แก่

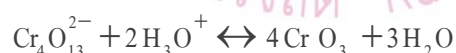
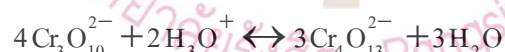
1. การรีดักชันโครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) ไอออน แล้วทำให้ตกตะกอนเป็นโครเมียมไฮดรอกไซด์ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มากในการกำจัดโครเมียม (VI) โดยเฉพาะโรงงานชุบโลหะส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 75 ใช้วิธีการนี้ โดยเติมสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ได้แก่ เฟอร์ริก

ไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) โซเดียมไบซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2$ ) เป็นต้น การตกตะกอนโครเมียมเกิดได้ดีเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 3 วิธีนี้ทำในระบบกะหรือระบบต่อเนื่อง สำหรับระบบกะเป็นระบบที่ง่าย และใช้ต้นทุนต่ำเหมาะสำหรับกรณีที่มีปริมาณน้ำไม่มากนัก (น้อยกว่า 50000 แกลลอนต่อวัน) ระบบนี้ยังเหมาะกับน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสิ่งปนเปื้อนไม่แน่นอน ซึ่งจำเป็นต้องใช้วิธีการบำบัดที่แตกต่างกันออกไป ส่วนระบบต่อเนื่องเหมาะกับน้ำทิ้งปริมาณมาก และมีองค์ประกอบของสิ่งปนเปื้อนในน้ำทิ้งค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตามวิธีการตกตะกอนมีข้อเสียดังนี้ การตกตะกอนเกิดได้ไม่ดีหากค่าความเป็นกรดของน้ำทิ้งเปลี่ยนไป วิธีนี้ไม่เหมาะสมกับน้ำทิ้งที่มีโลหะเจือปนอยู่หลายชนิด เพราะการตกตะกอนของโลหะแต่ละชนิดแตกต่างกันขึ้นกับค่าความเป็นกรดที่ต่างกัน ถ้ามีสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำทิ้งจะมีผลกระทบต่อกรกำจัดโครเมียม (VI) ใช้ต้นทุนในการดำเนินการค่อนข้างสูง ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโครเมียม (VI) เจือปนอยู่ หากนำไปถมที่หรือทำเป็นปุ๋ยอาจก่อให้เกิดปัญหาโลหะหนักตกค้าง

2. การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นวิธีที่นิยมใช้รองมาจากการรีดักชัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (VI) สูงมากกว่าร้อยละ 90 วิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนที่อยู่บนเรซินกับไอออนที่อยู่ในน้ำเสีย



ในน้ำที่เป็นกรด และมีความเข้มข้นสูงเนื่องจาก  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  จะจับกับเรซินแล้วยังมีบางส่วนทำปฏิกิริยากับ  $\text{H}_3\text{O}^+$  ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



เรซินที่ใช้จะเป็นเรซินชนิดไอออนบวกซึ่งเหมาะสมกับการกำจัดโครเมียม (VI) เมื่อเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจนอิ่มตัวแล้วจะทำการฟื้นฟูสภาพด้วยกรด เพื่อชะล้างเอาโลหะที่อยู่บนเรซินออก วิธีนี้มีข้อเสีย คือ เรซินที่ใช้มีราคาสูง และการลงทุนค่อนข้างสูงมาก

3. การใช้สารช่วยตกตะกอน เป็นการเติมสารช่วยให้อนุภาคของโลหะหนักรวมตัวเป็นตะกอนนั้นเกิดจากประจุที่อยู่บนผิวของอนุภาค สารเคมีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous sulfate) หรืออะลูมิเนียม (Alum) ในการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม หากเพิ่มค่าความเป็นกรดของสารละลายสูงกว่า 8 การกำจัดโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับความขุ่นของน้ำ จากการศึกษพบว่า ถ้าใช้ทั้งเฟอร์รัสซัลเฟต และ อะลูมิเนียมร่วมกัน สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำจากแม่น้ำที่มีความเข้มข้นของ



ตะกั่วเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6-10 ได้มากกว่าร้อยละ 97 นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำบ่อที่มีตะกั่วปนเปื้อนเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าถ้าใช้เฟอร์รัสซัลเฟต อย่างเดียวสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำบ่อได้มากกว่าร้อยละ 97 ส่วนถ้าใช้อะลูมิเนียมอย่างเดียวยังสามารถกำจัดตะกั่วได้เท่ากับร้อยละ 80-90 และสามารถกำจัดโครเมียมภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้เท่ากับร้อยละ 89 เมื่อความเข้มข้นโครเมียมไม่สูงมาก

4. การใช้ฟองอากาศ เป็นการกำจัดโลหะหนักที่มีความหนาแน่นต่ำออกจากรูน้ำทิ้ง โดยการปล่อยอากาศผ่านเข้าไป โลหะจะเกาะที่ผิวของฟองอากาศลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ จากนั้นสามารถกำจัดออกโดยการกวาดที่ผิวน้ำของน้ำทิ้ง ในกรณีที่โลหะหนักละลายในน้ำจะต้องเติมสารเคมีบางอย่างลงไปก่อนโดยอาจเติมสารลดแรงตึงผิว เช่น กรดคาร์บอกซิลิก เพื่อเปลี่ยนโลหะหนักให้อยู่ในสภาพที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นกำจัดออกจากน้ำทิ้งด้วยวิธีการใช้ฟองอากาศ โดยเรียกวิธีการนี้ว่า Ion flocculation การใช้ฟองกำจัดโลหะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงถึงแม้ว่าในน้ำทิ้งจะมีโลหะหนักเจือปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย วิธีการนี้มีข้อดี ได้แก่ เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก มีความคล่องตัว มีประสิทธิภาพในการดำเนินการและ ใช้พื้นที่น้อย เป็นต้น กากตะกอนที่ได้ มีความเข้มข้นของโลหะ และมีปริมาณน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีตกตะกอนทั้งในด้านแรงงาน อุปกรณ์ และพลังงาน

5. การสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำทิ้ง โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัดโลหะหนัก โดยให้น้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อนไหลสวนทางกับตัวทำละลาย เมื่อโลหะหนักละลายในตัวทำละลายแล้ว จึงทำการแยกโลหะหนักนั้นด้วยกรดอีกครั้ง วิธีการนี้มีข้อดี ได้แก่ สามารถเลือกและแยกสารที่ต้องการออกจากน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนอยู่เพียงเล็กน้อยได้ ทำให้โลหะหนักที่ต้องการมีความเข้มข้นขึ้น เหมาะสำหรับระบบที่มีการควบคุมแบบอัตโนมัติ และมีประสิทธิภาพในการแยกสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะหลายชนิดได้ ส่วนใหญ่วิธีนี้เหมาะกับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมผลิตทองแดง

6. การบำบัดทางชีวภาพ เป็นกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กระบวนการนี้มีข้อจำกัดในการบำบัดไอออนของโลหะหนักของโครเมียม ทองแดง นิเกิล และสังกะสี ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพียงร้อยละ 5 เนื่องจากโลหะหนักมีความเป็นพิษต่อเชื้อที่ใช้

7. วิธีการทางไฟฟ้าเคมี วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักออกจากรูน้ำทิ้งจากโรงงาน นิยมใช้มาก กับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ทำได้โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้ากระแสตรงลงในสารละลายระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้โลหะหนักซึ่งมีไอออนบวกเกาะติดที่ขั้วแคโทด วิธีการนี้ใช้หลักการออกซิเดชัน-รีดักชัน

8. วิธีการกรองผ่านเยื่อเลือกผ่าน วิธีนี้ใช้หลักการรีเวอร์สออสโมซิสในการกรองน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ผ่านเยื่อเลือกผ่านภายใต้ความดัน ทำให้น้ำซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กไหลผ่านไป ได้ ส่วนโลหะหนักซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านได้ วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงมาก ตัวอย่างเยื่อเลือกผ่านที่นิยมใช้ในการกรองโลหะหนัก ได้แก่ เซลลูโลสอะซีเตท โพลีเอไมด์ โพลีซัลโฟเนต เป็นต้น วิธีนี้สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ การรีเวอร์สออสโมซิสที่มีความดันสูง (High pressure reverse osmosis) ใช้ ความดันตั้งแต่ 500-1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การรีเวอร์สออสโมซิสที่ความดันต่ำ (Low pressure reverse osmosis) ใช้ความดันตั้งแต่ 200-500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และการกรองภายใต้ความดันต่ำ (Ultrafiltration) ใช้ความดันตั้งแต่ 20-100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นิยมใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 1000 กรัม ในกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส ความดันที่ใช้ต้องมากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลายที่ต้องการขับออกไป

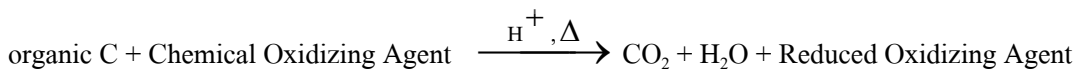
### 2.16 ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

ค่า chemical oxygen demand (COD) คือค่าที่แสดงถึงปริมาณของก๊าซออกซิเจนทั้งหมดที่สมมูลกับปริมาณของสารออกซิไดซ์ที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำ ให้กลายเป็น  $\text{CO}_2$  และน้ำ โดยสารอินทรีย์เกือบทั้งหมดสามารถถูกออกซิไดซ์โดยสารออกซิไดซ์อย่างแรง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด เช่น โพแตสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) และ โพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) เป็นต้น

โดยปกติแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนสามารถย่อยสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็น  $\text{CO}_2$  น้ำและแอมโมเนีย ดังปฏิกิริยา

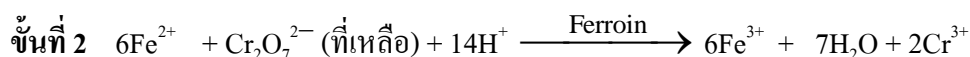
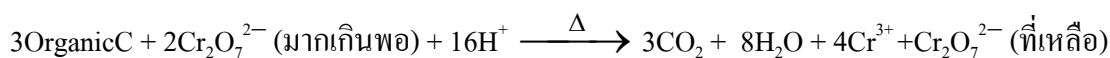


แต่การหาค่า COD จะใช้สารเคมีออกซิไดซ์ สารอินทรีย์ในน้ำ ให้กลายเป็น  $\text{CO}_2$  และน้ำ ดังปฏิกิริยา



การวิเคราะห์หาค่า COD ในน้ำมี โดยใช้โพแตสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) ใช้วิธีการไทเทรตแบบอ้อม ชั้นเดียว (single indirect method) โดยใช้ สารละลายมาตรฐาน  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  ปริมาณมากเกินพอที่ทราบปริมาตร  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  ออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำในสภาวะที่เป็นกรดอย่างแรง ปฏิกิริยานี้จะเกิดสมบรูณ์ที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้การ รีฟลักซ์เพื่อป้องกันการสูญหายของสารที่ระเหยได้ในระหว่างการทำปฏิกิริยา จากนั้นไทเทรตสารละลาย  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  ที่เหลือด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ) โดยใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ และใช้  $\text{Ag}^+$  เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

### ขั้นที่ 1



เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีแดงน้ำตาล การคำนวณปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ จะคำนวณจากจำนวนกรัมสมมูลของสารละลายมาตรฐาน  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  หรือ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตซึ่งจะเท่ากับจำนวนกรัมสมมูลของ  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ที่เหลือ จากนั้นจะคำนวณจำนวนกรัมสมมูลของ  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารอินทรีย์ในน้ำ และจำนวนกรัมสมมูลของสารอินทรีย์ในน้ำจะสมมูลกับจำนวนกรัมสมมูลของก๊าซออกซิเจนที่จุลลินทรีย์ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์พอดี จะเห็นได้ว่าจะเกิด โครเมียม (III) ไอออน ร่วมกับ ไอออน อื่น ๆ เช่น  $\text{Ag}^+$   $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Hg}^{2+}$  เป็นต้น  $\text{Ag}^+$  และ  $\text{Hg}^{2+}$  จะไปตกตะกอนกับคลอไรด์ไอออน จะเหลืออยู่ในระบบน้อยมาก สารละลายโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำที่จากการวิเคราะห์ค่า COD จะมีประมาณ 1000 พีพีเอ็ม ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก และยังมีโลหะอื่นอีกในปริมาณไม่มากเช่น โลหะเงิน พรอท และเหล็ก เป็นต้น โดยปกติห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำจะเก็บรวบรวมน้ำทิ้งที่ได้จากการวิเคราะห์ COD แล้วนำส่งไปบำบัด โดยที่รับจ้างบำบัดของเสียอันตรายซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องหาแนวทางที่จะบำบัดน้ำทิ้งที่ได้จากการวิเคราะห์ COD เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการส่งไปบำบัดที่อื่น

### 2.17 การทบทวนวรรณกรรม

โดยงานวิจัยนี้เป็นโครงการต่อเนื่องจากโครงการแรก ซึ่งมีชื่อหัวข้อวิจัยว่า “การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง” [17] โดยได้รับทุนวิจัยจากสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต ปี 2553 งานวิจัยเรื่อง การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง มีข้อสรุปผลการวิจัยเป็นดังนี้

1. ลูกहुกวางมีความชื้นค่อนข้างมากร้อยละ 17.25 มีเถ้าร้อยละ 3.46 แสดงให้เห็นถึง ลูกहुกวางมีสาร อินินทรีย์พวกเกลือที่คงเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้อยู่ค่อนข้างน้อยส่วนสารระเหยมีร้อยละ 59.65 ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด แสดงว่าลูกहुกวางมีสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยที่อุณหภูมิสูงอยู่มาก ส่วนคาร์บอนคงตัวนั้นมีปริมาณร้อยละ 19.64 แสดงให้เห็นว่าลูกहुกวางมีคาร์บอนคงตัวอยู่มาก เมื่อนำไปทำถ่านจะได้ปริมาณถ่านพอสมควร

2. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ถ่านที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 120 180 นาที ตามลำดับ ได้ทำการทดลองเพื่อหาความสามารถในการกำจัดด้วยวิธีไอโอดีนนัมเบอร์และวิธีเมทิลีนบลู พบว่าทั้ง 2 วิธีให้สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ที่สภาวะเดียวกัน โดยคาร์บอนไนซ์ถ่านด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 120 นาที

3. การศึกษาหาขนาดที่เหมาะสมของถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกทุกวางพบว่าขนาดที่เหมาะสมคือใช้ตะแกรงร่อนที่มีขนาดเล็กกว่า  $38 \mu\text{m}$  (400 Mesh) ซึ่งถ้าใช้ตะแกรงร่อนที่มีขนาดเล็กลง ถ่านจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น

4. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักและกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อทำการทดลองกระตุ้นที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 120 180 นาที ตามลำดับ เปรียบเทียบกับถ่านคาร์บอนไนซ์ พบว่าการกระตุ้นถ่านที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการกระตุ้นนาน 60 นาที ด้วยอัตราส่วนของถ่านต่อกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักเท่ากับ 1:3 จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนดีที่สุดเท่ากับ 322.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนดีเท่ากับ 184.31 มิลลิกรัมต่อกรัม และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดให้มากขึ้นแล้วค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลง แสดงว่าปริมาณกรดที่มากขึ้นไม่ได้เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือเพิ่มปริมาณรูพรุนให้แก่ถ่านกัมมันต์ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่า รูพรุนจะถูกทำลายเมื่อปริมาณกรดมากเกินไป

5. การศึกษาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น โดยหลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์แล้วเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาปรับค่าความเป็นกรดต่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 มีสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีนดีที่สุดเท่ากับ 274.41 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับค่าความเป็นกรดต่างมีสภาวะใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 จึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ปรับค่าความเป็นกรดต่างในการดูดซับซึ่งดูดซับไอโอดีนได้มากที่สุดเท่ากับ 269.15 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากผลการทดลองพบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักที่ค่าความเป็นกรดต่างต่าง ๆ กันดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการดูดซับไอโอดีน

6. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนระหว่างถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวางกับถ่านกัมมันต์การค้า พบว่า



ก. ปริมาณคาร์บอนไนซ์จากลูกหูกวางที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอโอดีนเข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร เท่ากับ 4.00 กรัม

ข. ปริมาณถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอโอดีนเข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร เท่ากับ 1.00 กรัม

ค. ปริมาณถ่านกัมมันต์การค้าที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอโอดีนเข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร เท่ากับ 1.00 กรัม

โดยถ่านกัมมันต์การค้ามีไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 615.89 และ ร้อยละการกำจัดเท่ากับ 98.25 จากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์การค้ามากกว่าถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง เพราะถ่านกัมมันต์การค้าถูกเผาที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน จึงทำให้หมู่คาร์บอนิลบนพื้นที่ผิวหลุดออกไปเป็นจำนวนมาก เหลือแต่คาร์บอนเป็นจำนวนมากบนพื้นที่ผิวที่มากขึ้น จึงทำให้ถ่านกัมมันต์การค้าสามารถดูดซับไอโอดีนซึ่งเป็น โมเลกุลไม่มีขั้วได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง และจากเหตุผลนี้จึงจะทำการวิจัยต่อไปว่า การเผาถ่านให้เป็นถ่านคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำและเวลาเท่าใด จึงเหมาะสมกับการดูดซับสารที่มีประจุ เช่น โครเมียม (III) ไอออน ได้ดีที่สุด

ง. เวลาและความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางและถ่านกัมมันต์การค้า เท่ากับ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที โดยเมื่อนำถ่านทั้งสามชนิดมาดูดซับสารละลายไอโอดีนเข้มข้น ประมาณ 0.1 N ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร โดยใช้ระยะเวลาในการปั่นกวน 30 60 90 และ 120 นาที ความเร็วรอบในการปั่นกวน 90 120 และ 150 รอบ/นาที จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบในการปั่นกวนของถ่านทั้ง 3 ชนิดที่ดีที่สุด คือ 150 รอบ/นาที แต่ระยะเวลาในการปั่นกวน 30 60 90 และ 120 นาที ให้ผลการดูดซับไม่แตกต่างกันจึงเลือกระยะเวลาในการปั่นกวนเป็น 30 นาที เพื่อประหยัดเวลาในการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบให้มากขึ้น ทำให้ถ่านทั้งสามชนิดดูดซับไอโอดีนได้มากขึ้นแสดงว่าความเร็วรอบทำให้ถ่านสัมผัสหรือชนกับไอโอดีนได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการปั่นกวนให้มากขึ้น ไม่มีผลต่อการดูดซับมากนักแสดงว่า ถ่านสามารถดูดไอโอดีนได้หมดตั้งแต่ 30 นาทีแรก หรืออาจจะแปลได้ว่ารูพรุนของถ่านกว้างแต่ไม่ลึก เนื่องจากการแพร่ภายในรูพรุนจะต้องใช้เวลามากกว่าการแพร่ที่ผิวหน้าของรูพรุน และเมื่อพิจารณาจากค่าไอโอดีน นัมเบอร์ พบว่า ถ่านกัมมันต์การค้ามีค่ามากที่สุด ประมาณ 800 – 1000 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วน ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง ประมาณ 420 – 490 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านคาร์บอนไนซ์ จากลูกหูกวาง ประมาณ 230 – 270 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่า ถ่านกัมมันต์การค้ามีพื้นที่ผิวมากกว่า ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง และ ถ่านคาร์บอนไนซ์ จากลูกหูกวาง มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด



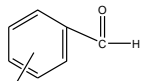
7. จากกลไกการดูดซับไอโอดีน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแลงเมียร์และพรุนดิชของถ่าน กัมมันต์จากลูกหูกวาง พบว่าค่า  $R^2$  ของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางสอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มพรุนดิช ซึ่งแสดงกลไกการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางเป็นแบบหลายชั้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแลงเมียร์และพรุนดิชของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์การค้า พบว่าค่า  $R^2$  สอดคล้องกับ ไอโซ เทอร์มแลงเมียร์ ซึ่งแสดงกลไกการดูดซับไอโอดีนของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์การค้าเป็นแบบชั้นเดียว

8. ศึกษาพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางและ ถ่านกัมมันต์การค้าด้วยเครื่อง Bet Surface Area Analyzer, BET พบว่า ถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางและ ถ่านกัมมันต์การค้า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 11.2559 272.9240 และ 901.1500 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ แสดงว่า การกระตุ้นด้วยกรดทำให้ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง มีพื้นที่ผิวมากกว่า ถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกหูกวาง

ถ่านกัมมันต์การค้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถ่านทั้งสองชนิดจากลูกหูกวาง ซึ่งข้อมูลที่ได้ สอดคล้องกับผลการทดลองเรื่องปริมาณการดูดซับ ไอโอดีน ทั้งนี้เหตุที่ ถ่านกัมมันต์การค้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด เป็นเพราะว่าถ่านกัมมันต์การค้าถูกเผาที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ทำให้หมู่คาร์บอนิลหลุดออกเป็นจำนวนมาก ทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์การค้ามีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวจำเพาะจึงมากกว่าถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง ซึ่งในการทดลองเผาถ่านในงานวิจัยนี้ เตาเผาไม่สามารถทำให้บรรยากาศได้จริง ๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า 550 องศาเซลเซียส ถ่านจะกลายเป็นเถ้า และการที่ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ก็เนื่องจากว่าทำการกระตุ้นถ่านด้วยกรดซัลฟูริก ซึ่งกรดซัลฟูริกทำให้ หมู่คาร์บอนิลหลุดออกจึงทำให้ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางมีรูพรุนมากขึ้น

9. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางและถ่านกัมมันต์การค้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่า สภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง ที่เตรียมจากการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการกระตุ้นนาน 60 นาที ด้วยอัตราส่วนถ่านต่อกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1:3 ซึ่งมีกำลังขยาย 2000 เท่า จะเห็นว่าถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกมีจำนวนรูพรุนมากขึ้นกว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์การค้า พบว่า ถ่านกัมมันต์การค้ามีจำนวนรูพรุนมากกว่าถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง เนื่องจากถ่านกัมมันต์การค้าถูกเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลทำให้หมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวหลุดออกไปเป็นก๊าซ  $CO_2$  จึงทำให้ถ่านกัมมันต์การค้าดูดไอโอดีนได้ดี

10. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันนอลบนพื้นที่ผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางและ ถ่านกัมมันต์การค้าด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR พบว่า สเปกตรัมของ ถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง มีแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันนอลในช่วงต่างๆ ดังนี้



, C=O, C=C, C-OH, C=C-H, Aromatic ring

โครงสร้างของเซลล์พืชประกอบไปด้วยเซลลูโลส ซึ่งเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกลูโคส ต่อกัน เมื่อให้ความร้อนแก่ เซลล์พืช จะเกิดการสูญเสียน้ำในโมเลกุลทำให้กลูโคสเปลี่ยนเป็น Aromatic ring ส่วนหมู่ C=O ยังคงเหลืออยู่ ดังนั้น ในการทดลองขั้นต่อไปจะศึกษาอุณหภูมิและ เวลาในเผาการถ่านให้เป็นถ่านคาร์บอนไนซ์ เพื่อปรับหมู่ฟังก์ชันนอลให้เหมาะสมกับการดูดซับ สารที่มีประจุ เช่น โครเมียม (III) ไอออน

จากการศึกษาไอโอดีน นัมเบอร์ การหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาด ของรูพรุน ให้ผลสอดคล้องกันคือถ่านกัมมันต์การค้ามีพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุด รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง และน้อยที่สุดคือถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกहुกวาง ซึ่งขนาดของพื้นที่ ผิวสัมผัสจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับ จากงานวิจัยนี้ยังพบว่า ถ่านกัมมันต์การค้า สามารถดูด ไอโอดีน ได้ดีมากโดยมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ประมาณ 1000 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่า ถ่านกัมมันต์การค้ามีความสามารถในการดูดซับ โมเลกุล ไม่มีขั้วอย่างเช่น ไอโอดีน ได้ดีมาก แสดงว่าบนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์การค้ามีปริมาณคาร์บอนอะตอมจับกันอยู่เป็นจำนวน มากกว่าคาร์บอนในหมู่คาร์บอนิลที่มีขั้ว ซึ่งข้อมูลที่ได้ตรงกับขบวนการผลิตของถ่านกัมมันต์ การค้าคือเผาที่อุณหภูมิสูงมากภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนทำให้ได้คาร์บอนที่ใกล้เคียงกับ แกรไฟต์ ส่วนถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ประมาณ 500 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าสามารถดูดซับ โมเลกุล ไม่มีขั้วได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์การค้า แสดงว่าถ่านกัมมันต์จาก ลูกहुกวางมีความเป็น โมเลกุล ไม่มีขั้วน้อยกว่า แต่ถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางน่าจะเป็นความเป็น โมเลกุลมีขั้วมากกว่าถ่านกัมมันต์การค้า ดังนั้นจึงน่าจะนำถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางไปดูดซับ สารพวกโมเลกุลมีขั้ว หรือไอออนของโลหะได้ดีกว่า ดังนั้นเมื่อนำถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางไป ดูดซับโครเมียม (III) ไอออน น่าจะดูดซับ โครเมียม (III) ไอออน ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์การค้า จึง ควรจะต้องทำการวิจัยในขั้นต่อไป

การศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์และการใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย นั้นมีอยู่อย่างแพร่หลาย ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะนำวัสดุที่เหลือใช้ที่มีมากในท้องถิ่นทำการวิจัยมา ผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อลดต้นทุนการสั่งซื้อถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ โดยนำถ่านกัมมันต์ที่ ได้มาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียในแหล่งน้ำต่างๆ

ปีพ.ศ.2544 พลัญฐ์ โสภณาภิจ โภศล [12] ทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก เพื่อนำไปใช้ดูดซับโลหะโครเมียม (VI) ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรม ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผาถ่าน (Carbonization) อยู่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ในสภาวะอับอากาศและสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 1050 มิลลิกรัม มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเท่ากับ 975 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะโครเมียม (VI) ในสารละลายโครเมียมมีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 2.5 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ให้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 69.80 ในขณะที่ถ่านกัมมันต์อ้างอิง YAO 12/40 ให้ร้อยละการดูดซับโครเมียมเพียง 56.96 เท่านั้น

ปีพ.ศ.2549 ัญฐยา พูนสุวรรณ และคณะ[18] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ความพรุนสูงจากขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานกากน้ำตาลโดยใช้วิธีกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิกระตุ้น 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดที่ 1574 ตารางเมตรต่อกรัม แล้วนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้ไปใช้กำจัดโครเมียม (VI) โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต พบว่าเมื่อดูดซับโครเมียมในสารละลายที่ความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 2.5 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 82 เปอร์เซ็นต์ การดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในช่วง 30 – 40 องศาเซลเซียส สมการแลงเมียร์สามารถใช้อธิบายไอโซเทอรั่มการดูดซับโครเมียมจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ได้เป็นอย่างดี

ปีพ.ศ.2551 โกวิทย์ ปิยะมังกลาและคณะ[14] ได้ศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะแบบถังเดียวโดยใช้ไคโตซานเรซิน พบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นที่ความเป็นกรดต่าง 2 ปริมาณ 47.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอรั่มการดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์

ปีพ.ศ. 2551 Jamil, A และคณะ[19] ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) ไอออน และสังกะสี (II) บนพื้นผิวของเปลือกถั่วลิสง โดยศึกษาผลของปริมาณถ่าน ความเป็นกรดต่าง เวลาสัมผัส และ เวลาบั่นกวนต่อการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าเปลือกถั่วมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด ซึ่งสามารถกำจัดโครเมียม (III) ไอออน ได้ถึงร้อยละ 80.92 และสังกะสี (II) ร้อยละ 75.11 โดยได้พัฒนาการดูดซับที่สมดุลของโลหะทั้ง 2 ชนิด ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอรั่มฟรุนดลิชและไอโซเทอรั่มแลงเมียร์ ปริมาณของโครเมียม (III) ไอออน และสังกะสี (II) สูงที่สุดที่ถูกดูดซับ ( $Q_{max}$ ) ซึ่งประเมินด้วยไอโซเทอรั่มแลงเมียร์เท่ากับ 1.88 มิลลิกรัมและ 1.45 มิลลิกรัมต่อผงของเปลือกถั่ว 1

### กรรมตามลำดับ

ปีพ.ศ. 2552 Indu, S. และ Dinesh G. [20] ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยจุลินทรีย์ในน้ำเสียที่เป็นผลพลอยได้จากการหมักยาในโรงงานอุตสาหกรรมกลไกการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน เป็นการทดลองแบบแบ่งช่วงเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม (III) ไอออน ปริมาณสารดูดซับและความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกันเปอร์เซ็นต์ การกำจัดโครเมียม (III) ไอออน สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 73.9 ที่ความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 4 โดยใช้ปริมาณจุลินทรีย์เท่ากับร้อยละ 1

ปีพ.ศ. 2552 ปรารักษ์ทอง ไชยสิทธิ์ และปองพล สมบุญ [21] ทำการศึกษาการเตรียมผงถ่านคาร์บอนไนซ์และผงถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาสำหรับใช้เป็นสารดูดซับโลหะโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสีย พบว่า สภาวะเหมาะสมในการเตรียมผงถ่านคาร์บอนไนซ์ คือ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 90 นาที จากนั้นทำการกระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์เพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ในอัตราผงถ่านหนึ่งส่วนต่อกรดห้าส่วนและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวของวัสดุด้วยเครื่องบราวเนอร์เอมเมทเทลเลอร์ (BET) พบว่าถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์กระตุ้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 45.76 และ 328.41 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบหาพื้นที่ผิวด้วยวิธีเมทีลินบลู โดยพบว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ (287.61 ตารางเมตรต่อกรัม) มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าถ่านกัมมันต์กระตุ้น (308.80 ตารางเมตรต่อกรัม) จากนั้นศึกษาความสามารถของการดูดซับโลหะโครเมียม (III) ไอออน ของผงถ่านทั้งสองชนิดในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะโครเมียม 1000 พีพีเอ็ม พบว่าผงถ่านทั้งสองแสดงประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีที่สุด เมื่อใช้ผงถ่านปริมาณ 1.5 กรัม และควบคุมความเป็นกรดต่าง ให้เท่ากับ 4 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์เท่ากับ 0.9702 และ 0.9754 สำหรับถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์กระตุ้น ตามลำดับ ขณะที่ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ค่า  $R^2$  จากไอโซเทอมของการดูดซับด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์ (0.9941) มีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์กระตุ้น (0.9953) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการดูดซับโลหะโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD พบว่าความสามารถในการดูดซับของถ่านคาร์บอนไนซ์คิดเป็นร้อยละ 64.49 และมีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์กระตุ้น ซึ่งสามารถดูดซับได้ถึงร้อยละ 73.36 แม้ว่าผงถ่านสังเคราะห์ทั้งสองชนิดจะสามารถดูดซับโลหะโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียได้เช่นเดียวกัน

ปีพ.ศ. 2552 ยงยุทธ ขุนไกร และอภิสิทธิ์ หนูวงษ์หนองรี [11] ศึกษาการเตรียมผงถ่านคาร์บอนไนซ์และผงถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง สำหรับใช้เป็นสารดูดซับสีชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ โดยผงถ่านคาร์บอนไนซ์ดังกล่าวสามารถเตรียมได้จากการเผาลูกहुกวางที่อุณหภูมิ



500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขณะที่ผงถ่านกัมมันต์นั้นเตรียมได้โดยกระตุ้นผงถ่านคาร์บอนไนซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวของการดูดซับในผงถ่านสังเคราะห์ทั้งสองชนิดด้วยเครื่องบราวเนอร์เอ็มเมทเทลเลอร์ (BET) และเมทิลีนบลูพบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกันคือ พื้นที่ผิวจำเพาะของผงถ่านคาร์บอนไนซ์มีขนาดเล็กกว่าที่พบในผงถ่านกัมมันต์ และเมื่อนำผงถ่านสังเคราะห์ทั้งสองชนิดมาศึกษาความสามารถของการดูดซับสีชนิดต่างๆ ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสี (แดง เหลือง น้ำเงิน) 100 พีพีเอ็ม พบว่า ผงถ่านทั้งสองแสดงประสิทธิภาพการดูดซับได้ดี โดยถ่านคาร์บอนไนซ์มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับสีชนิดต่างๆ ในน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอทั้งก่อนเข้าระบบบำบัดและหลังออกจากระบบบำบัด โดยที่ถ่านคาร์บอนไนซ์แสดงประสิทธิภาพการดูดซับได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้สามารถเตรียมสารดูดซับต้นทุนต่ำจากลูกहुกวาง และทราบว่าขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของผงถ่านที่สังเคราะห์ได้มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับสีชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### สารเคมี

1. โครเมียมคลอไรด์ (Chromium(III)chloride :  $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ; AR grade, SIGMA)
2. กรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก (Conc. Nitric acid :  $\text{HNO}_3$  ; AR grade, Qrec)
3. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide :  $\text{KOH}$  ; AR grade, UNIVAR)
4. สารมาตรฐาน โครเมียมสำหรับวิเคราะห์ (standard Cr 1000 mg/L ( $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$  in 0.5 mol/L  $\text{HNO}_3$ ), MERCK)
5. ถ่านกัมมันต์การค้า Activated charcoal (Fluka analytical, 05120, Particle size 75% < 40  $\mu\text{m}$ )

##### อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption spectrometer, SpectrAA, PerkinElmer)
2. เครื่องยูวี – วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer, Genesys 20)
3. เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (incubator Shaker set, 28L B/S/C)
4. เครื่องวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR, Perkin-Elmer spectrum 100)
5. เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง (Balance  $\pm 0.0001$  g, Melter Toledo, AB 204-S)
6. เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง (Balance  $\pm 0.01$  g, Melter Toledo, JL602-G)
7. ตู้อบแห้งชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Oven set, Memmert UFB 500)
8. เตาเผา (Furnace, Lenton PO BOX 2031)
9. เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง (pH Meter, Suntex SP -701)
9. เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator Shaker set, 28L B/S/C)
10. เครื่องกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)



### 3.2 การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 250 มิลลิลิตร  
ชั่ง  $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.1281 กรัม ละลายด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 1 นอร์มอล จนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโครเมียม (III) ไอออน เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม
2. สารละลายมาตรฐานโครเมียม (III) ไอออน  
เปิดสารละลายมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง atomic absorption 1000 พีพีเอ็ม มา 2.00, 4.00, 6.00, 8.00 และ 10.00 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จนมีปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร จะได้สารมาตรฐาน 20, 40, 60, 80 และ 100 พีพีเอ็ม ตามลำดับ
3. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 นอร์มอล  
ตวงกรดไนตริกเข้มข้นมาประมาณ 140 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จนมีปริมาตร 2000 มิลลิลิตร

### 3.2 วิธีการทดลอง

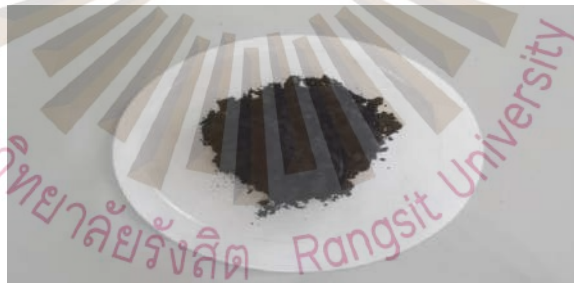
1. การเตรียมถ่านคาร์บอนจากลูกหูกวาง
  - 1.1 ทำความสะอาดลูกหูกวาง
  - 1.2 นำลูกหูกวางตากแห้ง 1 วัน หลังจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบแห้งชนิดควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 120 นาที
  - 1.3 บดลูกหูกวางให้มีขนาดเล็กลงเพื่อง่ายต่อการเผา  
เผาลูกหูกวางที่อุณหภูมิและระยะเวลา ดังนี้  
- อุณหภูมิ  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$   
- ระยะเวลา 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง
  - 1.4 บดถ่านคาร์บอนที่ได้ให้มีขนาด  $< 300\text{ }\mu\text{m}$  (50 mesh)
  - 1.5 นำถ่านคาร์บอนที่ได้ไปหาประสิทธิภาพในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออน เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอน



ภาพที่ 3.1 ลูกหูกวางหลังจากตากแห้ง 1 วัน



ภาพที่ 3.2 ถ่านที่เผาได้จากลูกหูกวาง



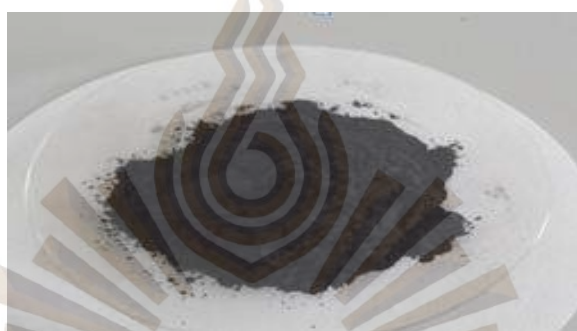
ภาพที่ 3.3 ถ่านที่ผ่านการบดแล้ว



ภาพที่ 3.4 ตู้อบแห้งชนิดควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.5 ถ่านผสมสารละลายกรดซัลฟิวริก 50%w/w อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 3.6 ถ่านกัมมันต์จากลูกหวากวางอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที

## 2. หาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอน

2.1 ชั่งถ่านคาร์บอนทั้ง 9 ชนิด อย่างละ 0.50 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

2.2 ปิเปตสารละลายโครเมียม (III) ไอออน เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ที่ได้ในข้อ 2.1

2.3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

2.4 นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1

2.5 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปตรวจหาปริมาณ โครเมียมที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิก แอปซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร

2.6 นำความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโครเมียม

### 3. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่านคาร์บอนไนซ์

นำถ่านคาร์บอนไนซ์ไปบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำไปอัดเป็นแผ่น (pallet) จากนั้นตรวจด้วยเครื่อง FT-IR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน

### 4. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง

4.1 นำถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมมาบดให้มีขนาด  $< 38 \mu\text{m}$  (400 mesh)

4.2 ชั่งถ่านคาร์บอนไนซ์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 1:1 1:2 1:3 (น้ำหนัก: น้ำหนัก) โดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำ DI แล้วเทลงให้ท่วมถ่านในถ้วยครุซีเบล

4.3 นำไปเผากระตุ้นที่และระยะเวลา ดังนี้

- อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  และ  $500^\circ\text{C}$

- ระยะเวลา 1 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง

4.4 นำถ่านกัมมันต์มาปรับสภาพให้เป็นกลางด้วย 0.6 M ไฮโดรคลอริก และ 0.6 M โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนมีค่า pH ประมาณ 7

4.5 นำถ่านกัมมันต์ไปหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น

### 5. หาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการกระตุ้น

5.1 ชั่งถ่านกัมมันต์ทั้ง 27 ชนิด อย่างละ 0.25 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

5.2 ปีปตสารละลายโครเมียม (III) ไอออน เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ที่ได้ในข้อ 5.1

5.3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1

5.4 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปตรวจหาปริมาณโครเมียมที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิก แอปซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร

5.5 นำความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโครเมียม ใน

หน่วย มิลลิกรัมตัวถูกดูดซับ ต่อ กรัมตัวดูดซับ

## 6. การศึกษาหาค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์หลังจากการกระตุ้น

- 6.1 นำถ่านคาร์บอนไนซ์ที่บดละเอียดไปกระตุ้นด้วยโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนของถ่านต่อโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 1:1 โดยน้ำหนัก
  - 6.2 นำถ่านกัมมันต์ไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที
  - 6.3 ชั่งถ่านคาร์บอนไนซ์จากจากลูกหูกวางอย่างละ 0.50 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จำนวน 4 ใบ ปิเปตสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ลงในถ่านกัมมันต์ที่ชั่งไว้แล้วทุกใบ
  - 6.4 ปรับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเป็น 2 3 4 และ 5
  - 6.5 ชั่งถ่านกัมมันต์จากจากลูกหูกวางอย่างละ 0.25 กรัมทำเช่นเดียวกัน ตามข้อ 6.3
- 6.4
- 6.6 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
  - 6.7 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปตรวจหาปริมาณ โครเมียมที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิก แอปซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร
  - 6.8 นำความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณ

## 7. ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออนที่เหมาะสม

- 7.1 ชั่งถ่านกัมมันต์และถ่านคาร์บอนไนซ์ที่อย่างละ 0.25 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
- 7.2 ปิเปตสารละลายโครเมียม (III) ไอออน เข้มข้น 10 25 50 75 และ 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมนลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ที่ได้ในข้อ 7.1
- 7.3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1
- 7.4 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปตรวจหาปริมาณ โครเมียมที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิก แอปซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร
- 7.5 นำความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณ
- 7.6 นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณไอโซเทอร์มต่างๆ



## 8. ศึกษาหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน

8.1 ชั่งถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์การค้า อย่างละ 0.25 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

8.2 ปิเปตสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ที่ได้ในข้อ 8.1

8.3 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

8.4 นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1

8.5 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปตรวจหาปริมาณโครเมียมที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร

8.6 นำความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับโครเมียม ในหน่วย มิลลิกรัมของโครเมียม (III) ไอออน ต่อ กรัมของถ่าน

## 9. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออน

9.1 อบถ่านคาร์บอนไนซ์ และ ถ่านกัมมันต์จากกลุ่กหูกวาง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ เก็บไว้ในเดสิเคเตอร์

9.2 ชั่งถ่านคาร์บอนไนซ์จากจากกลุ่กหูกวาง 0.25 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตรลงในที่ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ชั่งไว้แล้ว

9.3 ชั่งถ่านกัมมันต์จากจากกลุ่กหูกวาง 0.125 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตรลงในถ่านกัมมันต์ที่ชั่งไว้แล้ว

9.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 6 9 12 15 20 30 และ 40 นาที

9.5 นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42

9.6 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวัดด้วยเครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร และคำนวณ

## 10. ศึกษาการดูดซับโครเมียมในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD

10.1 อบถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางและถ่านกัมมันต์การค้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

10.2 ชั่งถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางหนัก 0.125 กรัม และถ่านคาร์บอนินซ์หนัก 0.25 กรัม ชั่งถ่านกัมมันต์การค้า 0.50 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250.00 มิลลิลิตร 3 ใบ

10.3 ปิเปตน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ที่เจือจางลง 10 เท่า ( COD มีโครเมียม (III) ไอออน ประมาณ 1000 พีพีเอ็ม ปิเปตมา 10.00 มิลลิลิตรจากนั้นเติมน้ำจนสารละลายมีปริมาตรเป็น 100.00 มิลลิลิตร) ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมน้ำ DI ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพู่ที่ได้ในข้อ 10.2

10.4 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

10.5 นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42

10.6 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวัดด้วยเครื่องอะตอมมิก แอบซอร์พชั่นสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร

10.7 ศึกษาการดูดซับโครเมียมในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านคาร์บอนินซ์ กัมมันต์จากลูกหูกวางและถ่านกัมมันต์การค้า

## บทที่ 4

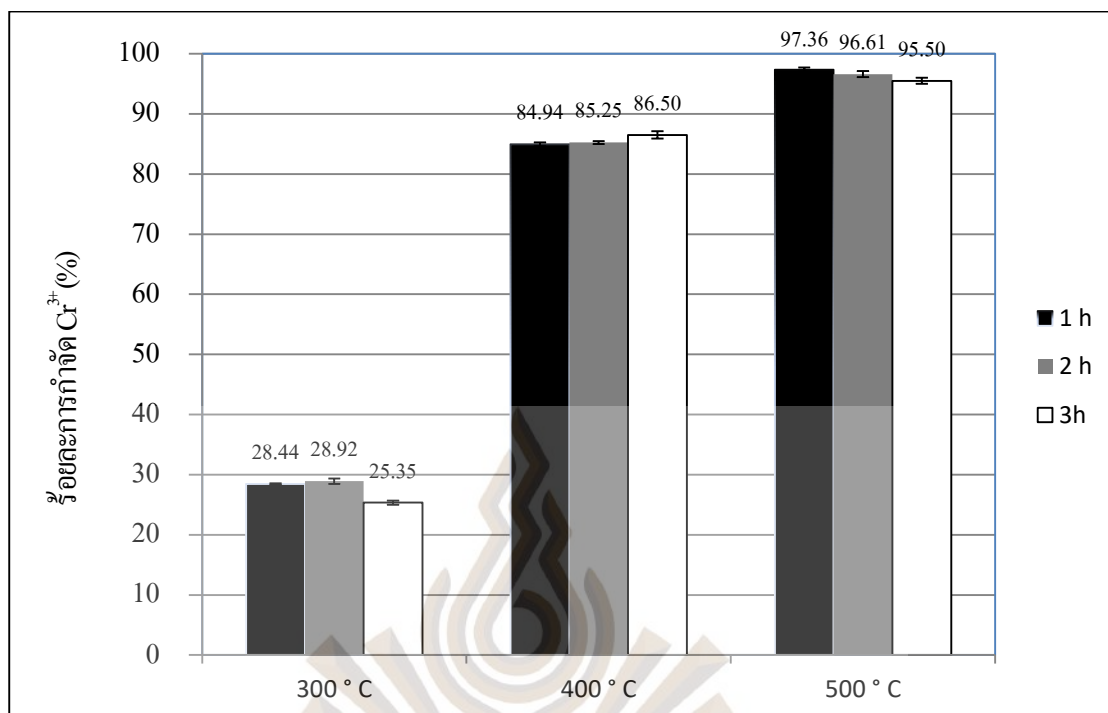
### ผลงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออนในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่า COD ได้ทำการศึกษาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับโครเมียม คือ ลูกหูกวางบริเวณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
2. ศึกษาอุณหภูมิ (300 – 500 °C) และระยะเวลา (60 – 180 นาที) ที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ถ่านจากลูกหูกวางโดยใช้การดูดซับโครเมียม (III) ไอออน
3. ผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางโดยการกระตุ้นด้วยโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออน
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกหูกวางด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR ที่ผลิตได้ทุกสภาวะ
5. ศึกษาการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำเสียสังเคราะห์ หาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน และศึกษากลไกการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนหรือฟิสิกส์
6. ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรืออันดับสอง
7. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยถ่านกระตุ้นและถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกหูกวาง

#### 4.1 หาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) เพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์

จากการทดลองหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ลูกหูกวางให้เป็นถ่าน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับจากนั้นทำการทดสอบหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) โดยใช้ถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิ 0.25 กรัม นำไปดูดซับสารละลายโครเมียม (III) เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาที่สภาวะต่าง ๆ

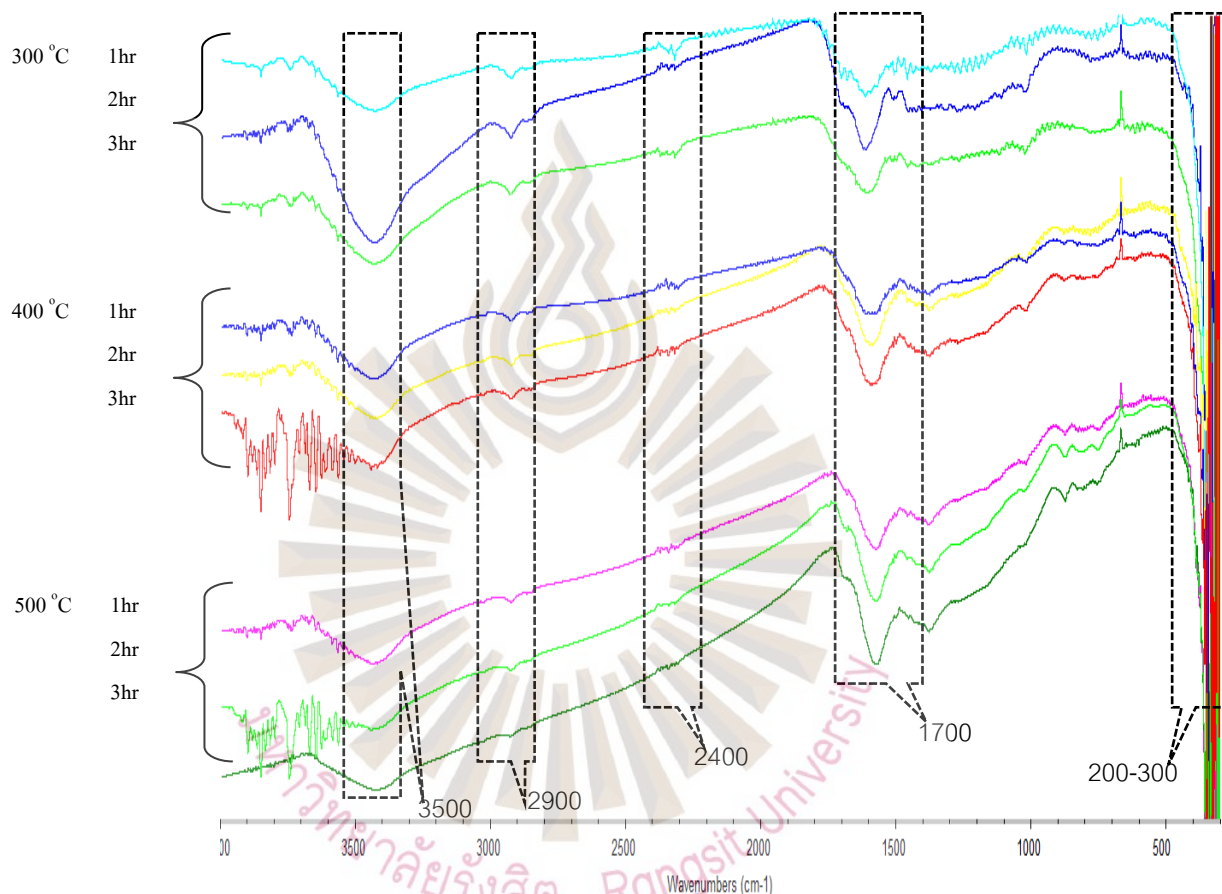
หมายเหตุ Error Bars ที่แสดงในกราฟ คือ  $\pm$ SD (Standard Deviation)  $n = 3$

จากผลการทดลองพบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถกำจัดโครเมียม (III) ได้สูงที่สุดคือ 97.36 % จึงเลือกอุณหภูมิและระยะเวลาในการคาร์บอนไนซ์ลูกหูกวางให้เป็นถ่าน ซึ่งเป็นเวลาและอุณหภูมิที่ดีที่สุดของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เตรียมได้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ทำก่อนหน้านี้ พบสำหรับอุณหภูมิและเวลาในการเผาถ่านคาร์บอนไนซ์แล้วสามารถดูดซับไอโอดีนได้ดีคืออยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส คาร์บอนจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศ หมูคาร์บอนิลจะแตกตัวออกจากโครงสร้างของถ่าน เมื่อการเผาใช้เวลานานขึ้นหมูคาร์บอนิลจะหลุดออกจากโครงสร้างได้มากขึ้น ถ่านจะมีความเป็นกราฟิต์มากยิ่งขึ้น ถ่านคาร์บอนไนซ์ก็จะมีควมมีขั้วน้อยลง จะดูดซับสารพวกโมเลกุลไม่มีขั้ว เช่น ไอโอดีน ได้ดี ในทางตรงข้ามเมื่อการเผาน้อยลงหมูคาร์บอนิลจะหลุดออกจากโครงสร้างได้น้อยลง ถ่านคาร์บอนไนซ์ก็จะมีควมมีขั้วมากขึ้น จะดูดซับสารพวกโมเลกุลมีขั้ว หรือไอออนได้ดีขึ้น

#### 4.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่าน

นำถ่านคาร์บอนไนซ์ทั้ง 9 ชนิด ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเครื่อง FT-IR ได้พิกัด  
ภาพที่ 4.2



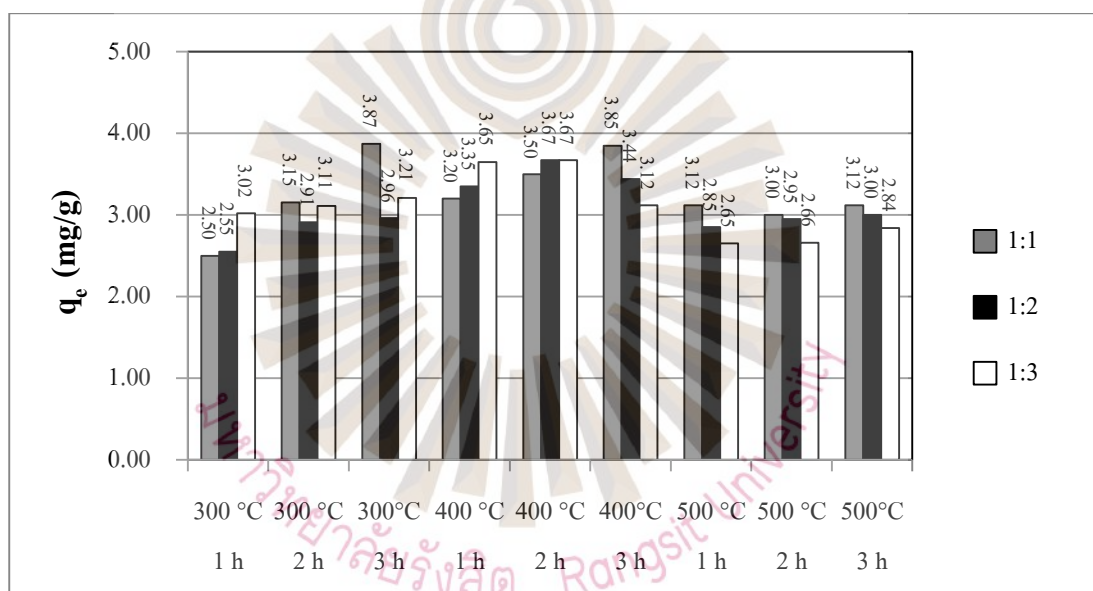
ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าเกิดพิกที่บริเวณ  $3500\text{ cm}^{-1}$ ,  $2900\text{ cm}^{-1}$ ,  $2400\text{ cm}^{-1}$ ,  $1700\text{ cm}^{-1}$  และ  $200\text{-}300\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่ามีหมู่  $\text{-OH}$ ,  $\text{CH-stretching}$ , possibly aromatic aldehyde,  $\text{C=O}$  และ  $\text{CH-bending}$  ในทุก ๆ อุณหภูมิและระยะเวลา แสดงว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ผลิตได้ มีหมู่ฟังก์ชันนัลที่สามารถดูดซับโมเลกุลมีขั้ว และไอออนได้



#### 4.3 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง

จากการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกहुกวางให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนของถ่านต่อตัวกระตุ้นที่ 1:1 1:2 และ 1:3 เปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ 1 2 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นทดสอบหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้ 0.25 กรัม นำไปดูดซับสารละลายโครเมียม (III) เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านให้เป็นถ่านกัมมันต์ ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.3



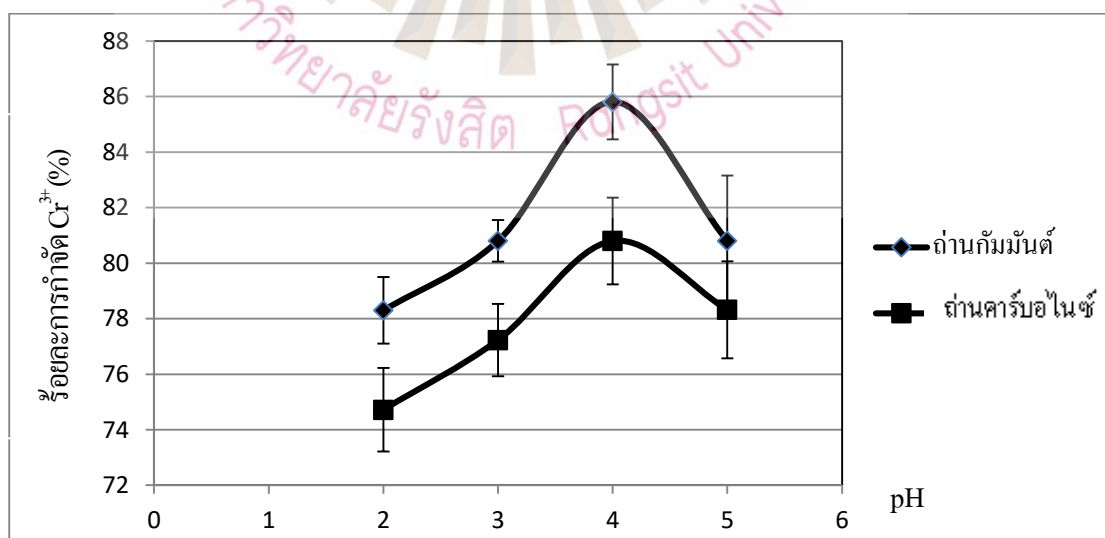
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยอัตราส่วนต่างๆและเผากระตุ้นด้วยอุณหภูมิและเวลาต่างๆ

จากผลการทดลองใช้ถ่าน 0.25 กรัม ในการดูดซับโครเมียม (III) เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10 มิลลิลิตรพบว่า การกระตุ้นด้วยอัตราส่วนถ่านต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 ต่อ 1 และทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถดูดซับโครเมียม (III) ได้สูงที่สุดคือมีค่าความสามารถการดูดซับ ( $q_e$ ) เท่ากับ 3.87 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เนื่องจากในขั้นตอนการล้างหลังการเผากระตุ้น สารละลายมีสีน้ำตาลเข้มเนื่องจากในการกระตุ้นใช้โพแทสเซียมไฮดรอก

ไซค์เป็นสารกระตุ้น สารลิกนินและแทนนินสามารถละลายได้ในโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นในสารละลายจึงมีลิกนินและแทนนินปนอยู่ในปริมาณมากจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการล้างนาน จึงเลือกการกระตุ้นด้วยอัตราส่วนถ่านต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 ต่อ 1 และทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่มีค่าความสามารถการดูดซับ ( $q_e$ ) เท่ากับ 3.85 มิลลิกรัมต่อกรัม ในการกระตุ้นถ่านคาร์บอนให้เป็นถ่านกัมมันต์ เพราะมีความสามารถในการดูดซับรองลงมาแต่การล้างทำได้ง่ายกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าลิกนินและแทนนินถูกทำลายไป ถ่านที่เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นได้ว่าในขณะที่ล้างสารละลายจะไม่มีสีเลย

#### 4.4 การศึกษาหาค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์หลังจากการกระตุ้น

ซึ่งถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากจากลูกทุกวาง 0.25 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จำนวน 8 ใบ ปิดสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ลงในถ่านกัมมันต์ที่ซั่งไว้แล้วทุกใบ ปรับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเป็น 2 3 4 และ 5 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปตรวจหาปริมาณโครเมียมที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิค แอบซอร์พชั่นสเปคโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร นำความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณ และคำนวณค่า  $q_e$  ที่ pH ต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 แสดงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ที่ pH ต่าง ๆ

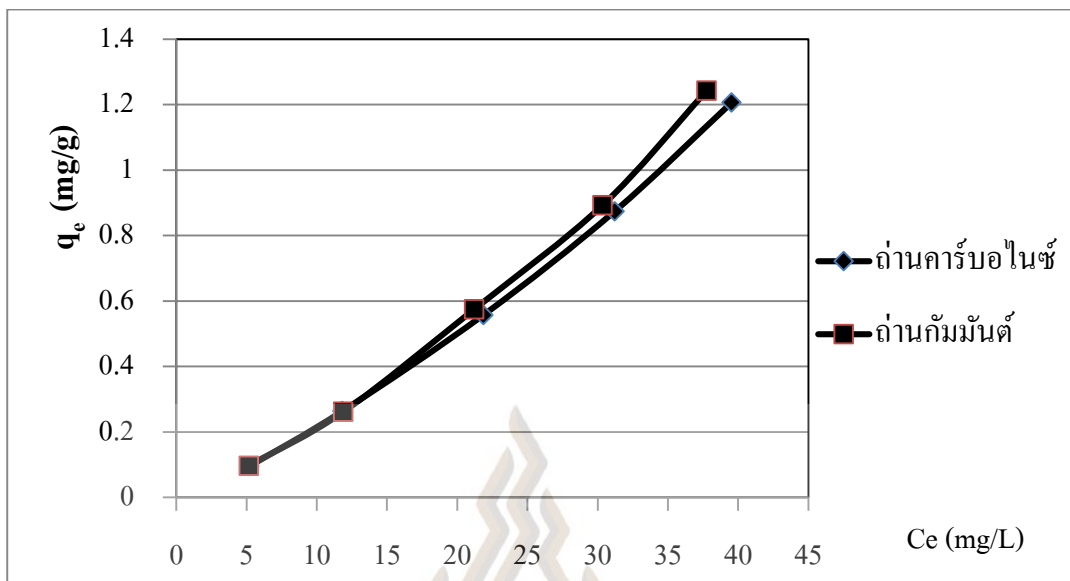
หมายเหตุ Error Bars ที่แสดงในกราฟ คือ  $\pm$ SD (Standard Deviation)  $n = 3$

จากภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเท่ากับ 4 จะให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงสุดทั้งถ่านกระตุ้นและถ่านคาร์บอนไนซ์ โดยถ่านกระตุ้นให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับร้อยละ 85.81 ส่วนถ่านคาร์บอนไนซ์ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับร้อยละ 80.80 ซึ่งความสามารถในการกำจัดจะลดลงเมื่อค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่า 4 เนื่องจากโครเมียม (III) ไอออนจะจับกับไฮดรอกไซด์ของโซเดียมที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดต่างให้สูงขึ้น จนเกิดเป็นตะกอนของโครเมียมไฮดรอกไซด์ และที่ค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 4 จะมีโปรตอนจำนวนมากเข้ามาปิดล้อมพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้โครเมียม (III) ไอออนเข้ายึดเกาะบนพื้นผิวและเกิดการดูดซับได้น้อยกว่าที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4 และจากการทดลองพบว่าเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ปรับค่า pH ให้เป็นกลาง แล้วนำมาเติมสารละลายสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตรแล้วสารละลายที่ได้จะมี pH ประมาณ 4.0 ดังนั้นในการดูดซับสารละลายสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ จึงไม่ต้องทำการปรับค่า pH

#### 4.5 การศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออน

การศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออนในการดูดซับของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง เพื่อนำมาศึกษาความสัมพันธ์ในการดูดซับว่าเป็นไปตามไอโซเทอรัมของแลงเมียร์หรือฟรุนดลิช

ศึกษาการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน โดยใช้ถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางเป็นตัวดูดซับ นำถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ จากลูกหูกวางปริมาณอย่างละ 0.50 กรัมไปดูดซับสารละลายโครเมียม (III) เข้มข้น 10 25 50 75 และ 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีโดยใช้อุณหภูมิในการเขย่า 30 องศาเซลเซียส นำผลการวิเคราะห์ไปคำนวณค่า  $q_c$  (mg/g) และ  $C_c$  (mg/L) ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แสดงการค่าการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนระหว่างค่า  $q_c$  และ  $C_e$

ด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหวาก

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออน ในสารละลาย จาก 10 พีพีเอ็ม ไปจนถึง 100 พีพีเอ็ม พบว่าความสามารถในการกำจัดโครเมียม (III) ไอออน เพิ่มขึ้น โดยดูจากค่า  $q_c$  ที่เพิ่มมากขึ้น และที่เลือกความเข้มข้นโครเมียม (III) ไอออนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม เป็นความเข้มข้นสุดท้าย เนื่องจาก เครื่องอะตอมมิค แอบซอร์พชั่นสเปคโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0 นาโนเมตร เครื่องจะสามารถวัดความเข้มข้นได้แม่นยำในช่วงความเข้มข้นไม่เกิน 100 พีพีเอ็ม จึงทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออนสูงสุดแค่ 100 พีพีเอ็ม

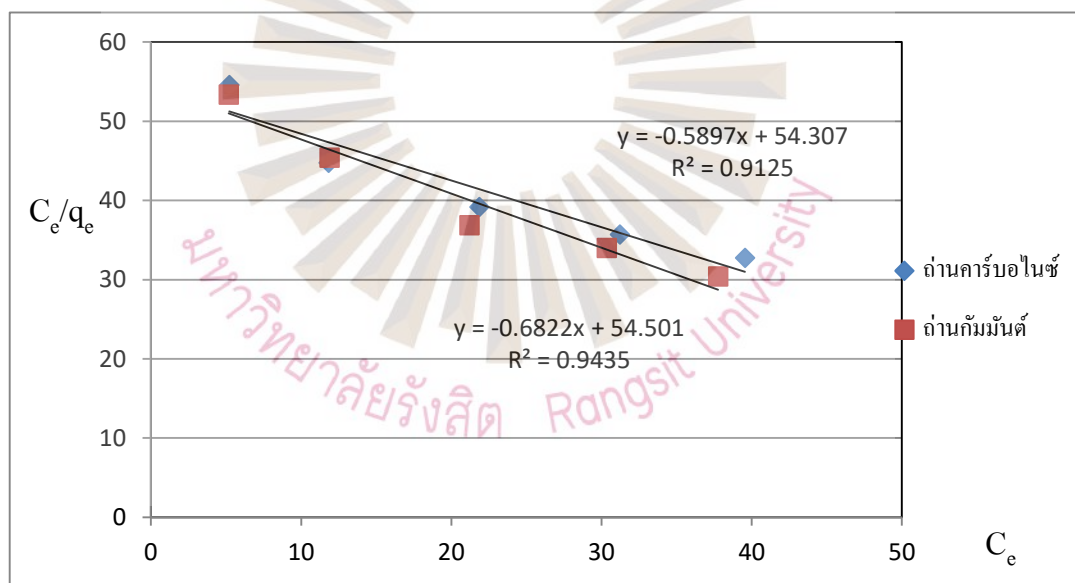
จากผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_c$  (mg/g) และ  $C_e$  (mg/L) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับ ดังภาพที่ 4.5 พบว่า การดูดซับโครเมียม (III) ไอออน บนพื้นผิวของถ่านทั้งสองชนิดจะเป็นแบบ Type III Isotherm (ภาพที่ 2.8 c) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่านันต์ Type II Isotherm (ภาพที่ 2.8 b) ) โดยจะเกิดบน nonporous powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า microporous (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point of knee of isotherm) เกิดขึ้นเมื่อการดูดซับบนผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว และถ้าเพิ่ม relative pressure ( $C_e$ ) จะทำการดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ multilayer Type III Isotherm (ภาพที่ 2.8 c) การดูดซับที่เพิ่มขึ้นเกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่า เกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

#### 4.6 ผลของความสัมพันธ์ในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกหวาก กับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาปริมาณความเข้มข้น โครเมียม (III) ไอออนที่เหมาะสมของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกหวากมาศึกษาความสัมพันธ์ในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์

$$\text{สมการเส้นตรงแสดงการดูดซับแบบแลงเมียร์} \quad \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L Q_0} + \frac{C_e}{Q_0}$$

จากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\frac{C_e}{q_e}$  และค่า  $C_e$  คำนวณหาค่าความชัน  $(\frac{1}{Q_0})$  และจุดตัดแกน  $y (\frac{1}{K_L Q_0})$



ภาพที่ 4.6 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์แสดงการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหวาก



จากผลการทดลองพบว่า กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\frac{C_e}{q_e}$  และค่า  $C_e$  คำนวณหาค่าความชัน ( $\frac{1}{Q_0}$ ) ได้ค่าเป็นลบ แสดงว่า ค่า  $Q_0$  ที่จะคำนวณจากค่าความชันก็จะติดลบไปด้วย โดยปกติค่า  $Q_0$  ควรจะมีค่าเป็นบวก แสดงว่าความชันต้องเป็นบวกด้วย

ถ้าพิจารณาจากการเขียนกราฟระหว่างค่า  $\frac{C_e}{q_e}$  (แกน y) และ  $C_e$  (แกน x) ถ้าสมมติให้ ในระบบมี  $q_e$  คงที่ตลอด จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงและมีความชันเป็นบวก ( $\frac{C_e}{q_e}$  จะแปรผันตรงกับ  $C_e$ ) ถ้า ในระบบมี  $q_e$  เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงและมีความชันเป็นบวกเช่นกัน ( $\frac{C_e}{q_e}$  จะแปรผันตรงกับ  $C_e$ ) แต่ถ้าในระบบมี  $q_e$  เพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่การดูดซับเป็นแบบ หลายชั้นมาก ๆ (แบบ Type III Isotherm) จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงและมีความชันเป็นลบ ( $\frac{C_e}{q_e}$  จะแปรผกผันกับ  $C_e$ ) การคำนวณค่า  $Q_0$  ก็ติดลบตาม ซึ่งจากไอโซเทอร์มแลงเมียร์ การดูดซับจะถูกพิสูจน์มาจากการดูดซับแบบชั้นเดียว ดังนั้นถ้าการดูดซับเป็นแบบหลายชั้นมาก ๆ ก็จะไม่สามารถคำนวณได้ด้วยสมการของจากไอโซเทอร์มแลงเมียร์

จากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งสามารถคำนวณค่าตัวบ่งชี้ได้ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 4.1** ตัวบ่งชี้ที่ได้จากไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง

ชนิดของถ่าน	ตัวบ่งชี้ที่คำนวณจากสมการการดูดซับของไอโซเทอร์มแลงเมียร์		
	$Q_0$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$
ถ่านคาร์บอนไนซ์	-1.696	-50.685	0.9125
ถ่านกัมมันต์	-1.466	-52.244	0.9435

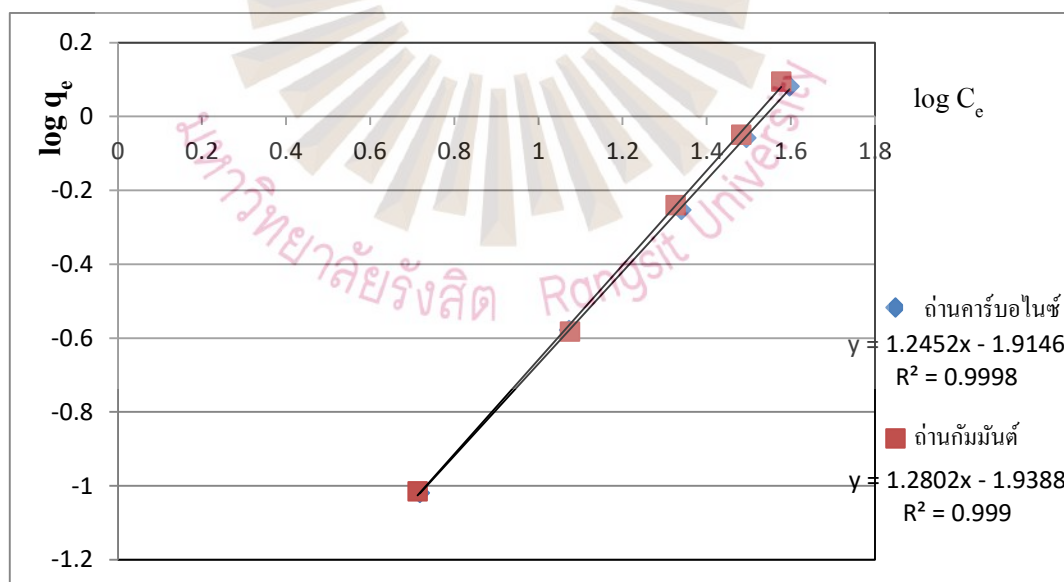
จากกราฟไอโซเทอร์มแลงเมียร์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ไอออน มีค่า เท่ากับ 0.9125 และ 0.9435 ตามลำดับ แสดงว่าถ่านทั้ง 2 ชนิดมีค่า  $R^2$  ไม่เข้าใกล้ 1 และค่า  $Q_0$  และค่า  $K_L$  มีค่าติดลบ แสดงว่าถ่านทั้ง 2 ชนิดไม่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ จึงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์

#### 4.7 ผลของความสัมพันธ์ในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางกับไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาปริมาณความเข้มข้น โครเมียม (III) ไอออนที่เหมาะสมของถ่านคาร์บอนไนซ์ มาศึกษาความสัมพันธ์ในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออน ด้วยไอโซเทอร์มฟรุนดลิช

$$\text{สมการเส้นตรงแสดงการดูดซับแบบฟรุนดลิช} \quad \log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e$$

จากสมการการดูดซับของฟรุนดลิช สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log C_e$  (แกน x) ค่า  $\log q_e$  (แกน y) จำนวนหาค่าความชัน ( $\frac{1}{n}$ ) และจุดตัดแกน y ( $\log K$ )



ภาพที่ 4.7 ไอโซเทอร์มฟรุนดลิชแสดงการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์และ

ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง

จากผลการทดลองพบว่า กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งสามารถคำนวณค่าตัวบ่งชี้ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ตัวบ่งชี้ที่ได้จากไอโซเทอร์มฟรุนดลิชของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหวาก

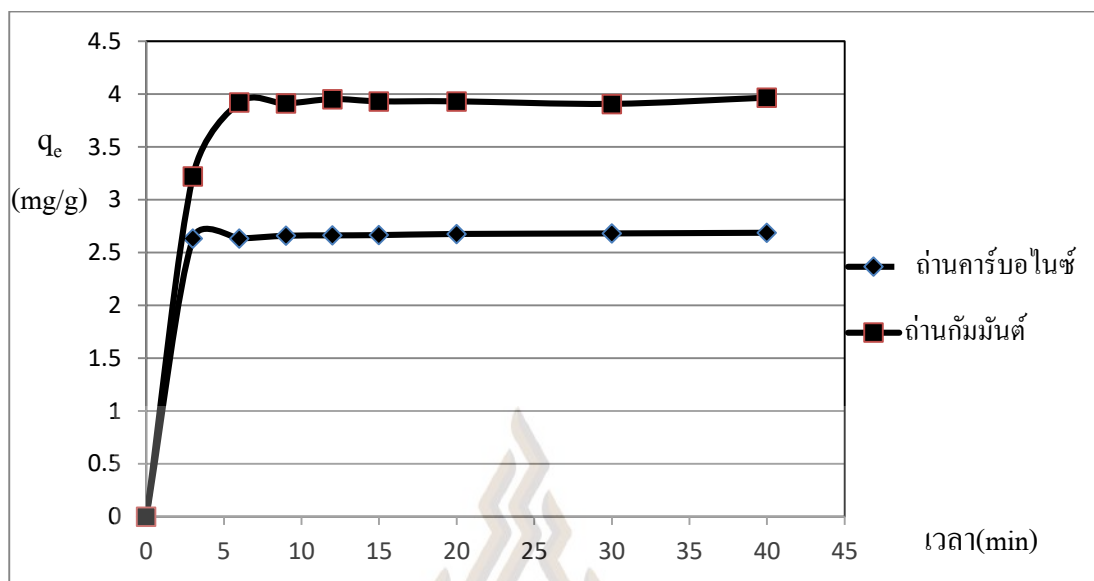
ชนิดของถ่าน	ตัวบ่งชี้ที่คำนวณจากสมการการดูดซับของไอโซเทอร์มฟรุนดลิช		
	$K_f$	$1/n$	$R^2$
ถ่านคาร์บอนไนซ์	0.0122	1.2450	0.9998
ถ่านกัมมันต์	0.0115	1.2801	0.9990

จากกราฟไอโซเทอร์มฟรุนดลิช พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกหวากมีค่าเท่ากับ 0.9998 และ 0.9990 ตามลำดับ แสดงว่าถ่านทั้ง 2 ชนิดมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 แสดงว่าถ่านทั้ง 2 ชนิด สอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดลิช ซึ่งแสดงว่ากลไกการดูดซับ โครเมียม (III) ลงบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์เป็นแบบหลายชั้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากภาพที่ 4.5 และจากไอโซเทอร์มแลงเมียร์

โดยเมื่อพิจารณาค่าคงที่ในสมการฟรุนดลิช ( $K_f$ ) มีค่าเท่ากับ 0.0122 และ 0.0115 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า  $\frac{1}{n}$  มีค่าเท่ากับ 1.2450 และ 1.2801 ซึ่งค่า  $\frac{1}{n}$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่จะใช้ในการดูดซับมีปริมาณมาก หรือการดูดซับโครเมียม(III) ไอออน สามารถเกิดได้บนพื้นผิวของถ่านทั้งสองชนิดได้หลายชั้น

#### 4.8 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกหวากโดยใช้แบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order

ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม(III) ไอออนโดยใช้แบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order โดยใช้ปริมาณถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จากลูกหวากอย่างละ 0.25 และ 0.125 กรัม ตามลำดับ ไปดูดซับโครเมียม(III) ไอออนเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม 10 มิลลิลิตร นำค่า  $q_e$  (mg/L) และเวลา(min) เขียนกราฟ ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.8

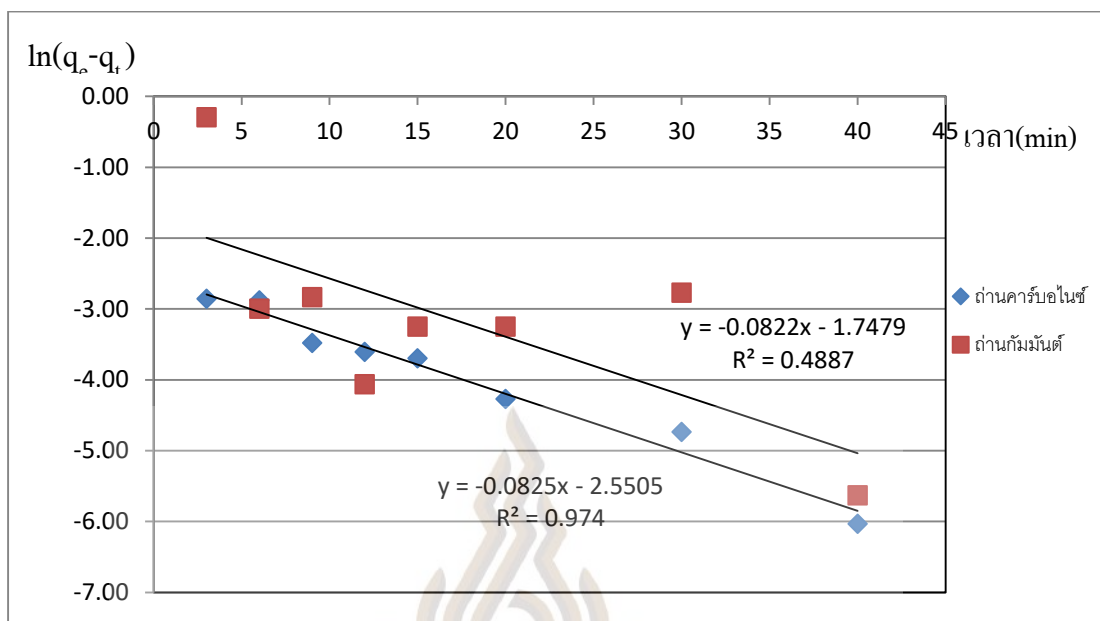


ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_e$  (mg/L) และเวลา (min)

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 3 นาทีถ่านคาร์บอนไนซ์ก็สามารถดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ได้สูงสุดจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปค่า  $q_e$  จะคงที่ตลอด ส่วนถ่านกัมมันต์ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีถ่านคาร์บอนไนซ์ก็สามารถดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ได้สูงสุดจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปค่า  $q_e$  จะคงที่ตลอด ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนที่มากกว่าจึงทำให้ต้องใช้เวลามากกว่าจึงจะเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ และจากการทดลองเพราะว่าไม่สามารถการทำทดลองที่ต่ำกว่า 3 นาทีได้เพราะต้องเสียเวลาในการเทสารและย้ายลงไปในเครื่องเขย่า ซึ่งจริงแล้วเมื่อเทสารละลายโครเมียม (III) ไอออนลงใน ถ่าน ถ่านทั้งสองชนิดก็สามารถดูดซับโครเมียม (III) ไอออนได้โดยทันที ส่วนถ่านกัมมันต์จะสามารถเห็นความสามารถในการดูดซับมากขึ้นในช่วง 3-5 นาที ก็แสดงให้เห็นว่าน่าจะเกิดจากการที่ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนที่มากกว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ทำให้ โครเมียม (III) ไอออนต้องใช้เวลาเดินทางเข้าไปในรูพรุนนั้น ๆ

สมการของ pseudo-first order คือ  $\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$

จากสมการของ pseudo-first order สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $t$  (แกน x) และค่า  $\ln(q_e - q_t)$  (แกน y) โดยคำนวณหาค่าความชัน ( $-k_1$ ) และจุดตัดแกน y ( $\ln q_e$ ) ของ ถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกหวากวาง ดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟ pseudo-first order การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนนาโนไฟเบอร์ และถ่านคาร์บอนนาโนไฟเบอร์จากลูกหูกวาง

กราฟเส้นตรงของถ่านคาร์บอนนาโนไฟเบอร์มีค่า slope ( $-k_1$ ) = -0.0825 จุดตัดแกน y ( $\ln q_e$ ) = -2.5505

กราฟเส้นตรงของถ่านกัมมันต์มีค่า slope ( $-k_1$ ) = -0.0822 จุดตัดแกน y ( $\ln q_e$ ) = -1.7479

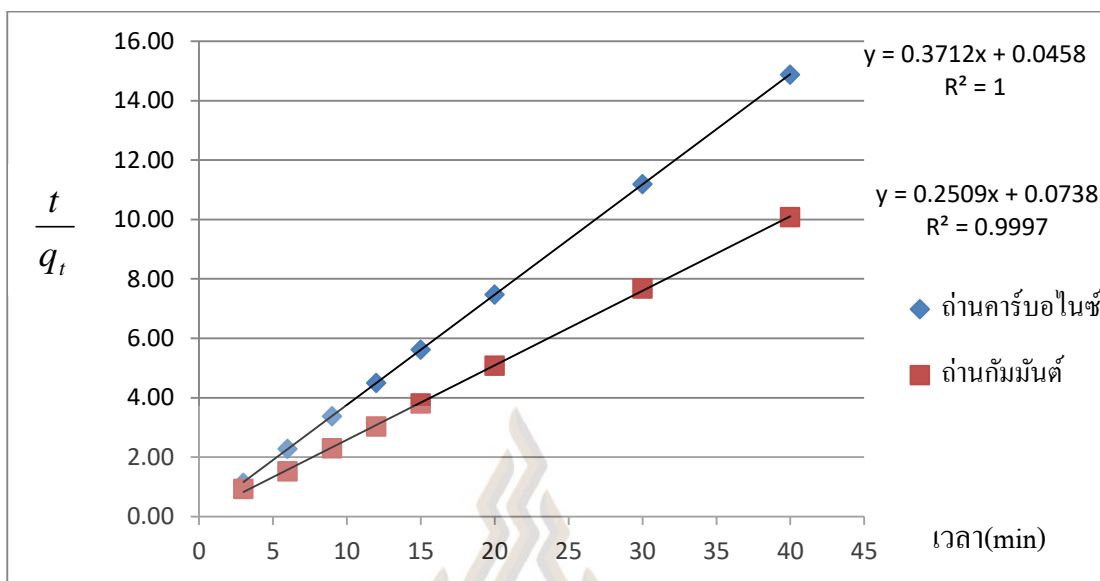
สมการของ pseudo-second order คือ 
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

จากสมการของ pseudo-second order สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่า  $t$  (แกน x) และค่า  $\frac{t}{q_t}$  (แกน y) โดยคำนวณหาค่าความชัน ( $\frac{1}{q_e}$ ) และจุดตัดแกน y ( $\frac{1}{k_2 q_e^2}$ )

ของถ่านคาร์บอนนาโนไฟเบอร์และ ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง ดังแสดงในภาพที่ 4.10 ตามลำดับ





ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟ pseudo-second order การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกหวาง

กราฟเส้นตรงของถ่านคาร์บอนไนซ์มีค่า slope  $\left(\frac{1}{q_e}\right) = 0.3712$  จุดตัดแกน y  $\left(\frac{1}{k_2 q_e^2}\right) = 0.0458$

กราฟเส้นตรงของถ่านกัมมันต์มีค่า slope  $\left(\frac{1}{q_e}\right) = 0.2509$  จุดตัดแกน y  $\left(\frac{1}{k_2 q_e^2}\right) = 0.0738$

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 นาที ค่า  $q_e$  ของการดูดซับของถ่านทั้งสองชนิดจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โดย ถ่านคาร์บอนไนซ์จะคงที่อยู่ที่ประมาณ 2.67 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์จะคงที่อยู่ที่ประมาณ 3.97 มิลลิกรัมต่อกรัม นั้นหมายความว่าค่า  $\frac{t}{q_t}$  ก็จะแปรผันตรงกับค่า t ดังนั้นแสดงว่า ค่า  $R^2$  จะเข้าใกล้ 1 เสมอ นั้นหมายความว่า ถ้าการดูดซับ เป็นลักษณะแบบนี้จลนศาสตร์การดูดซับเป็นการดูดซับแบบ pseudo-second order เสมอ

จากค่าความชันและจุดตัดแกน y สามารถคำนวณค่าตัวบ่งชี้ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงตัวบ่งชี้ที่คำนวณได้จากสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order ของการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออน

ชนิดถ่าน	$q_{e \text{ exp}}$ (mg/g)	pseudo-first order			pseudo-second order		
		$q_{e \text{ cal}}$ (mg/g)	$k_1$	$R^2$	$q_{e \text{ cal}}$ (mg/g)	$k_2$	$R^2$
ถ่านคาร์บอนในซ์ จากลูกहुควาง	2.69	0.078	0.0825	0.970	2.69	3.01	1.000
ถ่านกัมมันต์ จากลูกहुควาง	3.97	0.174	0.0822	0.988	3.98	0.85	0.999

สำหรับการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนโดยใช้ pseudo-first order ของถ่านทั้ง 2 ชนิด พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ไม่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนไม่สอดคล้องกับ pseudo-first order และเมื่อพิจารณาค่าปริมาณการดูดซับที่สถานะสมดุล ( $q_e$ ) ที่ได้จากการคำนวณกับค่าปริมาณการดูดซับที่สถานะสมดุล ( $q_e$ ) ที่ได้จากกราฟทดลอง ก็พบว่ามีค่าที่ไม่ใกล้เคียงกัน

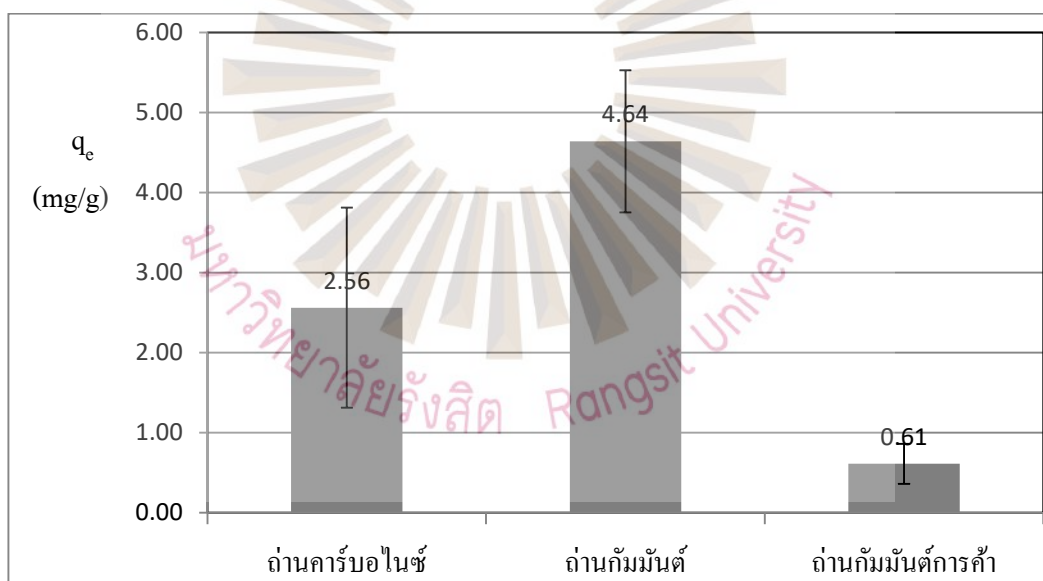
สำหรับการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนโดยใช้ pseudo-second order ของถ่านทั้ง 2 ชนิด พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 แสดงว่าจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนสอดคล้องกับ pseudo-second order และเมื่อพิจารณาค่าปริมาณการดูดซับที่สถานะสมดุล ( $q_e$ ) ที่ได้จากการคำนวณกับค่าปริมาณการดูดซับที่สถานะสมดุล ( $q_e$ ) ที่ได้จากกราฟทดลอง ก็พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับผลการทดลองเกี่ยวกับค่าคงที่อัตรา พบว่า ถ่านคาร์บอนในซ์ มีค่าคงที่อัตราอันดับสอง เป็น 3.01 ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่าคงที่อัตราอันดับสองเป็น 0.85 ทั้งนี้เป็นเพราะถ่านกัมมันต์ถูกกระตุ้นให้มีรูพรุนมากกว่าด้วยการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จึงทำให้พื้นผิวสัมผัสมากกว่าจึงใช้เวลามากกว่าในการจับ โครเมียม (III) ไอออน ทำให้อัตราการดูดซับน้อยกว่าค่าคงที่อัตราจึงน้อยกว่า

จากผลการทดลองทำให้ทราบความสามารถในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออน ของถ่านทั้งสองชนิด สามารถดูดได้อย่างรวดเร็วภายใน 3 – 5 นาทีแรกก็สามารถ ดูด โครเมียม (III) ไอออน ได้จนเกือบหมด ซึ่งจริง ๆ แล้วอาจจะดูดได้เร็วกว่านี้ถ้าสามารถทำการทดลองได้เร็วกว่า 3 นาที

#### 4.9 ผลของการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางและถ่านกัมมันต์การค้า

จากการนำซึ่งถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางหนัก 0.125 กรัม และถ่านคาร์บอนไนซ์หนัก 0.25 กรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์การค้า 0.50 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250.00 มิลลิลิตร 3 ใบนำไปดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ที่เจือจางลง 10 เท่า (COD มีโครเมียม (III) ไอออน ประมาณ 1000 พีพีเอ็ม ปิเปตมา 10.00 มิลลิลิตรจากนั้นเติมน้ำจนสารละลายมีปริมาตรเป็น 100.00 มิลลิลิตร) ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร ผลการทดลองการดูดซับโครเมียม (III) ไอออน ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านคาร์บอนไนซ์ กัมมันต์จากลูกहुกวางและถ่านกัมมันต์การค้า ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม(III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์

ค่า COD ด้วยถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางและถ่านกัมมันต์การค้า

หมายเหตุ Error Bars ที่แสดงในกราฟ คือ  $\pm$ SD (Standard Deviation)  $n = 3$

การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่าง ถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวางและถ่านกัมมันต์การค้า โดยโครเมียมในน้ำทิ้ง COD มีความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม ใช้ปริมาณถ่านคาร์บอนไนซ์ เท่ากับ 2.50 กรัมสามารถกำจัดโครเมียม (III) ต่อ ปริมาณถ่าน เท่ากับ 2.56 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง เท่ากับ 1.00 กรัม สามารถกำจัด โครเมียม (III) ไอออนต่อ ปริมาณถ่าน เท่ากับ 4.64 มิลลิกรัมต่อกรัม และใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์การค้า เท่ากับ 7.00 กรัม สามารถกำจัดโครเมียม (III) ไอออนได้เท่ากับ 0.61 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์การค้ามีความสามารถในการกำจัดต่ำกว่าถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกहुกวาง เพราะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์การค้ามีคาร์บอนเป็นจำนวนมาก เนื่องจากถูกเผาที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ทำให้หมู่คาร์บอนิลหลุดออกไปเป็นจำนวนมาก เหลือแต่คาร์บอนเป็นจำนวนมาก ทำให้ดูดซับโครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD ได้น้อยกว่าถ่านจากลูกहुกวาง

## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

1. การเผาหลูกหูกวางที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อคาร์บอนไนซ์หลูกหูกวางให้เป็นถ่านสามารถกำจัดโครเมียม(III) ไอออน ได้สูงที่สุดคือร้อยละ 97.36
2. จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าเกิดพีคที่บริเวณ  $3500\text{ cm}^{-1}$ ,  $2900\text{ cm}^{-1}$ ,  $2400\text{ cm}^{-1}$ ,  $1700\text{ cm}^{-1}$  และ  $200\text{-}300\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่ามีหมู่  $\text{-OH}$ ,  $\text{CH-stretching}$ , possibly aromatic aldehyde,  $\text{C=O}$  และ  $\text{CH-bending}$  โดยในถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์จะมีหมู่  $\text{-OH}$  และหมู่  $\text{C=O}$  น้อยกว่าถ่านที่ผ่านการตัดแปรแล้ว
3. สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านคาร์บอนไนซ์จากหลูกหูกวางให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ อัตราส่วนถ่านต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 ต่อ 1 และทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่มีค่าความสามารถการดูดซับ ( $q_e$ ) เท่ากับ 3.85 มิลลิกรัมต่อกรัม
4. จากการทดลองพบว่าเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ปรับค่า pH ให้เป็นกลาง แล้วนำมาเติมสารละลายสารละลายโครเมียม (III) คลอไรด์ เข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตรแล้วสารละลายที่ได้จะมี pH ประมาณ 4.0 สามารถดูดซับสารละลายสารละลายโครเมียม (III) ไอออนได้สูงที่สุดร้อยละ 85.81
5. การศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม(III) ไอออน ที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียม(III) ไอออน ของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากหลูกหูกวางพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม(III) ไอออน ในสารละลาย จะทำให้ความสามารถในการกำจัดโครเมียม(III) ไอออน เพิ่มมากขึ้น โดยดูจากค่า  $q_e$  ที่เพิ่มมากขึ้น และที่เลือกความเข้มข้นโครเมียม(III) ไอออน เท่ากับ 100 พีพีเอ็ม เนื่องจาก เครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 429.0



นาโนเมตร เครื่องจะสามารถวัดความเข้มข้นได้แม่นยำในช่วงความเข้มข้นไม่เกิน 100 พีพีเอ็ม จึงทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออนสูงสุด 100 พีพีเอ็ม

6. การศึกษากลไกการดูดซับ โครเมียม(III) ไอออน โดยใช้ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และพหุนามของถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกทุกวาง ถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสารละลายโครเมียม(III) ไอออน ลงบนถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง สอดคล้องกับไอโซเทอร์มพหุนาม ซึ่งแสดงว่ากลไกการดูดซับของโครเมียม (III) ไอออน บนพื้นผิวของถ่านคาร์บอนไนซ์ และถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง เป็นแบบหลายชั้น เมื่อพิจารณาค่า  $\frac{1}{n}$  มีค่าเท่ากับ 1.2450 และ 1.2801 ซึ่งค่า  $\frac{1}{n}$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่จะใช้ในการดูดซับมีปริมาณมาก หรือการดูดซับโครเมียม(III) ไอออน สามารถเกิดได้บนพื้นผิวของถ่านทั้งสองชนิดได้หลายชั้น

7. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ โครเมียม (III) ไอออน สอดคล้องกับ pseudo-second order โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เข้าใกล้ 1 และเมื่อพิจารณาค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ที่ได้จากการคำนวณกับค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ที่ได้จากการทดลอง ก็พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน

8. การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD โดยโครเมียมในน้ำทิ้ง COD มีความเข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม ถ่านคาร์บอนไนซ์ เท่ากับ 2.50 กรัมสามารถกำจัดโครเมียม (III) ไอออน ต่อ ปริมาณถ่าน เท่ากับ 2.56 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง 1.00 กรัมสามารถกำจัดโครเมียม (III) ไอออนต่อ ปริมาณถ่าน เท่ากับ 4.64 มิลลิกรัมต่อกรัม และกัมมันต์การค้า เท่ากับ 7.00 กรัม สามารถกำจัดโครเมียม (III) ไอออนได้เท่ากับ 0.61 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวางที่เตรียมขึ้นมีความสามารถในการกำจัดโครเมียม (III) ไอออนได้ดีที่สุด

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้โลหะหนักอื่นๆในการหาสารรบกวนในการตรวจวัด โครเมียม(III) ไอออน
2. ควรศึกษาการนำถ่านกลับมาใช้ใหม่หรือการกำจัดถ่านที่ใช้แล้วอย่างปลอดภัย

## บรรณานุกรม

1. การเชื่อมต่อกันของกลูโคสในโมเลกุลของเซลลูโลส. แหล่งที่เข้าถึง :  
[http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/wood/structure\\_wood\\_pt1.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/wood/structure_wood_pt1.php) [2554]
2. Dana M. Krempels, Ph.D.. [online]. Available: [http://www.bio.miami.edu/dana/226/226F07\\_3print.html](http://www.bio.miami.edu/dana/226/226F07_3print.html) . [November 16, 2012]
3. wikimedia. [online]. Available : [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ee/Lignin\\_structure.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ee/Lignin_structure.svg) . [November 16, 2012]
4. ปรีนทร เต็มญารศิลป์. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและ ไม้หมาจู้. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 2551
5. Wenzhong, S. *et. al.* Surface Chemical Functional Groups Modification of Porous Carbon. **Recent Patents on Chemical Engineering**. 1 (2008): 27-40.
6. กลไกการดูดซับ. แหล่งที่เข้าถึง: [http://innofresh.files.wordpress.com/2009/04/photo\\_activated\\_carbon-2.jpg](http://innofresh.files.wordpress.com/2009/04/photo_activated_carbon-2.jpg). [30 ตุลาคม 2553]
7. การยึดเกาะของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ. แหล่งที่เข้าถึง: <http://www.freepatentsonline.com/7017757-0-large.jpg> [15 มิ.ย. 2554]
8. Weber, W.J.Jr. **Physicochemical Process for Water Quality Control**. WileyInterscience. USA. pp. 117-119 . 1972
9. Danald, L. S. **Environmental Soil Chemistry**. Academic Press. USA. pp. 100-185. 1995
10. ศิริโรรัตน์ ศรีเกษเพชร. การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. 2543
11. ขงยุทธ ขุนไกร และอภิสนันท์ หนูงษ์หนองรี. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหวางเพื่อกำจัด สีในน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. ปทุมธานี. 2553

12. พลัญจู้ โสภณกิจโกศล. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะโครเมียม (VI). ปรินญาณีพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ. 2544
13. รวิินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิทย์ ปิยะมังคลา. จลนศาสตร์การดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ. 2551
14. โกวิทย์ ปิยะมังคลา และคณะ. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน. วิทยานิพนธ์. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ. 2551
15. Tan, I. A. W. et al. Equilibrium and kinetic studies on basic adsorption by oil palm fibre activated carbon. *Chemical Engineering Journal* 127 (2007) : 111-119.
16. Amin, N. K. Removal of reactive dye from aqueous solutions by adsorption onto activated carbons prepared from sugarcane bagasse pith. *Desalination* 223 (2008): 152-161.
17. ปัญญา มณีจักร์. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง. (วิจัย) ปทุมธานี : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. 2554
18. ณัฐยา พูนสุวรรณ, ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย และมาลี ตั้งสถิตยกุลชัย. ถ่านกัมมันต์จากขาน้อย โดยวิธีกระตุ้นทางเคมีและการกำจัดโครเมียมจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์วารสารเทคโนโลยีสุรนารี. 13(เมษายน 2549) : 143-158.
19. Jamil, A. et. al. "Removal of chromium (III) and zinc (II) by using pods of pisum sativum (graden peas)." *J. Sci. Res.* 38, (2) (2008) : 15-21.
20. Indu, S. and Dinesh G. "Kinetic modeling chromium (III) removal from aqueous solution by microbial waste biomass." *J. Sci. Ind. Res.* 68 (2009): 640-646.
21. ปรางค์ทอง ไชยสิทธิ์ และ ปองพล สมบุญ. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาเพื่อกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสีย. ปรินญาณีพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. ปทุมธานี. 2552

## ภาคผนวก

ผลการหาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนเพื่อหาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์

ตาราง ผ. 1 แสดงความสามารถในการกำจัดโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่เผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้เผา (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ (ppm)			เฉลี่ย	S.D	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (ppm)	%removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
300	1	97.38	69.69	69.57	69.80	69.69	0.12	27.69	28.44
	2	97.38	69.22	69.53	68.91	69.22	0.31	28.16	28.92
	3	97.38	72.69	73.04	72.35	72.69	0.34	24.69	25.35
400	1	97.38	14.67	15.09	14.24	14.67	0.43	82.71	84.94
	2	97.38	14.36	14.61	14.12	50.60	0.24	46.78	48.04
	3	97.38	13.15	13.63	12.66	7.05	0.49	90.33	92.76
500	1	97.38	2.57	2.92	2.22	2.57	0.35	94.81	97.36
	2	97.38	3.30	3.90	2.71	3.01	0.59	94.37	96.91
	3	97.38	4.38	4.87	3.90	4.38	0.49	93.00	95.50

ผลการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกหวาง

ตาราง ผ. 2 แสดงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นและระยะเวลาในการเผากระตุ้นต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้เผากระตุ้น (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้นที่เหลือ (ppm)			เฉลี่ย	S.D	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (ppm)	q <sub>c</sub> (mg/g)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
300	1	99.38	0.2523	36.61	35.61	36.71	36.31	0.61	63.08	2.50
	2	99.38	0.2511	20.63	19.43	20.63	20.23	0.69	79.15	3.15
	3	99.38	0.2538	1.66	0.26	1.56	1.16	0.78	98.22	3.87
400	1	99.38	0.2512	19.10	18.40	19.50	19.00	0.56	80.38	3.20
	2	99.38	0.2518	11.65	10.35	11.75	11.25	0.78	88.13	3.50
	3	99.38	0.251	3.24	1.74	3.24	2.74	0.87	96.64	3.85
500	1	99.38	0.2514	21.14	20.24	21.44	20.94	0.62	78.44	3.12
	2	99.38	0.2502	24.62	23.62	24.72	24.32	0.61	75.06	3.00
	3	99.38	0.2541	20.40	19.40	20.50	20.10	0.61	79.28	3.12



ตาราง ผ. 3 แสดงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2 โดยใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นและระยะเวลาในการเผากระตุ้นต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้เผากระตุ้น (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (ppm)	ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้นที่เหลือ (ppm)			เฉลี่ย	S.D	ปริมาณที่ถูก ดูดซับ (ppm)	q <sub>c</sub> (mg/g)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
300	1	99.38	0.2513	35.60	34.50	35.80	35.30	0.70	64.08	2.55
	2	99.38	0.2507	26.73	25.53	27.03	26.43	0.79	72.95	2.91
	3	99.38	0.2513	25.40	24.10	25.50	25.00	0.78	74.38	2.96
400	1	99.38	0.2525	15.09	14.29	14.99	14.79	0.44	84.59	3.35
	2	99.38	0.2504	7.88	6.78	7.78	7.48	0.61	91.90	3.67
	3	99.38	0.2509	14.17	11.87	13.17	13.07	1.15	86.31	3.44
500	1	99.38	0.2517	27.75	26.85	28.35	27.65	0.75	71.73	2.85
	2	99.38	0.2532	25.09	23.79	25.19	24.69	0.78	74.69	2.95
	3	99.38	0.2526	23.30	23.41	24.09	23.60	0.43	75.78	3.00

ตาราง ผ. 4 แสดงความสามารถในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 โดยใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นและระยะเวลาในการเผากระตุ้นต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้เผากระตุ้น (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้นที่เหลือ (ppm)			เฉลี่ย	S.D	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (ppm)	q <sub>c</sub> (mg/g)
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
300	1	99.38	0.2516	22.90	22.40	23.90	23.40	0.76	75.98	3.02
	2	99.38	0.2528	20.56	19.96	21.76	20.76	0.92	78.62	3.11
	3	99.38	0.25	18.73	20.03	18.63	19.13	0.78	80.25	3.21
400	1	99.38	0.2516	8.05	6.95	7.65	7.55	0.56	91.83	3.65
	2	99.38	0.2531	6.79	5.59	7.09	6.49	0.79	92.89	3.67
	3	99.38	0.2502	21.92	20.32	21.72	21.32	0.87	78.06	3.12
500	1	99.38	0.2515	32.23	32.13	33.93	32.73	1.01	66.65	2.65
	2	99.38	0.2506	33.12	31.92	33.12	32.72	0.69	66.66	2.66
	3	99.38	0.2511	27.47	27.37	29.37	28.07	1.13	71.31	2.84

ผลของการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (III) ไอออนที่เหมาะสม

ตาราง ผ. 5 แสดงความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์และถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 30 °C

ชนิดของตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ (ppm)			เฉลี่ย	S.D	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (ppm)	ปริมาณตัวดูดซับ (g)	q <sub>e</sub> (mg/g)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3					
ถ่านคาร์บอนไนซ์	10	5.221	5.142	5.304	5.222	0.07	4.778	0.4990	0.096
	25	11.841	11.611	11.993	11.815	0.16	13.185	0.4992	0.264
	50	21.718	21.899	21.984	21.867	0.11	28.133	0.5039	0.558
	75	31.224	31.407	31.023	31.218	0.16	43.782	0.5003	0.875
	100	39.73	39.341	39.552	39.541	0.16	60.459	0.5007	1.207
ถ่านกัมมันต์	10	5.441	5.142	4.904	5.162	0.22	4.838	0.5001	0.097
	25	11.841	11.831	11.993	11.888	0.07	13.112	0.5007	0.262
	50	21.024	21.099	21.484	21.202	0.20	28.798	0.5004	0.575
	75	30.025	30.978	30.038	30.347	0.45	44.653	0.5000	0.893
	100	37.896	37.841	37.552	37.763	0.15	62.237	0.5006	1.243

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมของถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกทุกงวาง

ตาราง ผ. 6 แสดงค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่ pH ต่าง ๆ

pH	ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ(ppm)			ความเข้มข้นที่เหลือเฉลี่ย (ppm)	S.D	ความเข้มข้นที่ถูกดูดซับ (ppm)	ร้อยละการกำจัด	q <sub>e</sub> (mg/g)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3					
2	0.25	100	25.58	24.58	25.68	25.28	1.20	74.72	74.72	2.99
3	0.25	100	23.17	21.97	23.17	22.77	0.75	77.23	77.23	3.09
4	0.25	100	19.70	18.30	19.60	19.20	1.35	80.80	80.80	3.23
5	0.25	100	22.18	20.78	22.08	21.68	2.35	78.32	78.32	3.13



ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง

ตาราง ผ. 7 แสดงค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์ที่ pH ต่าง ๆ

pH	ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ(ppm)			ความเข้มข้น ที่เหลือเฉลี่ย (ppm)	S.D	ความเข้มข้น ที่ถูกดูดซับ (ppm)	ร้อยละ การกำจัด	q <sub>e</sub> (mg/g)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3					
2	0.25	100	22.00	21.00	22.10	21.70	1.50	78.30	78.30	3.13
3	0.25	100	19.60	18.40	19.60	19.20	1.30	80.80	80.80	3.23
4	0.25	100	14.69	13.29	14.59	14.19	1.56	85.81	85.81	3.43
5	0.25	100	19.70	18.30	19.60	19.20	1.75	80.80	80.80	3.23



ผลของความสัมพันธ์ในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านคาร์บอนไนซ์กับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ตาราง ผ. 8 แสดงตัวแปรต่างๆในไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชของถ่านคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	$C_e$ (mg/L)	$q_e$ (mg/g)	$C_e/q_e$	Log $C_e$	Log $q_e$
30	10	5.222	0.096	54.542	0.7179	-1.0189
	25	11.815	0.264	44.733	1.0724	-0.5782
	50	21.867	0.558	39.168	1.3398	-0.2531
	75	31.218	0.875	35.674	1.4944	-0.0579
	100	39.541	1.207	32.746	1.5970	0.0819

ผลของความสัมพันธ์ในการดูดซับโครเมียม (III) ไอออนของถ่านกัมมันต์กับไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ตาราง ผ. 9 แสดงตัวแปรต่างๆในไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (°C)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	$C_e$ (mg/L)	$q_e$ (mg/g)	$C_e/q_e$	Log $C_e$	Log $q_e$
30	10	5.162	0.097	53.353	0.7128	-1.0144
	25	11.888	0.262	45.393	1.0751	-0.5819
	50	21.202	0.575	36.841	1.3264	-0.2400
	75	30.347	0.893	33.982	1.4821	-0.0491
	100	37.763	1.243	30.374	1.5771	0.0946

ตาราง ผ. 10 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านคาร์บอนในซ้จากลูกกวาดโดยใช้ pseudo-first order และ pseudo-second order

เวลา (นาที)	ปริมาณ ถ่าน(g)	ความเข้มข้น เริ่มต้น(ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ(ppm)			ความเข้มข้นที่ เหลือเฉลี่ย(ppm)	S.D	ความเข้มข้นที่ ถูกดูดซับ ppm	ร้อยละการ กำจัด	q <sub>e</sub> (mg/g)
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
3	0.25	100	34.49	33.49	34.59	34.19	0.61	65.81	65.81	2.63
6		100	34.56	33.36	34.56	34.16	0.69	65.84	65.84	2.63
9		100	34.02	32.62	33.92	33.52	0.78	66.48	66.48	2.66
12		100	33.53	32.83	33.93	33.43	0.56	66.57	66.57	2.66
15		100	33.77	32.47	33.87	33.37	0.78	66.63	66.63	2.67
20		100	33.60	32.10	33.60	33.1	0.87	66.9	66.9	2.68
30		100	33.17	32.27	33.47	32.97	0.62	67.03	67.03	2.68
40		100	33.11	32.11	33.21	32.81	0.61	67.19	67.19	2.69

ตาราง ผ. 11 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วยถ่านกัมมันต์จากลูกหวาง โดยใช้ pseudo-first order และ pseudo-second order

เวลา (นาท)	ปริมาณ ถ่าน(g)	ความเข้มข้น เริ่มต้น(ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ(ppm)			ความเข้มข้นที่ เหลือเฉลี่ย(ppm)	S.D	ความเข้มข้นที่ถูก ดูดซับ (ppm)	ร้อยละการ กำจัด	q <sub>e</sub> (mg/g)
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
3	0.125	100	60.02	58.92	60.22	59.72	0.70	40.28	40.28	3.222
6		100	51.30	50.10	51.60	51	0.79	49	49	3.920
9		100	51.51	50.21	51.61	51.11	0.78	48.89	48.89	3.911
12		100	50.89	50.09	50.79	50.59	0.44	49.41	49.41	3.953
15		100	51.26	50.16	51.16	50.86	0.61	49.14	49.14	3.931
20		100	51.96	49.66	50.96	50.86	1.15	49.14	49.14	3.931
30		100	51.26	50.36	51.86	51.16	0.75	48.84	48.84	3.907
40		100	50.82	49.52	50.92	50.42	0.78	49.58	49.58	3.966

ตาราง ผ. 12 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วย

ถ่านคาร์บอนไนซ์จากลูกกวาดโดยใช้ pseudo-first order

และ pseudo-second order

เวลา (นาที)	$q_e$ $_{exp}(mg/g)$	$q_t(mg/g)$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
3	2.69	2.63	-2.854	1.14
6	2.69	2.63	-2.875	2.28
9	2.69	2.66	-3.480	3.38
12	2.69	2.66	-3.605	4.51
15	2.69	2.67	-3.697	5.63
20	2.69	2.68	-4.269	7.47
30	2.69	2.68	-4.733	11.19
40	2.69	2.69	-6.032	14.88

ตาราง ผ. 13 ผลของจลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (III) ไอออนด้วย

ถ่านกัมมันต์จากลูกกวาดโดยใช้ pseudo-first order และ

pseudo-second order

เวลา (นาที)	$q_e$ $_{exp}(mg/g)$	$q_t(mg/g)$	$\ln(q_e - q_t)$	$t/q_t$
3	3.97	3.22	-0.291	0.93
6	3.97	3.92	-2.996	1.53
9	3.97	3.91	-2.834	2.30
12	3.97	3.95	-4.063	3.04
15	3.97	3.93	-3.249	3.82
20	3.97	3.93	-3.249	5.09
30	3.97	3.91	-2.768	7.68
40	3.97	3.97	-5.627	10.08

ตาราง ผ. 14 แสดงความสามารถในการดูดซับ โครเมียม (III) ไอออนในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่า COD โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านคาร์บอนไนซ์ ถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง และถ่านกัมมันต์การค้า

ชนิดของถ่าน	ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นที่เหลือ(ppm)			ความเข้มข้นที่เหลือเฉลี่ย (ppm)	S.D	ความเข้มข้นที่ถูกดูดซับ (ppm)	ร้อยละการกำจัด	q <sub>c</sub> (mg/g)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3					
ถ่านคาร์บอนไนซ์	2.50	1000	360.30	359.30	360.40	360.00	1.25	640.00	64.00	2.56
ถ่านกัมมันต์	1.25	1000	420.40	419.20	420.40	420.00	0.89	580.00	58.00	4.64
ถ่านกัมมันต์การค้า	7.00	1000	573.50	572.10	573.40	573.00	0.25	427.00	42.70	0.61



## ประวัติผู้วิจัย

คำนำหน้า  นาย  นาง  นางสาว  
 ตำแหน่งทางวิชาการ  ศ.  รศ.  ผศ.  อื่นๆ (โปรดระบุ) \_\_\_\_\_  
 ชื่อผู้วิจัย ปัญญา  
 นามสกุลผู้วิจัย มณีจักร์  
 ชื่อภาษาอังกฤษ PANYA  
 นามสกุลภาษาอังกฤษ MANEECHAKR  
 วัน/เดือน/ปีเกิด 5 มีนาคม 2508  
 ที่อยู่ เลขที่ 83/126 หมู่ 4 หมู่บ้านเสนาแกรนด์โฮม ถนน รังสิตติวนนท์ แขวงบางพูน เขต เมือง  
 จังหวัด ปทุมธานี  
 รหัสไปรษณีย์ 12000  
 โทรศัพท์ 029589289  
 โทรสาร - มือถือ 0841013219  
 ที่ทำงาน สังกัดภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต  
 ที่อยู่ ถนน พหลโยธิน แขวง หลักหก เขตเมือง  
 จังหวัด ปทุมธานี  
 รหัสไปรษณีย์ 12000  
 โทรศัพท์ 029972222 ต่อ 4903  
 โทรสาร 029972222 ต่อ 4917  
 E-Mail Address panya.m@rsu.ac.th

## ปริญญาตรี

สาขา วิทยาศาสตร์ทั่วไป เคมี  
 ปีที่จบ 2532  
 สถาบัน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 ประเทศ ไทย

ปริญญาโท

สาขา เคมีอินทรีย์  
ปีที่จบ 2536  
สถาบัน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ประเทศ ไทย

สาขาวิชาที่นักวิจัยเชี่ยวชาญ

เคมีวิเคราะห์ การควบคุมมลภาวะและการจัดการของเสีย

