

ดินเผาดูดซับจากดินเหนียวและซีลีออยเพื่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์



นายกิตตินันท์ คงสีบชาติ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3549-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BAKED CLAY ADSORBENT PREPARED FROM CLAY AND SAWDUST FOR  
ADSORPTION OF CADMIUM IN SYNTHETIC WASTEWATER



Mr. Kittinun Kongsuebchat

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

Department of Environmental Engineering  
Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3549-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ดินเผาดูดซับจากดินเหนียวและซีลี้อยู่เพื่อการดูดซับแคดเมียม
	ในน้ำเสียสังเคราะห์
โดย	นาย กิตตินันท์ คงสืบชาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โสฬังวงศ์วัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชอาณาจักร)

กิตตินันท์ คงสืบชาติ : ดินเผาดูดซับจากดินเหนียวและซีลี้อยู่เพื่อการดูดซับแคดเมียมใน  
น้ำเสียสังเคราะห์ (BAKED CLAY ADSORBENT PREPARED FROM CLAY AND  
SAWDUST FOR ADSORPTION OF CADMIUM IN SYNTHETIC WASTEWATER)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์, 162 หน้า. ISBN 974-17-3549-9

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยการผลิตดินเผาดูดซับจากดินเหนียวและซีลี้อยู่ ประสิทธิภาพในการดูด  
ซับไอออนแคดเมียมของดินเผาดูดซับที่ผลิตได้โดยการแปรผันค่าพีเอช (pH) การชะไอออนออกด้วย  
สารละลายกรดและน้ำกลั่น หาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี การหาประสิทธิภาพในคอลัมน์ดูดซับ  
และได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์กับดินเผาดูดซับที่ผลิตได้

ทำการศึกษปัจจัยการผลิตดินเผาดูดซับ โดยการแปรผันอุณหภูมิการเผา ปริมาณสัดส่วนโดย  
น้ำหนักระหว่างดินเหนียวและซีลี้อยู่ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา พบว่าดินเผาดูดซับที่  
เหมาะสมในการดูดซับจาก 120 ตัวอย่าง ในเงื่อนไขที่สามารถดูดซับไอออนแคดเมียมได้ดีและมีความคง  
รูป คือดินเผาดูดซับที่ผลิตจากปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างดินเหนียวและซีลี้อยู่ที่ 10 ต่อ 90 ซึ่ง  
ผ่านการเผาแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3  
องศาเซลเซียสต่อนาที โดยสามารถกำจัดไอออนแคดเมียมได้ร้อยละ 83.95 ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์อยู่  
ร้อยละ 23.05

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าสามารถดูดซับไอออนแคดเมียมได้ภายในเวลา 8  
ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) ซึ่งผลการทดลองการดูดซับเหมาะสมกับสมการ  
การดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich equation) ดินเผาดูดซับสามารถดูดซับไอออนแคดเมียมที่พีเอช  
3.28, 6, 7, 8 และ 9 ได้ 4.079, 2.909, 1.724, 3.257 และ 6.304 มิลลิกรัม/กรัมดินเผาดูดซับ ตามลำดับ  
ส่วนที่พีเอช 3.28 ถ่านกัมมันต์มีค่า  $q_{max}$  เท่ากับ 3.516 มิลลิกรัม/กรัมถ่านกัมมันต์ การศึกษาการชะ  
ละลายของดินเผาดูดซับหลังจากใช้งานแล้ว โดยการชะด้วยสารละลายกรดอ่อน (pH 5) และน้ำกลั่นที่  
24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อชะด้วยสารละลายกรดอ่อน (pH 5) มีแคดเมียมถูกชะออกมาสูงสุดเพียงร้อยละ  
2.7 และไม่สามารถถูกชะออกมาได้เลยด้วยน้ำกลั่น

การทดลองประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 8 ความเข้มข้น  
แคดเมียม 1 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยคอลัมน์ที่ระดับความลึกของดินเผาดูดซับ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร  
พบว่าที่จุดหมดสภาพมีน้ำเสียไหลผ่านชั้นดินเผาดูดซับไปทั้งสิ้น 2395.9, 2985.7 และ 2408.2 เท่าของ  
ปริมาตรของคอลัมน์ ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2546.....

# # 4370227021: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: ADSORPTION / CADMIUM / BAKED CLAY / SAWDUST / CLAY

KITTINUN KONGSUEBCHAT: BAKED CLAY ADSORBENT PREPARED FROM CLAY AND SAWDUST FOR ADSORPTION OF CADMIUM IN SYNTHETIC WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.THARES SRISATIT, Ph.D., 162 pp. ISBN 974-17-3549-9

The purpose of this research were to study factors of preparation baked clay adsorbent from clay and sawdust, to study the properties and capacity of the baked clay adsorbent in treatment wastewater containing cadmium and to study its efficiency comparing with activated carbon.

In preparation of baked clay adsorbent, the ratio between clay and sawdust, pyrolysis temperature and temperature increasing rate were studied. The experimental results demonstrated that the weight ratio of clay to sawdust 10:90 and pyrolysis temperature 600 °C for 30 minutes with the increasing rate 3 °C/minute was suitable condition for making baked clay adsorbent. The efficiency of baked clay for cadmium removal was 83.95% or 23.05% more than of activated carbon.

The adsorption reached equilibrium in 8 hours and cadmium adsorption results fit well in Freundlich equation. The maximum adsorption capacity ( $q_{max}$ ) of the adsorbent at pH 3.28, 6, 7, 8 and 9 was 4.079, 2.909, 1.724, 3.257 and 6.304 mg/g-adsorbent respectively while activated carbon, at pH 3.28, was  $q_{max} = 3.516$  mg/g-adsorbent. The regeneration experiments by rinsing with weak acid (pH 5) and water for 24 hours, acid rinsing could remove cadmium 2.7 % while rinsing with water could not removed cadmium ion out of baked clay adsorbent.

The efficiency for cadmium removal was also studied in the adsorbent column by feeding with synthetic wastewater containing 1 mg/l of cadmium at the volume depth 30, 60 and 90 cm. The results indicated that the breakthrough volumes of each depth were 2395.9, 2985.7 and 2408.2 bed volume respectively.

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

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

Academic Year... .....2003.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นและความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่องทุก ๆ ด้าน อย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งการช่วยตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดตลอดในการทำวิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง ไฉ่ห้วงศ์วัฒน์ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และ อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาและเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ครูสมคิด ทองศิลา นักวิทยาศาสตร์จิระประภา เนียมปาน และ คุณเสรี ดอนเหนือ ซึ่งเป็นเจ้าหน้าที่ของคณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการกำจัดขยะ ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องอัดเม็ดอาหารกุ้ง ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในเรื่องต่างๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้

ทุนในการทำวิจัยบางส่วน ได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณบริษัทสยามแมคคาทรอนิกส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำบริสุทธิ์ 1200 ลิตร และคุณมีสุข จงวิวัฒน์ธรรม ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณยงคือบิดา มารดาและพี่สาวที่ให้ทุนการศึกษา รวมทั้งครู อาจารย์ ที่ให้คำปรึกษา และ เพื่อน ๆ ทุกท่าน รวมทั้งผู้ที่มีได้ออกนาม ที่ได้ให้การสนับสนุน คอยช่วยเหลือรวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญรูป .....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 ดินเผา.....	5
2.1.1 ส่วนประกอบต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของดิน.....	7
2.1.2 ลักษณะอนุภาคของดิน.....	10
2.1.3 ความเป็นประจุของดิน .....	11
2.2 การอบแห้งผลิตภัณฑ์ดินเผา.....	12
2.2.1 วิธีการอบแห้งโดยทั่วไป.....	13
2.2.2 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง.....	14
2.3 การเผาผลิตภัณฑ์ดินเผา.....	14
2.3.1 บรรยากาศที่ใช้ในเตาเผาโดยทั่วไป.....	14
2.3.2 การหดตัวเมื่อเผา.....	15
2.3.3 ปฏิกริยาที่เกิดในเนื้อดินปั้นที่ถูกเผา.....	16
2.4 คุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจของเซรามิก.....	17
2.4.1 การจัดระเบียบของแอนไอออนในผลึกเซรามิก.....	17
2.4.2 ความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	18
2.4.3 ความแข็งแรง.....	20
2.5 ถ่านดูดซับ.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1 ถ่านกัมมันต์.....	22
2.5.2 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	23
2.5.3 หมู่ฟังก์ชันนัลของถ่านกัมมันต์.....	28
2.5.4 การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	29
2.6 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ.....	30
2.6.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	31
2.6.2 การดูดซับทางเคมี.....	32
2.6.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ.....	33
2.6.4 สมดุลการดูดติดผิว.....	35
2.6.5 การวิเคราะห์ระบบดูดซับ.....	35
2.6.6 ระบบดูดซับแบบเท.....	40
2.6.7 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง.....	40
2.6.8 การออกแบบระบบดูดซับ.....	43
2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	44
2.7.1 ความปั่นป่วน.....	44
2.7.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ.....	44
2.7.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ....	45
2.7.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ.....	45
2.7.5 ค่าพีเอช.....	45
2.7.6 อุณหภูมิ.....	46
2.8 โลหะหนัก.....	46
2.8.1 แคดเมียม.....	46
2.8.2 สังกะสี.....	47
2.8.3 ตะกั่ว.....	48
2.9 กระบวนการต่างๆ ในการกำจัดโลหะหนัก.....	49
2.9.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี.....	49
2.9.2 โคแอกกูเลชัน, ฟลอคคูเลชัน.....	52



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.3 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	52
2.9.4 ออกซิเดชันและรีดักชัน.....	52
2.9.5 รีเวิร์สออสโมซิส.....	53
2.9.6 การระเหย.....	53
2.9.7 อิเล็กโตรไดอะไลซิส.....	53
2.9.8 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า.....	54
2.9.9 การดูดติดผิว.....	54
2.9.10 การบำบัดโดยจุลินทรีย์.....	55
2.10 ความชุ่ม.....	55
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	62
3.1 ลำดับขั้นในการวิจัย.....	62
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	62
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	65
3.4 การดำเนินการวิจัย.....	67
3.4.1 การศึกษาองค์ประกอบของดิน.....	67
3.4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม.....	67
3.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนแคดเมียมของดินเผาอุตสาหกรรม.....	69
3.4.4 การศึกษาการชะไอออนแคดเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น.....	74
3.4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง.....	75
3.4.6 หาคูณลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาอุตสาหกรรมและถ่านกัมมันต์.....	77
3.4.7 ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม.....	77
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	79
4.1 การศึกษาองค์ประกอบของดิน.....	79
4.2 การวิเคราะห์หาปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม.....	85
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนแคดเมียมของดินเผาอุตสาหกรรมที่ผลิตได้.....	92

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาการชะโอบอนแคดเมียมของดินเผาดูดซับด้วยสารละลายกรดและน้ำ กลั่น.....	103
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง.....	105
4.6 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับกับถ่านกัมมันต์ที่มี ขายตามท้องตลาด .....	110
4.7 ประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตดินเผาดูดซับ.....	118
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	121
รายการอ้างอิง .....	123
ภาคผนวก .....	128
ภาคผนวก ก. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคและมาตรฐานน้ำทิ้งจาก แหล่งกำเนิด ของหน่วยงานราชการต่างๆ .....	129
ภาคผนวก ข. ภาพถ่ายวัตถุดิบและอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	134
ภาคผนวก ค. การทดสอบหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94....	139
ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000.....	144
ภาคผนวก จ. บันทึกข้อมูลผลการทดลอง.....	146
ภาคผนวก ฉ. ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zeta - Sizer.....	160
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	162

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	สถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2531 –2540...	2
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆระหว่างแร่ดินเหนียวที่สำคัญ 3 ชนิด.....	6
2.2	คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปในการเผาระยะต่างๆ.....	17
2.3	สมบัติบางประการของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง.....	21
2.4	วัตถุดิบต่างๆที่นำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์.....	25
2.5	การเปรียบเทียบการดูดติดผิวทางกายภาพและการดูดติดผิวทางเคมี.....	33
2.6	ข้อมูลออกแบบถ่านดูดซับ.....	43
2.7	ผลของความปั่นป่วนที่มีต่อการกำจัดแคดเมียมและตะกั่ว.....	60
3.1	ตัวแปรกำหนดและพารามิเตอร์.....	65
3.2	ตัวแปรอิสระและพารามิเตอร์.....	66
4.1	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของดินเหนียวที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-RAY Fluorescence.....	81
4.2	ค่า $\alpha_{max}$ ของถ่านกัมมันต์และดินเผาดูดซับที่พืชต่างๆ.....	101
4.3	การชะไฮดรอนแคดเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดพีเอช 5.....	104
4.4	ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับกับถ่านกัมมันต์ที่มี ขายตามท้องตลาด.....	111

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างของ Sillica Tetrahedral Unite.....	10
2.2	ลักษณะโครงสร้างของAlumina Octahedral Unite.....	11
2.3	ลักษณะการกระจายตัวของประจุบวกและลบบนอนุภาคดิน.....	11
2.4	การโค้งตัวของผลึกภัณฑ์เซรามิก.....	13
2.5	การแตกของผลึกภัณฑ์เซรามิก.....	13
2.6	ช่องแทรกเทหระฮีดรัลและช่องแทรกออกตะฮีดรัล.....	18
2.7	รูพรุนชนิดต่างๆ.....	19
2.8	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	24
2.9	หมู่ฟังก์ชันนัลที่เกาะอยู่กับผิวของถ่านกัมมันต์ .....	29
2.10	กลไกไฟฟ้าสถิตของการดูดซับโลหะหนักบนผิวดิน.....	34
2.11	กราฟสำหรับสมการ(2-12) ของLangmuir.....	36
2.12	กราฟสำหรับสมการ(2-13) ของLangmuir.....	37
2.13	กราฟสำหรับหาค่าของสมการ(2-14) ของBET.....	38
2.14	กราฟสำหรับหาค่าของสมการ(2-15) ของBET.....	39
2.15	กราฟสำหรับหาค่าของสมการ(2-15) ของFreudlich.....	40
2.16	ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง.....	41
2.17	ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องในชั้นตื้น.....	42
2.18	การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ของโลหะหนัก ชนิดต่างๆ.....	51
3.1	ภาพการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุล.....	71
3.2	ภาพการทดลองหาไอโซเทอมของการดูดติดผิว.....	72
3.3	ระบบการทำงานของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง.....	76
3.4	ผังขั้นตอนการทดลอง.....	78
4.1	ดินเหนียวที่ใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตดินเผาดูดซับ.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.2	ซีลื้อยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม.....	80
4.3	ผลการวิเคราะห์ดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD.....	82
4.4	การกระจายขนาดอนุภาคของดินเหนียวที่ใช้ในการทดลอง.....	83
4.5	การกระจายขนาดอนุภาคของดินซีลื้อยที่ใช้ในการทดลอง.....	84
4.6	ค่าความชุ่มของดินเผาที่อัตราส่วนดินต่อซีลื้อย อุณหภูมิการเผา และที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที.....	85
4.7	ค่าความชุ่มของดินเผาที่อัตราส่วนดินต่อซีลื้อย อุณหภูมิการเผา และที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที.....	86
4.8	ร้อยละการกำจัดแคดเมียมของดินเผาอุตสาหกรรมที่มีดินเป็นส่วนผสม 100%.....	88
4.9	ตัวอย่างดินเผาอุตสาหกรรมที่มีอัตราการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสูงเกินกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด.....	89
4.10	ดินเผาอุตสาหกรรมก่อนเผาและหลังเผา.....	91
4.11	เวลาในการเข้าสู่สมดุลของดินเผาอุตสาหกรรม.....	92
4.12	ค่า R <sup>2</sup> ของสมการ Langmuir Isotherm.....	94
4.13	ค่า R <sup>2</sup> ของสมการ Freundlich Isotherm.....	94
4.14	ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาอุตสาหกรรมที่พีเอช 3.28.....	95
4.15	ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด(F300)ที่พีเอช 3.28.....	96
4.16	ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาอุตสาหกรรมที่พีเอช 6.....	97
4.17	ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาอุตสาหกรรมที่พีเอช 7.....	98
4.18	ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาอุตสาหกรรมที่พีเอช 8.....	99
4.19	ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาอุตสาหกรรมที่พีเอช 9.....	100
4.20	การเกิดประจุบนผิวของดินเผาอุตสาหกรรมในสารละลายต่าง.....	102
4.21	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคอลัมน์จำลอง.....	106
4.22	ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมุดสภาพของดินเผาอุตสาหกรรมในคอลัมน์ที่ระยะ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร.....	107

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.23	ลักษณะการหมดสภาพของคอลัมน์ที่ระดับความลึก 30,60 และ 90 ซม. ตามลำดับ.....	108
4.24	ลักษณะการหมดสภาพของคอลัมน์ดูดซับ.....	109
4.25	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM)ของวัสดุต่างๆ.....	114
4.26	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM)ของดินเหนียวเผาที่ 600 องศา เซลเซียส อัตราเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที เผานาน 30 นาที.....	115
4.27	% T (Transmittance) และช่วงความถี่ ( $\text{cm}^{-1}$ )ของดินเผาดูดซับ.....	116
4.28	% T (Transmittance) และช่วงความถี่ ( $\text{cm}^{-1}$ )ของดินเผาดูดซับที่ผ่านการทดลอง การหาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง.....	116
4.29	% T (Transmittance) และช่วงความถี่ ( $\text{cm}^{-1}$ )ของดินเผาดูดซับ ดินเผาดูดซับที่ ผ่านการทดลองการหาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง และถ่านกัมมันต์.....	117

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเร่งพัฒนาประเทศให้ทันกับนานาประเทศในทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านการศึกษา ด้านสังคมวัฒนธรรม ด้านคุณภาพชีวิต และที่สำคัญด้านเศรษฐกิจ สิ่งที่จะทำให้เกิดการพัฒนาด้านเศรษฐกิจที่สำคัญมากอันหนึ่งคืออุตสาหกรรมการผลิต ในการเร่งพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อต้องการผลผลิตที่สูงและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ทำให้ภาคอุตสาหกรรมเน้นในเรื่องการผลิตแต่ไม่ให้ความสำคัญต่อของเสียที่เกิดจากการผลิตนั้น จึงเกิดของเสียออกมาสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก ไม่ว่าจะเป็น อากาศเสีย มูลฝอย สารพิษ และ น้ำเสีย อุตสาหกรรมผลิตที่ต่างกันก็จะมีน้ำเสียที่แตกต่างกัน ขึ้นกับสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำเสียนั้น แต่สิ่งเจือปนที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตมากที่สุดอันหนึ่งคือโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท สารหนู แคดเมียม เป็นต้น

ปัญหาโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่ต้องให้ความสนใจ เพราะโลหะหนักเป็นสารที่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อยมาก เมื่อเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการสะสม เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณโลหะหนักที่สะสมอยู่ก็จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นและมีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย

การบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก สามารถทำได้หลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตกตะกอน (Precipitation) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การกรองผ่านเยื่อกรองแบบผกกลับ (Reverse Osmosis Filtration) และการดูดซับ (Adsorption) การที่จะเลือกใช้วิธีการใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีผสมกันเพื่อการบำบัดน้ำเสีย ขึ้นอยู่กับปัจจัยและความเหมาะสมหลายอย่างประกอบกัน แต่วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในระดับ ชาวบ้านทั่ว ๆ ไป จนถึงระดับอุตสาหกรรม ก็คือวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับ ไม่ว่าจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หรือสารดูดซับอื่น ๆ ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและสะดวกใช้อย่างยิ่ง

ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีคุณสมบัติสามารถใช้เป็นสารดูดติดผิวหรือสารดูดซับ (adsorbent) ได้ และจากการที่มีคุณสมบัติในการเป็นสารตัวดูดซับได้นั้นจึงทำให้มีการนำถ่านกัมมันต์มาประยุกต์ใช้งานต่างๆ กันอย่างกว้างขวาง และหลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง งานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์บำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม สารหนู เป็นต้น หรือการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสี

และกลิ่น ตลอดจนสารมลพิษอากาศอื่นๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้ด้วย จากคุณสมบัติและประโยชน์การใช้งานในหลายๆ ด้านของถ่านกัมมันต์ จึงส่งผลให้ปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ภายในประเทศจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (ตารางที่ 1.1)

ตารางที่ 1.1 สถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2531-2540

ปี พ.ศ.	นำเข้า		ส่งออก	
	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2531	1,932	52.31	261	8.12
2532	2,650	72.24	775	27.66
2533	2,322	75.31	664	25.00
2534	2,642	75.95	1,056	36.45
2535	2,707	101.42	1,027	34.01
2536	2,908	96.31	479	15.89
2537	2,816	103.19	522	18.25
2538	2,883	124.61	1,765	48.26
2539	3,047	100.84	2,937	75.68
2540	3,598	127.14	2,807	99.37

ที่มา: ปิยะพร บารมี, 2542 (รายงานประจำปีกรมศุลกากร (2530-2540))

ถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้จากวัสดุต่างๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ด้วย เช่น ไม้, เศษไม้, ขี้เลื่อย, ชังข้าวโพด, ชานอ้อย, แกลบ, กะลามะพร้าว, ยาง, ถ่านหินลิกไนท์, พีท หรือ อื่นๆ ทั้งนี้แล้วแต่ความเหมาะสมในการหาวัตถุดิบ วิธีการ และต้นทุนที่ใช้ รวมถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ

จากตารางที่ 1.1 มูลค่าการนำเข้าถ่านกัมมันต์มีค่ามากกว่ามูลค่าการส่งออกในทุก ๆ ปี และมีการสูญเสียเงินตราในการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก หากเรามีการพัฒนาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีเทียบเท่าถ่านกัมมันต์หรือดีกว่า แต่ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยต่ำกว่า เนื่องจากใช้วัตถุดิบที่หาได้ง่ายภายในประเทศ ก็จะทำให้เราสามารถลดปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์และเพิ่มปริมาณการส่งออกตัวดูดซับที่พัฒนาขึ้น สามารถดึงเงินตราจากต่างประเทศเข้าประเทศได้ ส่งผลให้มีการพัฒนาด้านเศรษฐกิจควบคู่กับการป้องกันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

วัตถุดิบที่จะใช้ทำตัวดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียได้ดีเท่ากับหรือมากกว่าถ่านกัมมันต์ น่าจะเป็นตัวที่เผาแล้วมีลักษณะคล้ายถ่านกัมมันต์ แต่ควรมีประจุที่ผิวเป็นลบด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ



การดูดซับโลหะหนักซึ่งส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก จึงเห็นว่าควรใช้ซีลี้อยผสมกับดินเหนียวแล้วนำไปเผา

ซีลี้อยเป็นเศษเหลือจากอุตสาหกรรมไม้ นำมาพัฒนาให้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง โดยเป็นการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้ เป็นแนวคิดที่จะก่อให้เกิดการรักษาสภาพแวดล้อมให้ควบคู่ไปกับการพัฒนาอุตสาหกรรม

ดินเหนียวเป็นดินที่พบมากในประเทศไทย มักพบตามท้องไร่ท้องนา ราคาถูก มีลักษณะเหนียวปั้นเป็นก้อนได้ง่าย ที่ผิวมีประจุเป็นลบ

เมื่อนำดินเหนียวมาผสมกับซีลี้อยแล้วเผา ซีลี้อยจะเพิ่มความพรุนตัวให้ดินเผาและเมื่อซีลี้อยกลายเป็นถ่านก็จะมีรูพรุนมากขึ้น ส่วนดินเหนียวนั้นเมื่อเผาแล้วจะมีความแข็งแกร่งและหากเผาที่อุณหภูมิไม่สูงมากจะยังมีประจุเป็นลบจึงสามารถดึงดูดประจุบวกได้ดี ดังนั้นวัสดุดูดซับนี้ น่าจะมีทั้งความพรุนตัว ความคงรูป และมีประจุเป็นลบ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดีเทียบเท่าถ่านกัมมันต์หรือมากกว่า แต่ราคาต่อหน่วยต่ำกว่า

จากหลักการและเหตุผลดังกล่าว ทำให้เชื่อว่าจะสามารถพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี มีความคงรูป ทนความร้อนได้สูง วัสดุดิบหาง่ายในท้องถิ่น และ กระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาดินเผาดูดซับโลหะหนักจากซีลี้อยและดินเหนียว
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของดินเผาดูดซับที่พัฒนาขึ้น ต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์
3. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ระหว่าง ถ่านกัมมันต์กับดินเผาดูดซับที่ผลิตได้

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. เตรียมอุปกรณ์การทดลองและวัสดุดิบจากดินเหนียวและซีลี้อย
2. ศึกษาองค์ประกอบของดินเหนียว รวมทั้งขนาดอนุภาคของดินเหนียวและซีลี้อย
3. หาปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียม( $Cd^{2+}$ )
4. หาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนแคดเมียม ของดินเผาดูดซับและถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด

5. หาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนแคดเมียม
6. ศึกษาการชะไอออนแคดเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น
7. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับที่ผลิตได้ กับถ่านกัมมันต์ ที่มีขายตามท้องตลาด อาทิ Iodine Number, Surface Area, Total Pore Volume Average Pore Diameter, Electrical Charge, Functional Group และถ่ายภาพขยาย 2000 เท่า
8. ศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง
9. ประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดทำดินเผาดูดซับ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งคือขี้เถ้า มาทำให้มีคุณค่าต่อสภาพแวดล้อม
2. เป็นวัสดุดูดซับที่คงรูปไม่แตกง่าย ทนต่อความร้อน มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง และแยกออกจากน้ำเสียได้ง่าย อันเป็นทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่ง
3. ลดการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ
4. เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตวัสดุดูดซับฝุ่นโลหะหนักจากเตาเผาขยะ เพราะดินเผาสามารถทนความร้อนสูงและนำกลับมาใช้ใหม่ได้

## บทที่ 2

### การทบทวนเอกสาร

#### 2.1 ดินเผา

ดินเผาจัดเป็นเซรามิกซึ่งเป็นสารประกอบของธาตุที่เป็นทั้งโลหะและอโลหะ โดยอะตอมของธาตุอาจมีการเรียงตัวที่มีระเบียบเป็นผลึก หรืออาจมีความไร้ระเบียบสูงก็ได้ โดยทั่ว ๆ ไปสารเซรามิกมักปรากฏอยู่ในรูปของผลึกเดี่ยวหรือเป็นกลุ่มของผลึกเดี่ยวเกิดเป็นสารหลายผลึก หรือผลึกพอลิ แต่ละกลุ่มของผลึกเดี่ยวหรือที่เรียกว่าเกรนจะประกอบด้วยเซลล์หนึ่งหน่วยเรียงตัวอยู่ในทิศทางเดียวกัน ในกรณีที่เกรนต่าง ๆ มีองค์ประกอบเหมือนกันจะจัดเป็นสารเฟสเดียวกันและถ้ามีองค์ประกอบแตกต่างกันจะเป็นสารชนิดหลายเฟส (อิติพันธ์ กว้างสุขสถิตย์, 2535)

ในทางวิศวกรรม ดินหมายถึง กรวด (Gravel) ทราย (Sand) ทรายเม็ดป่น (Silt) และ ดิน (Clay) หรือส่วนผสมของสิ่งเหล่านี้ซึ่งอาจเป็นพวกที่มีและไม่มี ความเชื่อมแน่น ดินเกิดจากเม็ดของแร่ธาตุต่าง ๆ มารวมตัวกันแต่สามารถแยกให้ออกจากกันได้โดยวิธีง่าย ๆ เช่นการนำไปละลายน้ำ เป็นต้น

ดินเหนียวเป็นดินที่อยู่ลึกลงไปจากผิวหน้าดินที่ใช้ทำเกษตรกรรม เป็นดินที่มีเม็ดดินละเอียดมาก ระหว่าง  $10^{-6}$  ถึง 0.002 มิลลิเมตร (น้อยกว่า 2 ไมครอน) จากเหตุผลนี้ทำให้โมเลกุลอยู่ใกล้ชิดกันมาก จึงทำให้ดินชนิดนี้มีแรงยึดเกาะสูงหรือมีความเหนียวนั่นเอง และยังทำให้น้ำซึมผ่านได้น้อยอีกด้วย เนื่องจากช่องว่างระหว่างโมเลกุลนั้นมีขนาดเล็กมาก โดยปกติจะพบได้บริเวณที่ราบลุ่ม ซึ่งมีการสะสมของ carbonaceous matter และ organic matter เป็นจำนวนมาก มักจะพบในลักษณะที่เป็นสีดำหรือสีเทา ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา มักนิยมนำมาผสมกับดินเชื้อ (grog) และผ่านกระบวนการเผา ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า เอิเทินแวร์ (Earthen ware) ซึ่งมีลักษณะพรุนตัว (Porous) นอกจากจะมี carbonaceous matter แล้วดินในประเทศไทยส่วนมากจะมีแร่เหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) เป็นส่วนประกอบอยู่มาก สังเกตได้จากสีของผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างแดงหรือส้ม เช่น กระถางต้นไม้ อิฐมอญ หม้อดิน แจกัน อ่างบัว เป็นต้น

ดินเหนียวที่พบเป็นส่วนมากตามพื้นผิวโลกเรียกว่า “ดินเหนียวซิลิเกต” กล่าวคือเป็นดินที่มีอลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ  $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$  (อายุวัฒน์ สว่างผล, 2543) โดยมีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นซ้อนกัน ความแตกต่างระหว่างแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับการเรียงซ้อนกันของแผ่น silica และ alumina sheet กับการเปลี่ยนแปลงและแทนที่กันของซิลิกอนและอลูมิเนียมในแผ่นดังกล่าวกับธาตุอื่นๆ ชนิด

ของแร่ดินเหนียวที่สำคัญได้แก่ kaolinite, smectite และ illite ซึ่งทั้งสามตัวมีคุณสมบัติต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่างแร่ดินเหนียวที่สำคัญ 3 ชนิด

คุณสมบัติ	ชนิดของแร่ดินเหนียว		
	smectite	illite	kaolinite
ขนาดของผลึก(ไมครอน)	0.01-1.0	0.1	0.1-0.5
รูปร่าง	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบางรูป หกเหลี่ยม
พื้นที่ผิวภายนอก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
พื้นที่ผิวภายใน	สูงมาก	ปานกลาง	ไม่มี
ความแข็งแรงและสภาพพลาสติก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การขยายตัว	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
Cation exchange capacity (meq/100g clay)	80-100	15-40	3-15

ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541

ส่วนประกอบของดินเหนียวแตกต่างกันไปตามแหล่งต่างๆ ส่วนประกอบโดยประมาณอาจจำแนกได้ดังนี้คือ  $\text{SiO}_2$  อยู่ระหว่าง 40 – 60%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ประมาณ 30%, น้ำในผลึกและอินทรีย์สาร 10 %, และ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{NaO}$  มีเล็กน้อย แร่ดินต่างๆที่พบในดินเหนียวพอสรุปได้คือ kaolinite ซึ่งมีทั้งหยาบและละเอียดเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มี montmorillonite และ illite เล็กน้อย แร่อื่นๆที่เป็นส่วนประกอบอยู่ก็มี quartz, mica เป็นต้น ส่วนอินทรีย์สารที่พบได้แก่ lignite, waxes, resin, lignin และ humus นอกจากนี้ก็มีเกลือที่ละลายน้ำได้ เกลือส่วนใหญ่เป็นเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ของ Al, Fe, Ca, Mg, K และ Na (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2527)

คุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งของแร่ดินเหนียวคือ “การดูดซับไอออนบวก” อนุภาคของดินเหนียวจะมีประจุลบอยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่ออยู่ในดินตามธรรมชาติก็จะมี การดูดซับไอออนบวกไว้เป็นจำนวนและสัดส่วนเท่ากับประจุลบที่มีอยู่บนผิวของอนุภาคดินเหนียว จึงทำให้เกิดสภาพที่เรียกว่า ionic double layer ขึ้น คือสภาพที่มีประจุสองชั้น ชั้นในได้แก่ประจุลบซึ่งเป็นของดินเหนียว ชั้นนอกได้แก่ ไอออนบวก(cation) ที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของดินเหนียว ดังนั้นจะเห็นว่า

อนุภาคของดินเหนียวมีลักษณะคล้ายๆกับอนุมูลลบ(anion) ขนาดใหญ่สามารถที่จะเคลื่อนตัวไป ยังชั่วคราวได้เช่นเดียวกันกับ  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  และเมื่ออยู่ในสภาพแขวนลอยอนุภาคของดินเหนียวก็ จะมีน้ำและกลุ่มไอออนบวกห้อมล้อมอยู่เต็มไปหมด ดังนั้นอนุภาคของดินเหนียวที่อยู่ในสภาพ เช่นนี้จึงเรียกว่า clay micelle ซึ่งเป็นดินเหนียวที่อยู่ในสภาพคอลลอยด์(คีโรวัตน์ ศรีเกษเพชร, 2543)

## 2.1.1 ส่วนประกอบต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของดิน (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

### 2.1.1.1 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาในรูปอิสระจะมีผลทำให้ ลดความเหนียวของเนื้อดิน ลดการหดตัวในระหว่างการทำให้แห้งและการเผา ถ้าขนาดของเม็ดซิลิกาที่ปนมีขนาดใหญ่ จะลดความแกร่ง และความคงทนของดิน นอกจากนี้พบว่าเม็ดซิลิกา ถ้ามีขนาดเล็กมากมักจะทำปฏิกิริยาเป็นตัวลดอุณหภูมิ ถ้ามีขนาดใหญ่จะเพิ่มความทนไฟของเนื้อดิน

### 2.1.1.2 อะลูมินา (Alumina)

อะลูมินานอกจากจะมีอยู่ในแร่ดินเองแล้ว ยังมีในเฟลด์สปาร์ ไมกาและอะลูมิโนซิลิเกตอื่นๆ ส่วนมากมักจะหลอมได้ ส่วนพวกอะลูมินาอิสระจะพบในแร่ดินบางชนิดที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดของแร่บอกไซต์(Bauxite) ผลของอะลูมินาอิสระจะทำให้ลดความเหนียวของเนื้อดินและเนื้อดินมีความทนไฟมากขึ้น

### 2.1.1.3 สารประกอบอัลคาไล (Alkali bearing minerals)

สารประกอบอัลคาไลที่สำคัญคือ แร่หินฟีนมา ไมกา และพวกเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น โพแทสเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ จะมีผลทำให้ ลดความเหนียวตอนเปียกของดิน ลดจุดสุกตัวหรือความทนไฟ(Vitrification temperature) ของเนื้อดิน สารประกอบอัลคาไลเมื่อรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำดังนั้นจึงเรียกลักษณะนี้ว่าตัวลดอุณหภูมิ (Flux) สารประกอบอัลคาไลเมื่อหลอมตัวแล้วเวลาปล่อยให้เย็นจะไม่ตกผลึกแต่เกิดเป็นแก้ว

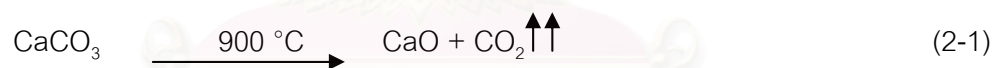
#### 2.1.1.4 สารประกอบเหล็ก (Iron compounds)

สารประกอบเหล็กที่เกิดปะปนอยู่ในเนื้อดินมีหลายตัวด้วยกันเช่น เฟอร์ริกออกไซด์ เฟอร์รัสออกไซด์ เฟอร์ริกซิลิเกต เฟอร์ริกซัลไฟด์ ฯลฯ สารประกอบของพวกเหล็กที่ละลายน้ำได้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีฟ้าอ่อนเมื่อแห้ง ถ้านำไปเผาทำให้มีสีน้ำตาลหรือดำต่างๆเป็นจ้ำๆหรืออาจเกิดจุดแร่เหล็ก(iron spot) จะเห็นได้จากกระถางดินเผาหรือผลิตภัณฑ์ดินเผาที่อำเภอปากเกร็ดจะมีสีน้ำตาลหรือส้ม

#### 2.1.1.5 สารประกอบแคลเซียม (Calcium compound)

สารประกอบแคลเซียมที่ปะปนในเนื้อดินเช่น แคลไซต์ แคลเซียมซิลิเกต ยิปซัม ฯลฯ ผลของสารประกอบแคลเซียมที่มีต่อเนื้อดินคือ

- 1) เป็นตัวลดอุณหภูมิการเผาเช่น เมื่อรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้จุดสุกตัวและความทนไฟของเนื้อดินลดลง
- 2) สารประกอบแคลเซียมพวกแคลไซต์ เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนเป็นปูนขาว(CaO) ตามสมการที่ 2-1



เมื่อเย็นตัวลงCaOจะดูดความชื้นในอากาศตามสมการทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการบวมตัวเสียรูปทรงหรือสลายตัวเป็นฝุ่นผงตามสมการที่ 2-2



แต่เมื่อเผาผลิตภัณฑ์จนร้อนแดง สารประกอบแคลเซียมจะรวมตัวกับสารประกอบเหล็กมีผลทำให้สีที่เกิดจากสารประกอบเหล็กมีสีซีดลง กลายเป็นสีครีมหรือสีเนื้อแทนที่จะเป็นสีแดง

- 3) แคลเซียมซัลเฟต ทนต่อการเผาในอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดรอยต่างในเนื้อดินภายหลังการเผา ถ้าวัดไม่ละเอียดหรือถ้ารวมตัวกับสารประกอบเหล็กก็มีผลทำให้สีดินอ่อนลงกว่าจริงหลังการเผา

#### 2.1.1.6 สารประกอบแบเรียม (Barium compounds)

สารประกอบแบเรียมจะมีผลต่อเนื้อดินคล้ายสารประกอบแคลเซียม

#### 2.1.1.7 สารประกอบแมกนีเซียม (Magnesium compounds)

สารประกอบแมกนีเซียมพบในดินเหนียว ส่วนมากจะพบในรูปของแร่แมกนีไซต์ (Magnesite) แร่โดโลไมท์ (Dolomite) แมกนีเซียมซัลเฟต ฯลฯ แมกนีเซียมมีผลต่อเนื้อดินคล้ายๆ กับสารประกอบแคลเซียมคือเป็นตัวลดอุณหภูมิลดความทนไฟของเนื้อดิน แต่มีผลน้อยกว่า

#### 2.1.1.8 สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ (Carbonaceous matter)

มีทั้งคาร์บอนในวัตถุดิบ  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  หรือพวกคาร์บอเนตและคาร์บอนจากอินทรีย์สาร ถ้ามีปนอยู่ในเนื้อดินจะทำให้

- 1) เนื้อดินเหนียวก่อนเผามีสีเทาไปจนสีดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารคาร์บอนว่ามีอยู่มากน้อยเพียงไร
- 2) ทำให้เกิดการเผาแบบรีดิวซิง (Reducing) เป็นเขม่าและควันซึ่งมีผลต่อสีและจุดสุกตัวของผลิตภัณฑ์ ถ้าเผาไม่ถูกต้องหรือไม่ชำนาญ
- 3) เมื่อเผาแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนจากอินทรีย์สาร และก๊าซคาร์บอน
- 4) คาร์บอนจากอินทรีย์สารจะถูกเผาอย่างรวดเร็วในการเผา เกิดการลุกไหม้ ทำให้อุณหภูมิในเตาเผาสูงขึ้นเร็วเกินไป มีผลทำให้การเผาเกิดจุดสุกตัว (Over vitrification) และมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยุบตัวบิดเบี้ยวเสียรูปทรงได้
- 5) ถ้าสารประกอบคาร์บอนไม่สลายตัวเนื่องจากเผาเร็วเกินไปจะเกิดเป็นแถบสีขึ้นในชั้นของเนื้อดิน

#### 2.1.1.9 สารประกอบของซัลเฟอร์ (Sulfur) หรือกำมะถัน

สารประกอบของซัลเฟอร์มักเกิดอยู่ในดินดำที่ติดอยู่ใกล้กับชั้นของถ่านหิน ซึ่งมีทั้งซัลเฟอร์ที่เป็นอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร ที่เกิดจากการสลายตัวของออกไซด์ของโลหะบางชนิด เช่น เหล็กซัลเฟตหรือไพไรต์  $\text{FeS}_2$  (Pyrite) แคลเซียมซัลเฟต  $\text{CaSO}_4$  เหล็กซัลเฟตเป็นต่างที่ละลาย

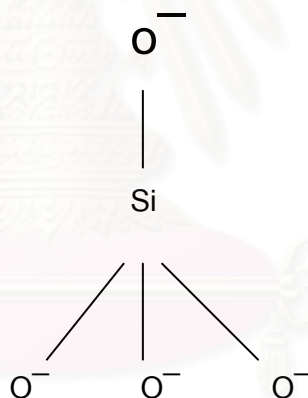
น้ำได้ถ้ามีอยู่ในปริมาณมาก จะทำให้ดินบวมและยุบตัวหลอมละลายในเตาเผา และเนื้อดินจะหลอมตัวมันวาว

## 2.1.2 ลักษณะอนุภาคของดิน (ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

แบ่งได้ตามหน่วยพื้นฐานดังนี้

### 2.1.2.1 Silica Tetrahedral Unite

ประกอบด้วย Silica 1 อะตอมล้อมรอบด้วย Oxygen 4 อะตอม อัดตัวกันเป็นรูปทรงที่มีสี่ด้าน คือมีอะตอม Oxygen เกาะรวมกันอยู่ที่ฐานทำให้เกิดเป็นแผ่นที่มีช่องรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป แผ่นนี้เรียกว่า Silica Tetrahedral Sheet ดังรูปที่ 2.1

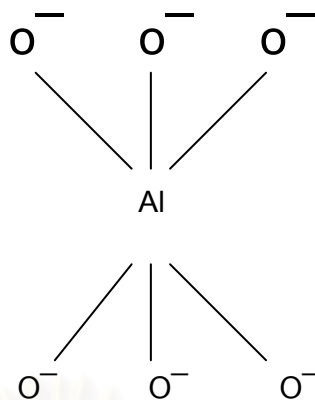


รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของ Silica Tetrahedral Unite

### 2.1.2.2 Alumina Octahedral Unite

ประกอบด้วย Alumina 1 อะตอมล้อมรอบด้วย Oxygen 6 อะตอม อัดตัวกันเป็นรูปทรงที่มีแปดด้านและจะเกาะกันเป็นแผ่นในแนวระดับ และเกิดการเกาะร่วมกันของ Oxygen เช่นเดียวกับ Silica Tetrahedral Sheet ดังรูปที่ 2.2

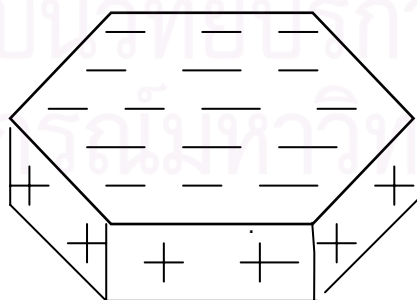




รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของ Alumina Octahedral Unit

### 2.1.3 ความเป็นประจุของดิน

อนุภาคดินโดยทั่วไปจะมีทั้งประจุบวก(Cation) และประจุลบ(Anion) แต่จะมีจำนวนประจุลบมากกว่า อาจกล่าวได้ว่าดินเป็นก้อนของ Anion ดีๆนี้เองและผิวด้านนอกจะดูดซับไอออนบวกไว้อย่างหลวมๆคือพวก Na, K, Ca และ Mg ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่มีในดินโดยทั่วไป ทำให้สภาพปกติของดินเป็นแบบที่เรียกว่า Ion Double Layer กล่าวคือเป็นสภาพที่มีประจุสองชั้น ชั้นในเป็นประจุลบของดินส่วนชั้นนอกเป็นประจุบวกที่ถูกดูดซับไว้ และจากการจับกันอย่างหลวมๆนี้เองทำให้เกิดการแลกเปลี่ยน Cation ชนิดอื่นๆได้ เราเรียก Cation พวกนี้ว่า “Exchange Cation” ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกระจายตัวของประจุบวกและลบบนอนุภาคดิน ( ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

ดังนั้นพอจะสรุปหาสาเหตุของการเกิดประจุลบของดินได้ดังนี้

#### 2.1.3.1 เกิดขึ้นบริเวณของผลึก (Exposed crystal edges)

บริเวณผลึกของดินที่แตกหักออกไปทำให้ Si และ Al หลุดออกจาก Oxygen ทำให้ Oxygen มี Electronegative Charge ค้างอยู่ ส่วนอีกด้านหนึ่งของ Oxygen ก็ยังคงเกาะอยู่กับ Si และ Al เมื่อ Oxygen ตามบริเวณขอบของผลึกอยู่ในสภาพนี้มากๆทำให้สามารถที่จะดูดประจุบวกได้

#### 2.1.3.2 เกิดจากกระบวนการ Isomorphous Substitution

เป็นขบวนการที่ไอออนของธาตุหนึ่งเข้าไปแทนที่ไอออนเดิม ซึ่งไอออนที่เข้าไปแทนที่นั้นจะมีขนาดใกล้เคียงหรือเท่ากัน แต่ Valance อาจไม่เท่ากันก็ได้ ประจุลบของดินจะเกิดจากกรณีที่ Cation ที่มี Valance ต่ำเข้าไปแทนที่ Cation ที่มี Valance สูงกว่าเท่านั้นเช่นใน Montmorillonite จะมี  $Mg^{2+}$  โดยเฉลี่ย 0.66 อะตอม เข้าไปแทนที่  $Al^{3+}$  ในจำนวนเท่ากันใน Al-sheet ประจุลบก็จะตกค้างอยู่เท่ากับ -0.86 ดังนั้นเมื่อมีปรากฏการณ์การไล่ที่ดังนี้มากๆ ประจุลบก็จะมีอำนาจสูงพอที่จะดูดยึดประจุบวกได้

## 2.2 การอบแห้งผลิตภัณฑ์ดินเผา (Drying)

ในส่วนผสมเนื้อดินปั้นจะมีน้ำปริมาณหนึ่ง น้ำนี้ทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดความเหนียวและยึดเกาะ หลังจากขึ้นรูปเสร็จแล้วน้ำทั้งหมดนี้จะต้องถูกขจัดออกไปจากผลิตภัณฑ์ ก่อนจะนำผลิตภัณฑ์ไปเผา

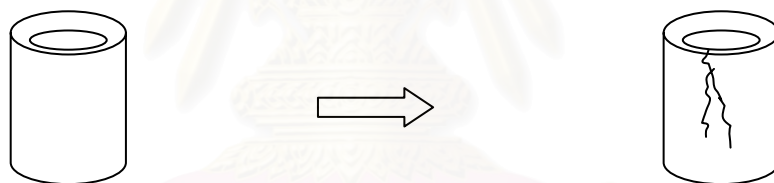
หลังจากขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ดินเผา ปริมาณของน้ำที่มีอยู่ภายในโครงสร้างจะถูกกำจัดออกไป เกิดเป็นช่องว่าง เป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์เกิดการโก่งตัว (Warping) และ การแตก (Cracking) ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีปริมาณน้ำมากจะมีการหดตัว (Shrinkage) สูง

สิ่งที่มีผลต่อการแห้งของผลิตภัณฑ์เซรามิกได้แก่อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และความเร็วอากาศ ซึ่งทั้งสามสิ่งจะมีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์

อัตราการอบแห้งที่เร็วเกินไป จะส่งผลให้บริเวณผิวภายนอกแห้งก่อนบริเวณตรงกลางและถ้าความร้อนที่ให้ไม่สม่ำเสมอก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีการหดตัว(Shrinkage) อาจเกิดการโก่งตัว(Warping) หรือ การแตก(Cracking) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ( นุชนภา ตั้งบริบูรณ์, 2538)



รูปที่ 2.4 การโก่งตัว(Warping) ของผลิตภัณฑ์เซรามิก (นุชนภา ตั้งบริบูรณ์, 2538)



รูปที่ 2.5 การแตก (Cracking) ของผลิตภัณฑ์เซรามิก (นุชนภา ตั้งบริบูรณ์, 2538)

## 2.2.1 วิธีการอบแห้งโดยทั่วไป

2.2.1.1 ระบบที่ไม่มีความชื้นควบคุมอัตราการแห้ง อากาศที่อยู่ในตู้อบควรกำหนดความเร็วเพื่อให้มีความสม่ำเสมอ อุณหภูมิควรเพิ่มอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันความแตกต่างของความชื้น (Moisture gradient) ระหว่างผิวนอกกับผิวตรงกลางของผลิตภัณฑ์ เป็นระบบที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำน้อย

2.2.1.2 ระบบที่มีความชื้นควบคุมอัตราการแห้ง เพื่อต้องการควบคุมให้ค่า stress ต่ำสุด ทำให้ได้ระบบที่ไม่มีความแตกต่างของความชื้น(no moisture gradient) แต่อุณหภูมิต้องมีความ

สม่ำเสมอ ความชื้นในเครื่องอบจะค่อยๆลดลงเมื่อปริมาณน้ำออกไปจากผลิตภัณฑ์ นิยมใช้กับชิ้นงานขนาดใหญ่หรือวัสดุพิเศษ

## 2.2.2 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

- 1) ปริมาณความร้อนที่ทำให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเดือด
- 2) ปริมาณความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิจากผลิตภัณฑ์ ห้องอบ และบรรยากาศภายในห้องอบร้อนถึงจุดสูงสุด
- 3) ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ
- 4) ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ผ่านออกไปจากห้องอบ

## 2.3 การเผาผลิตภัณฑ์ดินเผา (Firing)

การเผาในทางเซรามิก คือการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ดินเผาในเตา ภายในบรรยากาศที่เหมาะสม เพื่อเปลี่ยนสภาพดินให้เป็นถาวรวัตถุ มีความแข็งแรงเหมือนหิน ช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดความคงทนถาวรและสวยงาม

### 2.3.1 บรรยากาศที่ใช้ในเตาเผาโดยทั่วไป (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

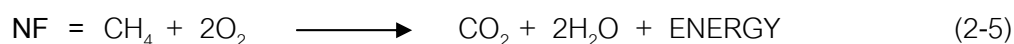
2.3.1.1 บรรยากาศออกซิเดชัน(Oxidation Firing) เป็นการเผาที่มีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และใช้ออกซิเจนมากเกินพอ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะมีออกซิเจนเหลืออยู่ดังปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังสมการที่ 2-3



2.3.1.2 บรรยากาศรีดักชัน (Reduction Firing) เป็นการเผาที่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในเตาเผาใช้ออกซิเจนไม่เพียงพอ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะมีคาร์บอนมอนนอกไซด์(CO) เหลืออยู่ดังปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังตามสมการที่ 2-4



2.3.1.3 บรรยากาศศูนวิหรัล (Neutral Firing) เป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่เลย ดังปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังตามสมการที่ 2-5



## 2.3.2 การหดตัวเมื่อเผา

ดินมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อเผาแตกต่างกัน แล้วแต่สิ่งเจือปนซึ่งอยู่ในดิน บางทีอาจหดตัว 6-7 เปอร์เซ็นต์ และถ้าเผาถึงจุดสุกตัวจะหดตัวประมาณ 20% เมื่อเผาดินจะเกิดปรากฏการณ์ที่อธิบายได้ดังนี้

### 2.3.2.1 Dehydration Period

แบ่งออกเป็น 2 ระยะ

1) Mechanical dehydration หรือ water smoking เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 20 - 150 องศาเซลเซียส ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือ น้ำที่ผสมในดินจะเริ่มระเหยออกมาเป็นควันลอยขึ้น จนกว่าดินจะแห้งสนิทและไม่มีน้ำดังกล่าวเหลืออีก ดินจะมีสภาพแข็งกว่าเดิม ถ้าหยุดให้ความร้อนและนำดินมาผสมกับน้ำอีกครั้งหนึ่งดินจะอ่อนและไม่มีความแข็งอีกต่อไป

2) Chemical dehydration หรือ Chemical water smoking เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 150 - 600 องศาเซลเซียส ถ้าให้ความร้อนแก่ดินต่อจากระยะแรกโมเลกุลของดินจะแตกและส่วนที่เป็นน้ำของโมเลกุลจะระเหยออกไป เหลือดินอยู่ในรูปของ Meta Kaoline ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) ถ้าหยุดเผาแล้วนำดินไปผสมกับน้ำอีกครั้งหนึ่ง ดินจะยังคงแข็งและมีความแข็งเหมือนเดิม

### 2.3.2.2 Oxidation Period

เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 350-950 องศาเซลเซียส สิ่งต่างๆที่ปะปนมากับดินเช่น เศษไม้ ใบหญ้า จะถูกเผาไหม้หมดไปและจะเกิดเป็นโพรงขึ้น นอกจากนี้เศษแร่ต่างๆเช่น พวกคาร์บอนเนตซิลไฟต์ และซิลเฟต จะแตกตัวออกด้วยในระยาะนี้ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินจะเปลี่ยนเกี่ยวกับน้ำหนัก ขนาด สีและความพรุน

### 2.3.2.3 Vitrification Period

เริ่มตั้งแต่ 900 องศาเซลเซียส ขึ้นไป Vitrification คือระยะหนึ่งของการเผา ซึ่งประกอบด้วย

- 1) ส่วนผสมในเนื้อดินบางชนิดเริ่มละลาย
- 2) ส่วนที่หลอมละลายจะพยายามละลายส่วนที่ไม่หลอมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) ส่วนที่ละลายจะไหลไปตามช่องว่างทำให้เนื้อดินแน่นทึบขึ้น
- 4) ถ้าหากมีส่วนผสมและอุณหภูมิที่พอเหมาะ อาจเกิดการตกผลึกใหม่ในเนื้อดินได้

ทั้งนี้เพราะซิลิกาและอลูมินาในเนื้อดินจะรวมตัวกันเป็น Mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม ทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ถ้าเนื้อดินมีส่วนที่หลอมละลายมากเกินไป จะทำให้ดินยุบตัวลงได้

### 2.3.3 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในเนื้อดินบ้นที่ถูกเผา (ปริดา พิมพ์ขาวชา, 2539)

กระบวนการเผาอาจแยกออกได้หลายขั้นตอนตามอุณหภูมิต่างๆ แต่ต้องเข้าใจว่าขั้นตอนเหล่านี้มันเกิดต่อเนื่องกันจนไม่สามารถแยกแต่ละขั้นตอนให้เด่นชัดได้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

2.3.3.1 การอบแห้งที่สมบูรณ์ ขั้นตอนนี้จะเป็นการขจัดความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาค ซึ่งยังคงหลงเหลืออยู่หลังจากการปล่อยหรืออบผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปใหม่ๆ ให้แห้ง ผลิตภัณฑ์จะแห้งสนิทที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

2.3.3.2 การเผาไหม้พวกอินทรีย์สาร ดินเหนียวทุกชนิดจะมีอินทรีย์สารเจือปนอยู่ในรูปของลิกไนต์เสมอ อินทรีย์สารเหล่านี้จะเกิดการเผาไหม้รวมตัวกับออกซิเจนตั้งแต่อุณหภูมิ 200 – 700 องศาเซลเซียส

2.3.3.3 การขจัดกลุ่ม  $\text{OH}^-$  ออกจากดิน ขั้นนี้ประกอบด้วย การแยกสลายผลึกของดินออกเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลทำให้เกิดการหดตัวพร้อมกับเกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์

2.3.3.4 การเปลี่ยนแปลงของหินแก้ว หินแก้วที่อุณหภูมิปกติจะเปลี่ยนไปเป็นหินแก้วที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดการขยายตัว

2.3.3.5 การเกิดผลึกในเนื้อดิน ที่อุณหภูมิประมาณ 980 องศาเซลเซียส ในเนื้อดินจะมีการจัดเรียงตัวใหม่

2.3.3.6 การเกิดแก้ว เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส จะเกิดการหลอมตัวเป็นเนื้อแก้วในบางตำแหน่งของเนื้อผลิตภัณฑ์

อัตราการให้ความร้อนเป็นส่วนสำคัญในการเผา การเผาในเตาอุโมงค์โดยส่วนใหญ่อัตราการให้ความร้อนช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที และที่ 500 – 900 องศาเซลเซียส ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที หากอัตราการเพิ่มความร้อนมากไป ทำให้สารอินทรีย์เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เหลือถ่านสีดำในผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นยังทำให้เกิดรอยแตกได้ (อารีวรรณ บุญเพ็ง, 2535)

คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปในการเผาระยะต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนไปในการเผาระยะต่างๆ

คุณสมบัติที่เปลี่ยนไป	ระยะในการเผาและช่วงอุณหภูมิ		
	Dehydration 20-600 องศาเซลเซียส	Oxidation 350-950 องศาเซลเซียส	Vitrification 900 ↑ องศาเซลเซียสขึ้นไป
สี	สีอ่อนลง	ดินที่มีเหล็กจะมีสีเข้มขึ้น ดินที่มี Carbonaceous matter จะมีสีอ่อนลง	สีเข้มขึ้น
ความพรุนตัว	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลง
การหดตัว	เพิ่มขึ้น	ขยายตัวเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น
น้ำหนัก	ลดลง	ลดลง	เกือบคงที่
ความแข็งแกร่ง	เพิ่มขึ้น	ลดลง	เพิ่มขึ้น

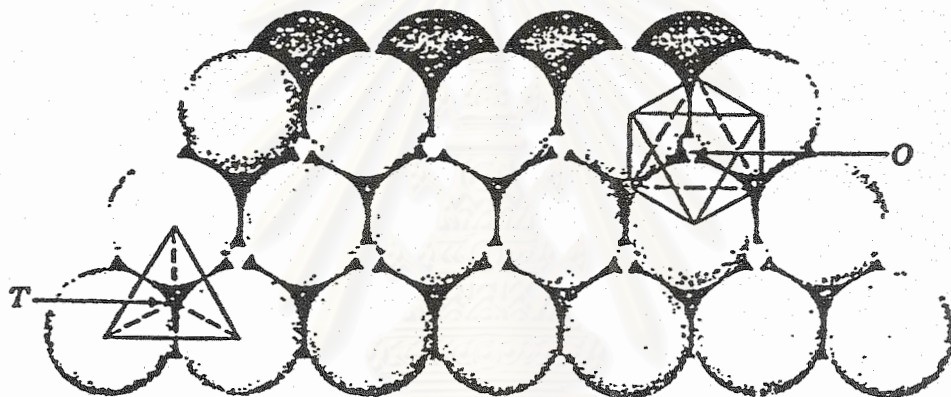
ที่มา : ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีสำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและพลังงาน, 2529

## 2.4 คุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจของเซรามิก

### 2.4.1 การจัดระเบียบของแอนไอออนในผลึกเซรามิก

ในผลึกเซรามิกซึ่งประกอบด้วยแคทไอออนและแอนไอออน โดยทั่วไปแอนไอออนมักจะมีขนาดใหญ่กว่าแคทไอออน ดังนั้นการจัดระเบียบของไอออนอย่างเบียดเสียดจึงพิจารณาเฉพาะแอนไอออนเท่านั้น ส่วนแคทไอออนซึ่งมีขนาดเล็กจะแทรกอยู่ในช่องแทรกหรือตำแหน่งแทรกของ

แอนไอออนเหล่านี้ในการจัดระเบียบของแอนไอออนนั้น และในการจัดเรียงแบบเบียดเสียดนี้จะทำให้เกิดช่องแทรกได้สองชนิดคือ ช่องแทรกทรงแหะฮีดรัล ซึ่งเป็นช่องแทรกที่ล้อมรอบด้วยแอนไอออนสี่ไอออน โดยสามไอออนอยู่ในระนาบเดียวกันและไอออนที่สี่อยู่ในระนาบที่ประชิดและขนานกับระนาบแรก ส่วนชนิดที่สองเป็นช่องแทรกออกตะฮีดรัล ช่องแทรกชนิดนี้จะถูกล้อมรอบด้วยแอนไอออนหกไอออน โดยมีแอนไอออนอยู่บนระนาบที่ประชิดและขนานกันสองระนาบๆละสามไอออน และแต่ละระนาบประกอบเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า ซ้อนกันในลักษณะที่มุมยอดของสามเหลี่ยมทั้งสองเหลื่อมกัน (อิติพันธ์ กว้างสุขสถิตย์, 2535) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ช่องแทรกทรงแหะฮีดรัล(T) และช่องแทรกออกตะฮีดรัล(O) (อิติพันธ์ กว้างสุขสถิตย์, 2535)

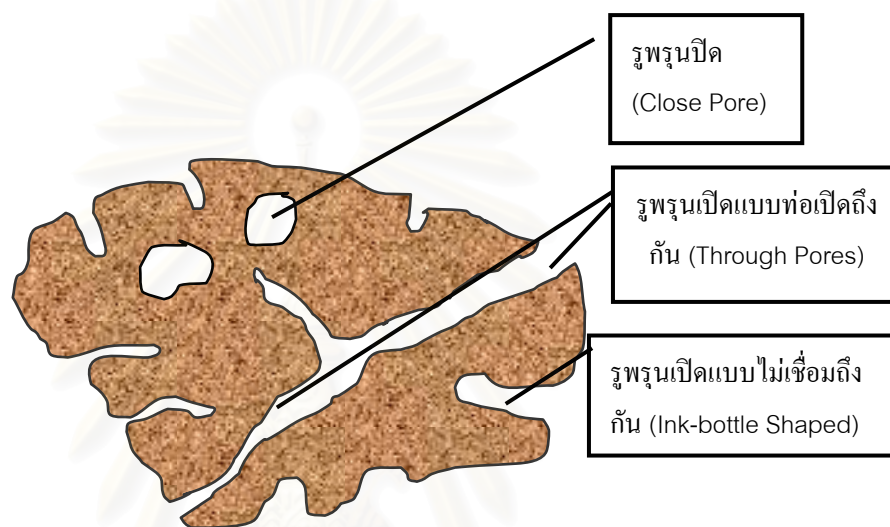
#### 2.4.2 ความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์เซรามิก

ความพรุนตัวอาจพิจารณาถึงคุณสมบัติเฉพาะของมัน ในรูปสัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรของเนื้อสารทั้งหมด ความพรุนตัวอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 0 ถึงมากกว่า 90 % ของปริมาตรทั้งหมด ค่าความพรุนตัวนี้เป็นค่าพื้นฐานที่ต้องการทราบ คุณสมบัติหลายประการของเซรามิกขึ้นกับรูปร่างและการกระจายตัวของรูพรุน เช่น สภาพการนำไฟฟ้าและความร้อนเปลี่ยนแปลงไปตามความพรุนตัว

วิธีการง่าย ๆ หนึ่งที่จะบอกคุณสมบัติเฉพาะของความพรุนตัวคือ การบอกค่าความพรุนตัวปรากฏหรือความพรุนตัวทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนเปิดรวมกับรูพรุนปิด



รูพรุนเปิด(Open pore) หมายถึง รูพรุนที่สามารถติดต่อกับผิวนอกของผลิตภัณฑ์ได้  
 รูพรุนปิด(Close pore) หมายถึง รูพรุนที่ไม่สามารถติดต่อกับผิวนอกของผลิตภัณฑ์ได้  
 จึงเห็นได้ว่ารูพรุนเปิดมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความสามารถที่จะยอมให้ของไหลไหลผ่านไปได้ ความสามารถในการยึดเหนี่ยวเมื่อเกิดลักษณะสูญญากาศ ปริมาณพื้นที่ผิวที่จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาและถูกกัดกร่อนโดยสารเคมี  
 รูพรุนปิดและรูพรุนเปิดลักษณะต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูพรุนชนิดต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์เซรามิก ( Schubert and Husing, 2000)

ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จยังมีได้ทำการเผา ความพรุนตัวเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของรูพรุนเปิด ขณะทำการเผาผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความพรุนตัวโดยปริมาตรลดลง ถึงแม้ว่ารูพรุนเปิดบางส่วนจะถูกสกัดออกไปโดยตรงแต่ก็มีรูพรุนเปิดส่วนมากเหมือนกันที่แปรสภาพไปเป็นรูพรุนปิด ผลสุดท้ายในระยะแรกของการเผา สัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุนเปิดจะเพิ่มขึ้นและจะลดลงในช่วงสุดท้ายของการเผา โดยปกติรูพรุนเปิดจะหมดไปเมื่อความพรุนตัวมีค่าประมาณ 5%

ในผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ ท่อระบายน้ำ และ กระเบื้องชนิดต่างๆ หากเผาอุณหภูมิต่ำไปเนื้อผลิตภัณฑ์จะมีรูพรุนเล็กๆเป็นจำนวนมากทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงไม่ดี ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เผาอุณหภูมิสูงเกินไป เนื้อผลิตภัณฑ์จะมีเนื้อแก้วเป็นส่วนใหญ่ทำให้มีความแข็งแรงดี แต่มีความพรุนตัวน้อย ตัวที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีส่วนใหญ่ได้แก่ Fe ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีแดงหรือน้ำตาล(ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

ในการผลิตเซรามิกเนื้อพรุนจะประกอบด้วยวัตถุดิบคือ ดินเหนียว เฟลสปาร์ ซีลี้อย ไม้ก๊อก เมื่อเอี่ยมถึงจุดสุกตัวแล้วจะเกาะกัน บริเวณที่เป็นซีลี้อยจะไหม้และทำให้เนื้อเกิดความพรุนตัว (สุรินทร์ นาคะวิวัฒน์, 2529)

ในการผลิตอิฐฉนวนหรืออิฐไฟร์เคลย์ มีน้ำหนักเบาและรูพรุนมาก รูพรุนจะทำโดยการผสม โคลกหรือซีลี้อยในส่วนผสมของอิฐฉนวน เมื่อเผาาก็จะเกิดก๊าซขึ้นหนีออกไป จะทำให้อิฐมีรูพรุน จึงมีน้ำหนักประมาณ 1 ใน 3 ของอิฐธรรมดา ใช้ในการหุ้มผนังด้านนอกของเตาเผาเพื่อลดการสูญเสียความร้อนในเตา(เล็ก สีคง, 2540)

### 2.4.3 ความแข็งแรง

เนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยทั่วไปที่ไม่มีเนื้อแก้วเกิดขึ้น จะมีความแข็งแรงประมาณ 2,500 ถึง 5,000 psi. และถ้ามีเนื้อแก้วในผลิตภัณฑ์จะมีความแข็งแรงประมาณ 7,000 ถึง 10,000 psi. (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

จากคุณสมบัติต่างๆของเซรามิกและวัตถุดิบที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเซรามิกหรือดินเผาจะนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักได้

การทดลองนี้จะใช้ดินเหนียว(clay) ที่ซื้อจากหมู่บ้านทำเครื่องปั้นดินเผา ที่บ้านเกาะเกร็ด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ดินที่ได้เป็นดินที่พร้อมจะใช้ทำผลิตภัณฑ์ดินเผาเพียงแต่ยังไม่ได้เติมทรายในเนื้อดิน ดินมีความเหนียว สีไม่ดำเกินไป สีออกเทาปนเหลือง มีเปอร์เซ็นต์ของเหล็กค่อนข้างสูง เผาในอุณหภูมิค่อนข้างไม่สูงมากเพราะมีความทนไฟไม่สูงมากนัก เป็นวัตถุดิบที่ใช้ทำกระถาง ครก อ่าง หม้อดิน เป็นต้น(สุรพล ดำหริภักกุล, 2542) เรียกผลิตภัณฑ์พวกนี้ว่าเอิเทนแวร์ (Earthen Ware) มีเนื้อหยาบ หนา มีความพรุนตัวมาก(Porous)(ทวี พรหมพฤกษ์, 2523)

## 2.5 ถ่านดูดซับ

ถ่านดูดซับเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ควรเป็นของเหลือทิ้ง มีความสะดวกในการนำมาใช้ มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำและหาได้ง่ายในท้องถิ่น อินทรีย์วัตถุหมายถึงสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น ชานอ้อย กากเมล็ดกาแฟ แกลบ ชังข้าวโพด ซีลี้อย เป็นต้น

ซีลี้อยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ cellulose(คาร์โบไฮเดรตที่สำคัญชนิดหนึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช), hemicellulose, lignin(สารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของไม้), pectin(คาร์โบไฮเดรตสีขาวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงชนิดหนึ่งพบในพืชและผลไม้สุก) และส่วน

อื่นๆ โดยคิดเป็นร้อยละ 50, 22.4, 22.3, 0.03 โดยน้ำหนักตามลำดับ(วัลย์ภรณ์ อะนะ และ สุจิตรา พงศรกุลพานิช, 2543) ซี้เลื่อยเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำกว่ากะลามะพร้าว มักจะให้ ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนสูง ความหนาแน่นต่ำและค่าเถ้าต่ำประมาณร้อยละ 0.3 -1.2 ซึ่งใช้ ในการดูดซับสารละลายได้ดี ต่างจากคาร์บอนจากกะลามะพร้าวจะมีความหนาแน่นสูง มีขนาดรูพรุนที่หลากหลาย และละเอียดมาก เหมาะกับการดูดซับก๊าซแต่ไม่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสีย (วรพจน์ กนกกันพงษ์, 2544)

ซี้เลื่อยเป็นผลผลิตพลอยได้จากการเลื่อยไม้ชนิดต่างๆ ทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งซึ่ง สมบัติของไม้ทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซี้เลื่อยนั้นสามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาถูกหรืออาจไม่มีราคา ในพื้นที่ทั่วไปที่มีโรงเลื่อยไม้หรือโรงงานทำไม้แปรรูปเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ ซี้เลื่อยอาจนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น นำไปผลิตเป็นไม้อัดแปรรูป ใช้เป็นตัวขนวนกัน ความร้อนในโรงงานทำน้ำแข็งก้อน ใช้ในการเพาะเลี้ยงเห็ดฟาง หรือใช้ทำปุ๋ย เป็นต้น

ซี้เลื่อยเป็นวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในปริมาณสูง จึงเหมาะแก่การ นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง

สมบัติของไม้	ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง
ค่าคาร์บอน(%)	40 - 45	40 - 42
ค่าสารระเหย(%)	55 - 60	55 - 60
ค่าเถ้า(%)	0.3 -1.1	0.3 - 1.2

ที่มา : ปิยะพร บารมี (2542)

ขั้นตอนในการแปรสภาพอินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่าน ทำโดยนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็น องค์ประกอบหลัก มาเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อยกว่าปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

ในระยะแรกของการเผา ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจน จะสลายออกมาก่อนในรูป ของก๊าซ ทำให้ได้ถ่านที่มีสัดส่วนของคาร์บอนสูงขึ้น เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นสารอินทรีย์จะแตกสลาย พร้อมกับปล่อยน้ำมันดิน(Tar) และสารอื่นๆเป็นจำนวนมากออกมา สีของวัตถุดิบเริ่มเปลี่ยนเป็นสี ดำเนื่องจากปฏิกิริยา Carbonization ของเซลลูโลสและลิกนินเป็นหลัก เซลลูโลสจะสูญเสียมาก ที่สุดในช่วงนี้

กลไกในการทำถ่านสามารถอธิบายได้โดย ระยะเวลาวัตถุดิบจะถูกทำให้แห้งโดยการไล่ไอน้ำออกไป จนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 170 องศาเซลเซียส อินทรีย์วัตถุจะเริ่มแตกสลายบางส่วนพร้อมกับเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และกรดน้ำส้มออกมา จากนั้นที่อุณหภูมิประมาณ 270 – 280 องศาเซลเซียส จะมีการแตกสลายสารอินทรีย์เกิดเป็นน้ำมันดิน เมธานอล และสารอื่นๆเป็นจำนวนมาก เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส สีของไม้เริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำ โดยปฏิกิริยาคาร์โบไนเซชันของเซลลูโลสและลิกนินเป็นหลัก ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดแบบปฏิกิริยา Radical เป็นสำคัญ โดยมวลของเซลลูโลสจะสูญเสียมากที่สุดอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 300 – 400 องศาเซลเซียส ส่วนมวลของลิกนินจะค่อยๆสูญเสียอย่างช้าๆเมื่อเทียบกับเซลลูโลส ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ไม่สามารถขจัดไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากวัสดุได้หมด ทำให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพไม่ดี ถ้าผลิตถ่านที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะทำให้ผลผลิตต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มาก ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านเพื่อให้ได้ผลผลิตและประสิทธิภาพในการแปรสภาพวัตถุดิบให้เป็นถ่านสูงสุดก็คือช่วงอุณหภูมิ 400 – 600 องศาเซลเซียส และควรเผาถ่านให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนที่สิ้นสุดโดยเร็ว เพื่อลดการสูญเสียของการสลายตัวเนื่องจากความร้อน และควรควบคุมความสม่ำเสมอของความร้อนและอุณหภูมิของการทำคาร์โบไนเซชันให้คงที่ด้วยจึงจะได้ถ่านที่มีคุณภาพดี(ชฎิล ฉายรัศมี, เมธิชลไมตรี และ สุนทรี เพ็องฟู, 2541)

การทดลองนี้ใช้ชี้เลื่อย(จากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ซึ่งมีทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งผสมกัน)เพราะเป็นส่วนผสมในการทำเซรามิกเนื้อพรุน(สุรินทร์ นาคะวิวัฒน์ ,2529) นอกจากนั้นชี้เลื่อยยังมีอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อผสมกับดินแล้วมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าวัสดุชีวมวลประเภทอื่น เมื่อนำมาเผาชี้เลื่อยบางส่วนจะสลายไปเกิดเป็นรูพรุนขึ้นและบางส่วนจะเป็นถ่านทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมากขึ้น

สำหรับในการวิจัยฉบับนี้ จะนำส่วนผสมดินและชี้เลื่อยมาเผาให้ชี้เลื่อยเป็นถ่าน (Carbonization) โดยไม่มีการกระตุ้น(Activation)เหมือนกับถ่านกัมมันต์

### 2.5.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) หรือ หมายถึง ถ่านที่มีลักษณะรูปร่างอสังฐานที่มีความเหนือชั้นกว่าถ่านทั่วไป ด้วยมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนภายในมากมายเป็นพิเศษ และมีคุณสมบัติในการดูดซับพิษ ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้

ประโยชน์ต่างๆได้หลากหลายทั้งในการใช้กับของเหลวและก๊าซ ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดติดผิวที่ใช้ งานได้กว้างขวางเป็นพิเศษเพราะมีขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในขนาดต่างๆที่สามารถทำ การควบคุมตามความต้องการของตลาดได้ (Baker et al., 1997)

#### 2.5.1.1 ชนิดของถ่านกัมมันต์

แบ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532) ดังนี้

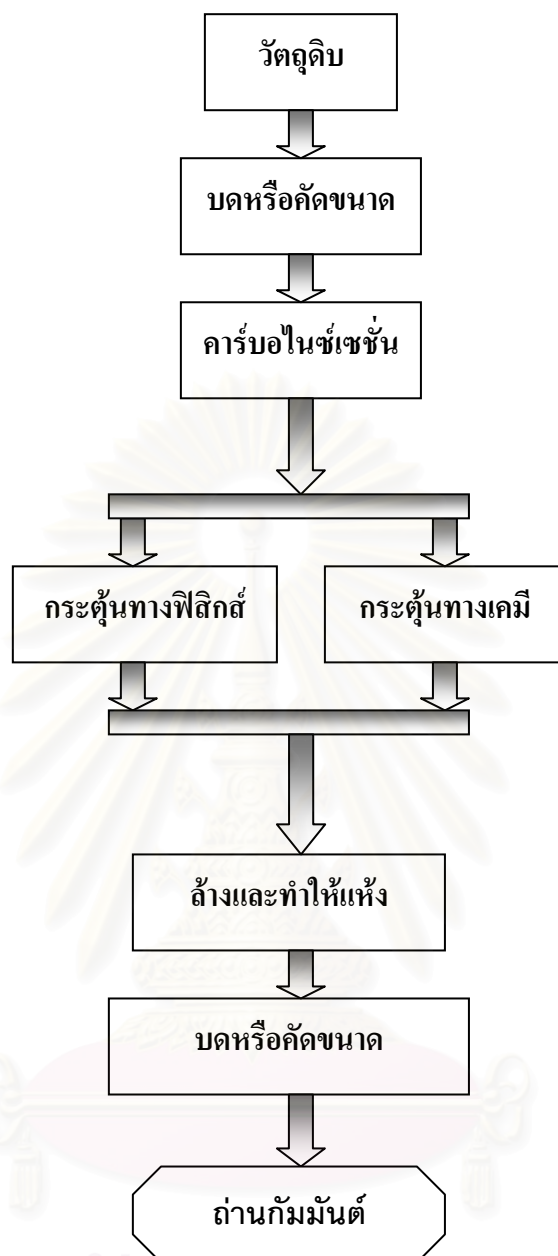
- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon: PAC) เป็นถ่านที่มีขนาด ปริมาณที่ร่อนผ่านแรงแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก
- 2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon: GAC) เป็นถ่านที่มีขนาด ปริมาณที่ร่อนผ่านแรงแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

#### 2.5.2 การผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ ได้มีการศึกษาวิจัย ปรับปรุงและพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการนำไปใช้งาน รวมทั้งแหล่งวัตถุดิบ และคุณสมบัติของ ถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

##### 2.5.2.1 การคัดเลือกและเตรียมวัตถุดิบ

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบใดๆ ก็ได้ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ ประกอบหลัก อยู่ด้วย เช่น ไม้ ชี้เลื่อย กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด หรือวัตถุดิบที่เป็นถ่าน เช่น ถ่านลิกไนท์ ถ่าน บิทูมินัส เป็นต้น ในการผลิตเพื่อการค้า สมบัติบางประการของวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิต ถ่านกัมมันต์ มีดังนี้ คือมีค่าคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สูง มีปริมาณความชื้น (moisture) ต่ำ มีสารที่ระเหยได้ (volatile matter) ต่ำ มีปริมาณขี้เถ้า (ash) ต่ำ ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ และสามารถ ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมแก่การผลิตนั้น นอกจากพิจารณาสมบัติบางประการของวัตถุดิบแล้ว ยังต้องคำนึงถึงราคาต้นทุน และกระบวนการผลิต ตลอดถึงวัตถุประสงค์การนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานด้วย วัตถุดิบต่างๆ ที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 2.4

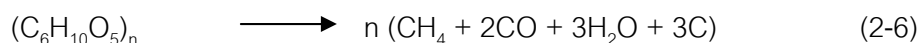
ตารางที่ 2.4 วัสดุดิบต่างๆ ที่นำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

ชานอ้อย (Bagasses)	วัชพืชทะเล (Kelp and seaweed)
กากน้ำตาลบีท (Beet-sugar sludges)	เขม่า (Lampblack)
เลือด (Blood)	กากหนัง (Leather waste)
กระดูก (Bones)	ลิกนิน (Lignin)
แป้ง (Carbohydrates)	ถ่านลิกไนท์ (Lignite)
เมล็ดพืช (Cereals)	กากน้ำตาล (Molasses)
ถ่านหิน (Coal)	เปลือกถั่ว (Nut shell)
กะลามะพร้าว (Coconut shells)	ถ่านพีท (Peat)
กากกาแฟ (Coffee beans)	กากปิโตรเลียม (Petroleum acid sludge)
ซังข้าวโพด (Corncobs and corn stalks)	ถ่านหินน้ำมัน (Petroleum coke)
เปลือกเมล็ดฝ้าย (Cottonseed hull)	ของเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษ (Pulp-mill waste)
ของเสียจากโรงกลั่น (Distillery waste)	แกลบ (Husk)
ฝุ่นจากปล่องไฟ (Flue dust)	เศษยาง (rubber waste)
เมล็ดผลไม้ (Fruit pits)	ขี้เลื่อย (sawdust)
ถ่านกราไฟท์ (Graphite)	ไม้ (wood)

ที่มา: Hassler (1974)

### 2.5.2.2 การเผาวัสดุดิบให้เป็นถ่าน หรือการคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization)

ขั้นตอนนี้ทำโดย ทำการเผาวัสดุดิบแบบไพโรไลซิส (pyrolysis) กล่าวคือเป็นการเผาวัสดุดิบในระบบสภาวะอับอากาศหรือไร้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ทั้งนี้เพื่อป้องกันปฏิกิริยาการสันดาปจากก๊าซออกซิเจน โดยปกติทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้เผาในขั้นตอนนี้จะเผาที่  $200-500\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเมื่อเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (char) ที่เป็นของแข็งสีดำตลอด (uniformly black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp) ปราศจากขี้เถ้า (no ash) สำหรับวัสดุที่มีเซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ขี้เลื่อย เปลือกทุเรียน ซังข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ เป็นต้น เมื่อถูกเผาแบบไพโรไลซิส จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่



ถ่านซาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนในเซชันนี้ ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะการเผาที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 200 – 500 °C นั้น ยังคงมีน้ำมันดิน (tar) ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวของถ่าน จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

### 2.5.2.3 การกระตุ้น หรือการแอคติเวชัน (Activation)

การกระตุ้นเป็นขั้นตอนที่ทำให้ความพรุนเพิ่ม และทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยการกำจัดน้ำมันดินให้หลุดออกมา จึงทำให้ผิวที่ได้มีอะตอมคาร์บอนอิสระอยู่ด้วย ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น(พงศศักดิ์ โอชารส, 2539) การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกวิธีการกระตุ้นที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ใหญ่ๆ คือ

#### 1) การกระตุ้นด้วยวิธีทางฟิสิกส์ (Physical activation)

วิธีการนี้มักจะใช้ก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) เช่น ไอน้ำ, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ อากาศ ไปทำการออกซิไดซ์น้ำมันดินและอะตอมของคาร์บอนบางตัวในโครงสร้างผลึกในสภาวะที่ควบคุมไว้ทำให้รูพรุน (pore) กว้างมากขึ้นและทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Activation with steam) โดยการให้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะกระตุ้นที่อุณหภูมิประมาณ 760 – 950 °C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 2-7



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะปฏิกิริยาจะกลายเป็น diffusion controlled rate ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอก อาจจะถูกเผาไหม้ได้ ทำให้ขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคลดลง



- การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) (Activation with carbondioxide) โดยการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 2-8



จากค่า  $\Delta H$  จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 850 – 1,100 °C ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้อยู่ แต่ในทางการปฏิบัติแล้วจะใช้ก๊าซเชื้อเพลิงเผาไหม้ ซึ่งจะให้ทั้งไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอาจมีก๊าซออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อย หรืออาจจะมีการเติมไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้น โดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

- การกระตุ้นด้วยอากาศ (Activation with air) โดยการนำก๊าซออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ จัดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ 2-9 และ 2-10



การใช้อากาศเพื่อทำการกระตุ้นมีการใช้กันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยากกว่า อีกทั้งก๊าซออกซิเจนอาจจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ผิวของถ่านทำให้เกิดความเสียหายได้ด้วย

การกระตุ้นทางกายภาพนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย คือ

ข้อดี เมื่อกระตุ้นเสร็จแล้วสามารถนำไปใช้ได้เลย ไม่มีปัญหาในเรื่องการล้างสารตกค้างที่อาจเป็นอันตราย

ข้อเสีย ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูง และรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเล็กกว่าชนิดที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี รูพรุนมีขนาดประมาณ micropore ซึ่งเหมาะสำหรับดูดกลิ่น ไอน้ำ หรือ ก๊าซพิษ

## 2) การกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (Chemical activation)

วิธีกระตุ้นด้วยเคมีนี้อาจทำได้ 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 นำวัตถุดิบมาทำการเผาในที่อับอากาศให้เป็นถ่านก่อน แล้วจึงนำไปแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้น จากนั้นจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิสอีกครั้ง

แบบที่ 2 นำวัตถุดิบแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้น แล้วจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิส ควบคู่ไปกับการทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านในขั้นตอนเดียว

ยกตัวอย่างกระตุ้นด้วยสารซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) ในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นชนิดหนึ่ง อัตราส่วนที่ใช้คือสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นประมาณ 0.5 ถึง 4 ส่วน ต่อน้ำหนักของวัตถุดิบแห้ง 1 ส่วน บางครั้งอาจมีการเติมกรดเกลือ (HCl) หรือ กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ลงไปเล็กน้อย จากนั้นนำไปเผาในที่อับอากาศในช่วงอุณหภูมิ 400-900 °C นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างน้ำและกรดเกลือเจือจาง เพื่อเอาซิงค์คลอไรด์ที่เหลือออก (พงศศักดิ์ โอซารส, 2539) แล้วล้างด้วยสารละลายเบสเจือจางเพื่อปรับค่า pH ให้เหมาะสม จากนั้นล้างตามด้วยน้ำที่สะอาดจนค่า pH คงที่

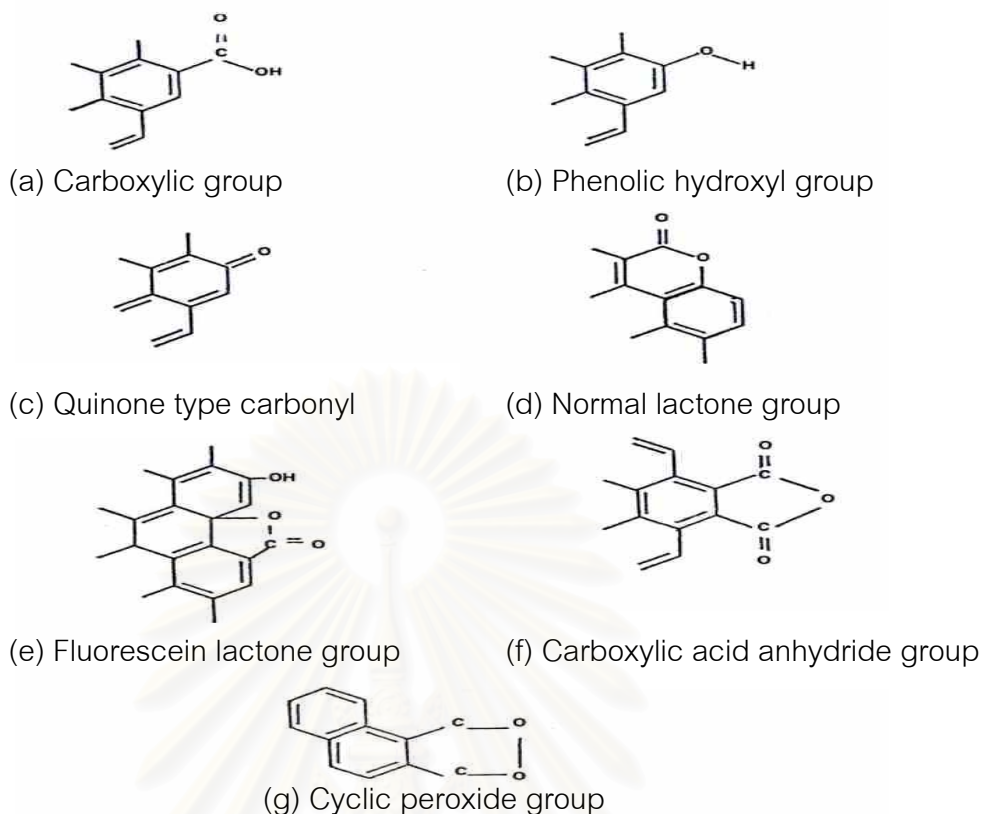
การกระตุ้นทางเคมีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังนี้คือ

ข้อดี ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและผลผลิตที่ได้มากกว่าวิธีทางกายภาพ

ข้อเสีย ต้องล้างสารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนใช้งาน และอาจมีสาร เคมีตกค้างได้

### 2.5.3 หมู่ฟังก์ชันนัล (Functional Group) ของถ่านกัมมันต์

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และขั้นตอนการกระตุ้น องค์ประกอบของวัตถุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ และวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกันจะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน และมีหมู่ฟังก์ชันนัลเกาะอยู่ที่ผิวคาร์บอนแตกต่างกันด้วย รูปที่ 2.9 แสดงหมู่ฟังก์ชันนัลบางหมู่ที่เกาะอยู่กับผิวของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.9 หมู่ฟังก์ชันหลักที่เกาะอยู่กับผิวของถ่านกัมมันต์ (Cookson, 1978)

## 2.5.4 การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

### 2.5.4.1 การประยุกต์ใช้กับของเหลว

- แยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจลาติน น้ำส้ม เพ็คติน น้ำผลไม้ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องตีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้เครื่องตีมีรสชาติดีขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยาและเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (streptomycin) คาเฟอีน (cafein) โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate) รวมทั้งกรดต่างๆ
- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst carrier) เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst support) สำหรับซิงค์อะซีเตทในโรงงานผลิตไวนิลอะซีเตท
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย

#### 2.5.4.2 การประยุกต์ใช้กับก๊าซหรือไอ

- กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซีเลียม อะซีทีลีน แอมโมเนีย เป็นต้น
- ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และคายออกที่ความดันของไอต่ำๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก เป็นต้น
- กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ (organic sulfur compound) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และสิ่งเจือปนอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม
- กำจัดกลิ่นจากอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดลง
- ใช้ดูดซับกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับหน่วยปฏิบัติการให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบดของถ่านกัมมันต์ (activated carbon bed)
- ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ

## 2.6 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption)

การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและทางด้านสิ่งแวดล้อม การใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการบีโตรเลียม อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องกรองน้ำดื่ม และใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อการบริโภคและอุปโภค เป็นต้น สำหรับการ

ประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การกำจัดพวกสารพิษต่างๆ ทั้งที่อยู่ในรูปของก๊าซและของเหลว เช่น การดูดติดผิวก๊าซมลพิษต่างๆ ในอากาศ การลดปริมาณโลหะหนักเป็นพิษที่ละลายในน้ำ การนำบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

การดูดซับเป็นกระบวนการที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายหรือก๊าซ โดยให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างตัวถูกดูดซับ(Adsorbate) กับสารดูดซับ(Adsorbent) ซึ่งโดยทั่วไปมีกลไกของการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ก. การแพร่ภายนอก(External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

ข. การแพร่ภายใน(Internal Diffusion) เป็นกลไกที่ตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดติดผิว

ค. ปฏิกิริยาพื้นผิว(Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของสารดูดติดผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก(ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายตัวบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับผิวได้แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะการดูดซับแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

### 2.6.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่ไม่เกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันและไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน แต่การดูดซับเกิดขึ้นจากการสัมผัสกันเฉพาะตัว(Individuality of Interacting Species) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างเบาบางคือแรง "แวน เดอ วาลส์" (Van der Waals Forces) การดูดซับทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า Van der Waal's adsorption (ศิริวัฒน์ ศรีเกษเพชร, 2543) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล(Intermolecular Cohesion) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Forces) นั่นเอง

การดึงดูดกันด้วยแรงที่อ่อน จึงทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อยอยู่ในช่วง 0.5 – 5 กิโลแคลอรีต่อโมล และเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ทั้งหมด (Sawyer, McCarty และ Parkin, 1994) นั่นก็คือเกิดการหลุดออก(Desorption) ของสารถูกดูดซับจากสารดูดซับ นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพนี้จะไม่มีความจำเพาะ(Specific Site) กล่าวคือโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะมีความอิสระที่จะถูกดูดซับบนตำแหน่งใดๆก็ได้บนผิวสารดูดซับ

## 2.6.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปมาระหว่างโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของสารดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นมา โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเลือกบริเวณที่เกิดการดูดซับได้และจะเกิดในลักษณะ Monolayer เท่านั้น ทำให้เกิดการคายความร้อนในปริมาณสูงคือในช่วง 5 – 100 กิโลแคลอรีต่อโมล หมายความว่า การหลุดออก (Desorption) ของการดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นได้น้อยมากๆ จึงถือว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible Interaction) ซึ่งโดยปกติเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบจะทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ โดยที่ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ สร้างสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิว จึงเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด และการดูดซับแบบนี้จะไม่เกิดการคายการดูดซับได้เนื่องจาก องค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible)

ปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิปกติ องค์ประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

จากการเปรียบเทียบการดูดซับทั้งสองชนิดสามารถแสดงในตารางที่ 2.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบการดูดติดผิวทางกายภาพ และการดูดติดผิวทางเคมี

ตัวแปร	การดูดติดผิวทางกายภาพ	การดูดติดผิวทางเคมี
ความร้อนของการดูดติดผิว (heat of adsorption, $\Delta H$ )	ต่ำ คายพลังงาน 0.5 - 5 กิโลแคลอรีต่อโมล	สูง คายพลังงาน 5 -100 กิโลแคลอรีต่อโมล
ความจำเพาะของการดูดติดผิว (specificity)	ไม่จำเพาะเจาะจง	จำเพาะเจาะจงสูง
ลักษณะการดูดติดผิว (nature of adsorbed)	ชั้นเดียวหรือหลายชั้น	ชั้นเดียว
วัฏภาค (phase)	ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับ ตัวถูกดูดติดผิว	อาจจะรวมตัวกันได้ (เกิดสารประกอบทางเคมีได้)
ช่วงอุณหภูมิ (temperature range)	มีความสัมพันธ์กับ ช่วงอุณหภูมิต่ำ	มีช่วงอุณหภูมิกว้าง
แรงของการดูดติดผิว (forces of adsorption)	ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน	มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนทำให้เกิดพันธะระหว่างสารถูกดูดติดผิวกับผิวหน้า
การผันกลับ (reversibility)	สามารถผันกลับได้	ไม่ผันกลับ

ที่มา: Ruthven (1997)

### 2.6.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ในการดูดซับจะมีแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี แรงทางกายภาพได้แก่ แรงแวน เดอ วาลส์ และ แรงทางไฟฟ้าสถิต

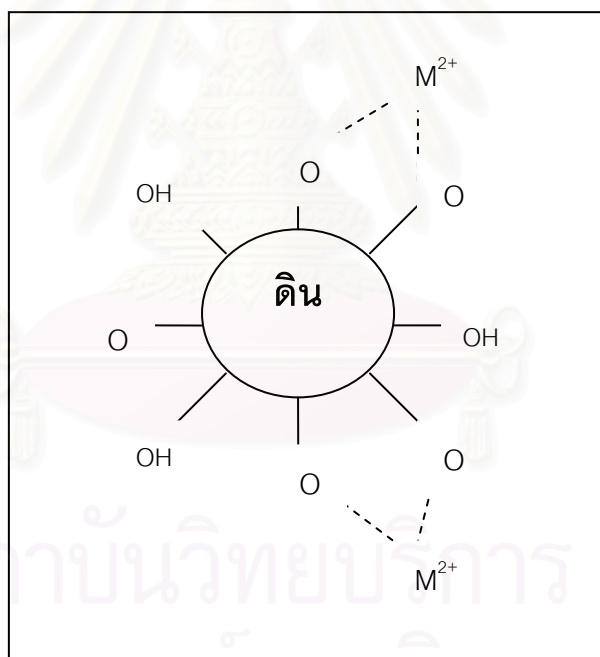
1) แรงแวน เดอ วาลส์ (Van der Waals Forces) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2522) และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อน ๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะกระทำได้ง่าย จึงเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2) แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่างดังนี้

1.แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดการจัดเรียงโมเลกุล ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้ามดังแสดงในรูปที่ 2.10

2.แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วมีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น การดูดซับอินทรีย์สาร

3.แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน



รูปที่ 2.10 กลไกไฟฟ้าสถิตของการดูดซับโลหะหนักบนผิวดิน(เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์,2546)

3) แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่างๆ เนื่องมาจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้



1. เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน
2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

การวิเคราะห์ระบบดูดซับโดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ จะช่วยให้เข้าใจถึงการทำงานของระบบได้ดียิ่งขึ้นและเป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้คำนวณออกแบบระบบดูดซับต่อไป

#### 2.6.4 สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

สมดุลการดูดติดผิวเกิดเมื่อ อัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจากผิวเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่จุดสมดุลจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดที่จุดสมดุลโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิว ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลาย ที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (นันทนา ชูฉัตร, 2543)

#### 2.6.5 การวิเคราะห์ระบบดูดซับ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

ระบบดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆได้ ซึ่งเป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดซับ การวิเคราะห์ระบบดูดซับได้มีผู้วิเคราะห์ไว้อยู่สามกลุ่มคือ Langmuir, Brunauer-Emmett-Teller (BET), และ Freundlich

สมการของ Langmuir สมการ (2-11) ได้แสดงสมการของ Langmuir สำหรับระบบดูดซับ โดยสมการนี้มีส่วนที่เข้าใจว่า การดูดซับจะคิดเฉพาะผิวชั้นเดียวและโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว

$$q = q_m K_A C / (1 + K_A C) \quad (2-11)$$

ในเมื่อ :  $q$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ

$q_m$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับ/ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

$K_A$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ, ลิตรของตัวดูดซับ/มิลลิกรัมของสารถูกดูดซับ

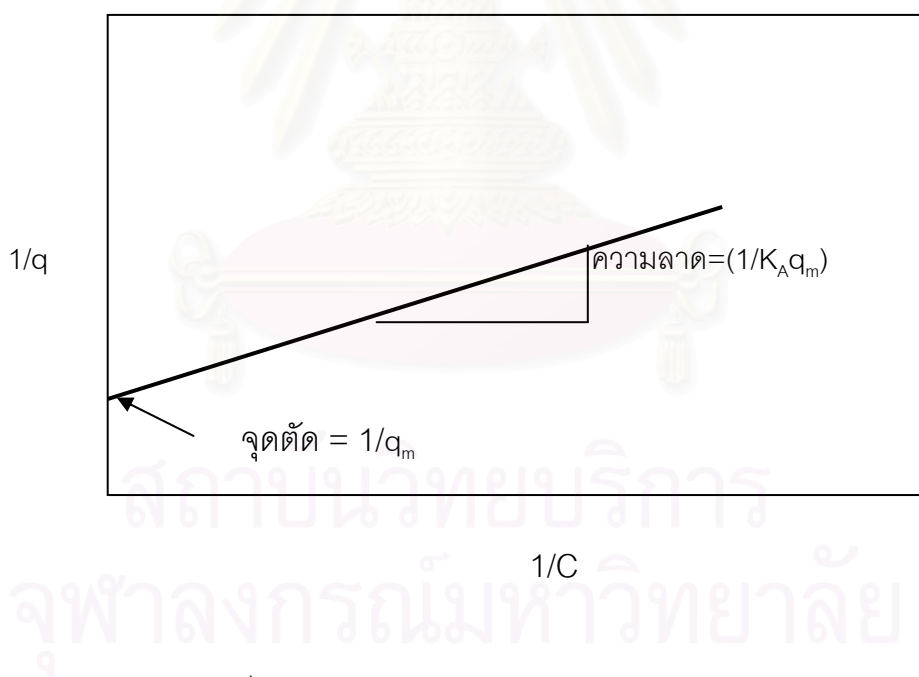
$C$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุล, มิลลิกรัม/ลิตร

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $q_m$  และ  $K_A$  ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2-12) หรือ (2-13)

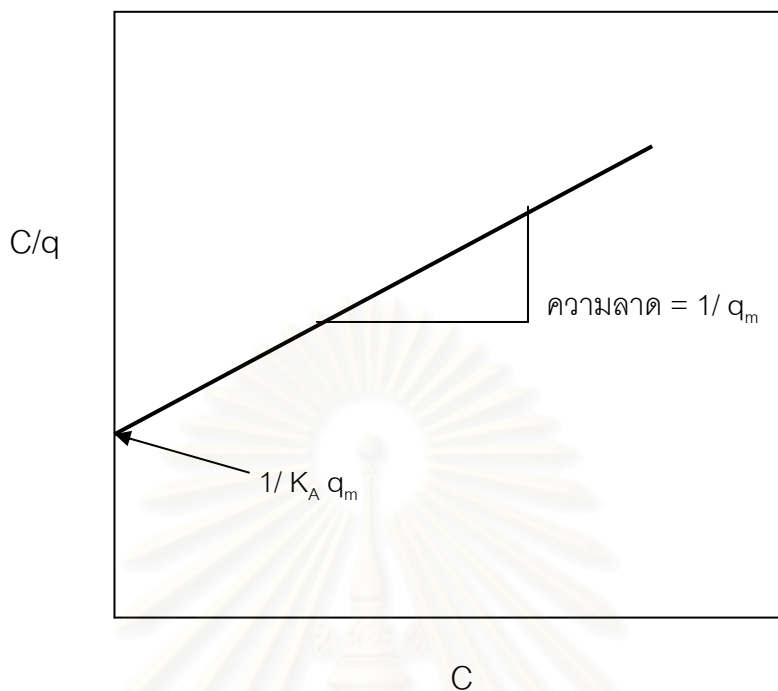
$$1/q = (1/q_m) + (1/K_A q_m)(1/C) \quad (2-12)$$

$$C/q = (C/q_m) + (1/K_A q_m) \quad (2-13)$$

จากสมการ (2-12) และ (2-13) สามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 กราฟสำหรับสมการ (2-12) ของ Langmuir



รูปที่ 2.12 กราฟสำหรับสมการ (2-13) ของ Langmuir

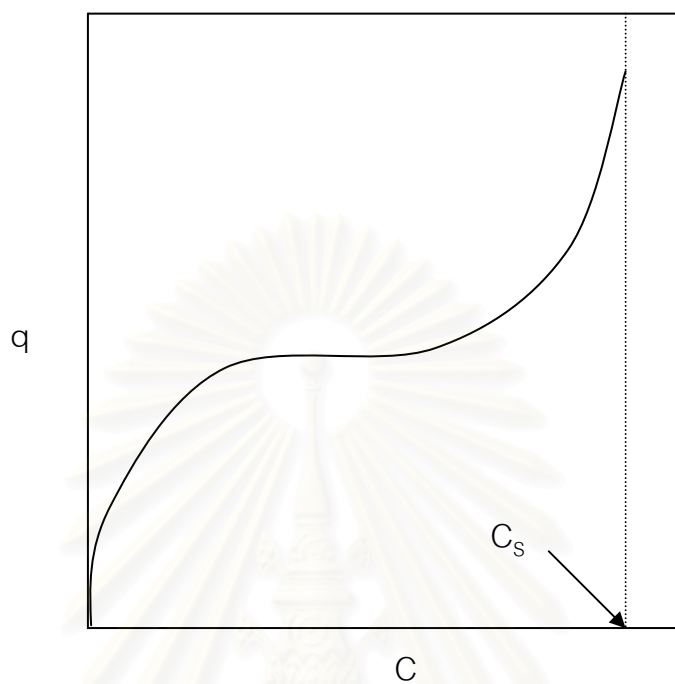
สมการของ Brunauer-Emmett-Teller(BET) สมการ (2-14) ได้แสดงสมการของ BET สำหรับระบบดูดซับ โดยสมการนี้มีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารดูดถูกซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุกๆโมเลกุล

$$q = q_m K_B C / (C_S - C)[1 + (K_B - 1)(C/C_S)] \quad (2-14)$$

เมื่อ :  $C_S$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ, มก./ล. (สามารถอ่านค่าได้จากกราฟในรูปที่ 2.13)

$K_B$  = ค่าคงที่ของการดูดซับ

เพื่อให้สามารถคำนวณหาค่า  $K_B$  และ  $q_m$  ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2-15)

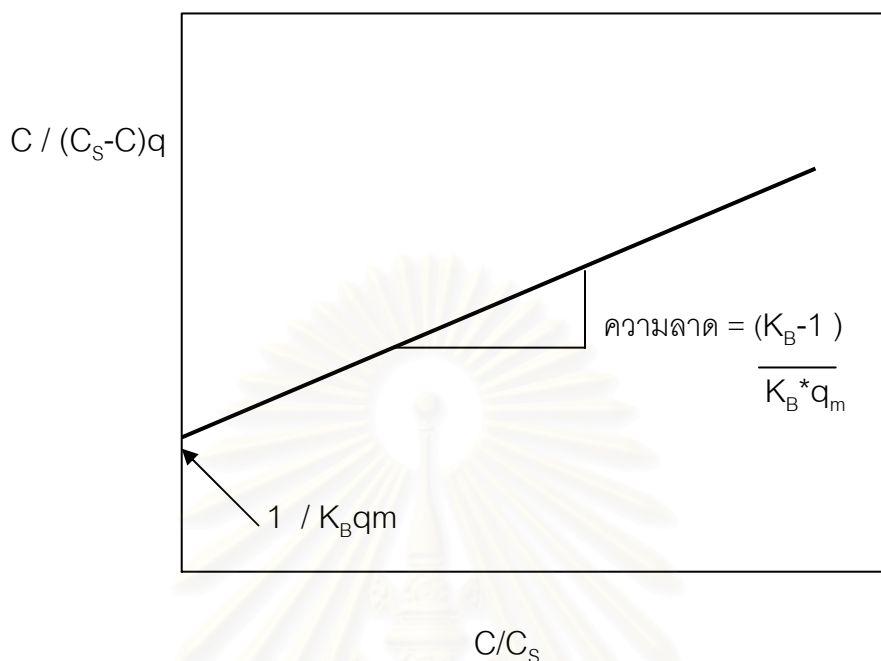


รูปที่ 2.13 กราฟสำหรับหาค่าของสมการ (2-14) ของ BET

$$C / (C_s - C)q = (1 / K_B q_m) + [(K_B - 1) / K_B * q_m](C / C_s) \quad (2-15)$$

จากสมการ (2-15) สามารถสามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 กราฟสำหรับสมการ (2-15) ของ BET

สมการของ Freundlich สมการ (2-16) ได้แสดงสมการของ Freundlich สำหรับระบบดูดซับ ซึ่งสมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ

$$q = K_F C^{1/n} \quad (2-16)$$

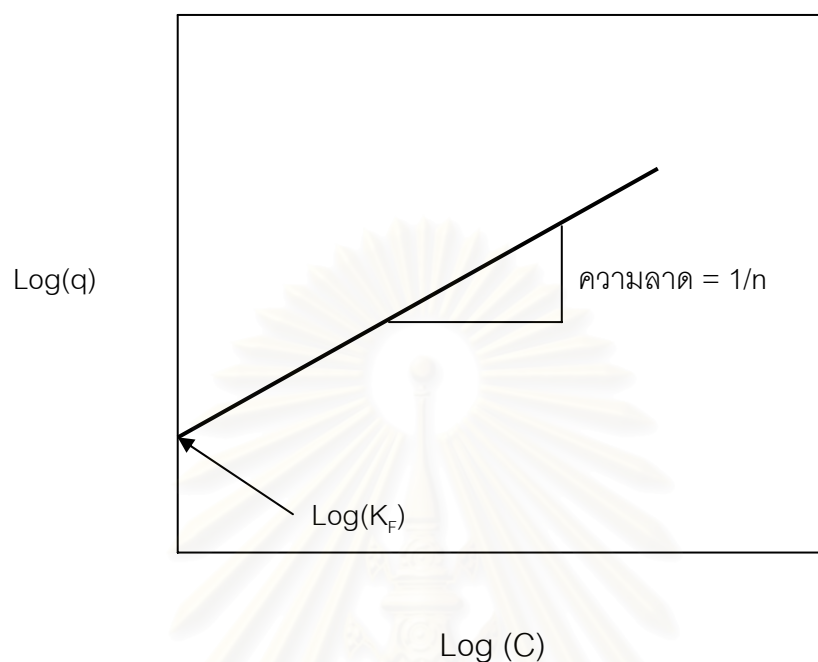
เมื่อ :  $K_F$  = ค่าคงที่

$n$  = ค่าคงที่

เพื่อให้คำนวณหาค่าคงที่  $K_F$  และ  $n$  ได้ด้วยวิธีกราฟ จึงจำเป็นต้องใช้ Logarithm มาจัดรูปแบบสมการให้เป็นสมการ (2-17)

$$\log(q) = \log(K_F) + (1/n) \log(C) \quad (2-17)$$

จากสมการ (2-17) สามารถวาดกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.15



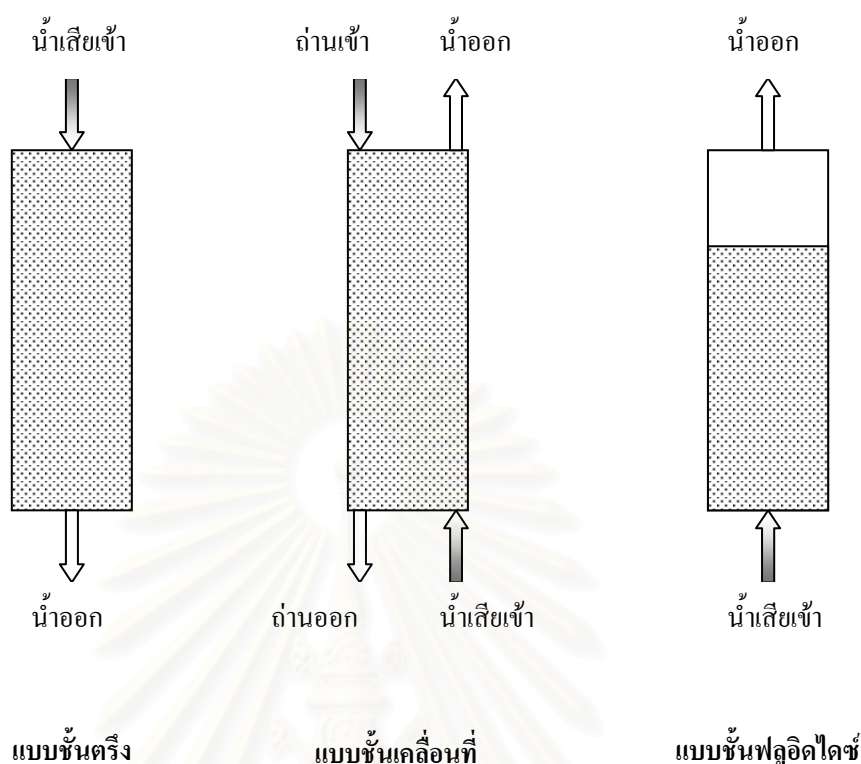
รูปที่ 2.15 กราฟสำหรับสมการ (2-17) ของ Freundlich

### 2.6.6 ระบบดูดซับแบบเท (Batch)

ระบบดูดซับแบบเทเป็นการใช้ถ่าน ดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสียในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาจะยาวนานหรือสั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ความเข้มข้นของตะกอน ขนาดของถ่านดูดซับ และการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารปนเปื้อน ระบบดูดซับแบบเทสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบชั้นตอนเดียวและแบบไหลสวนกัน

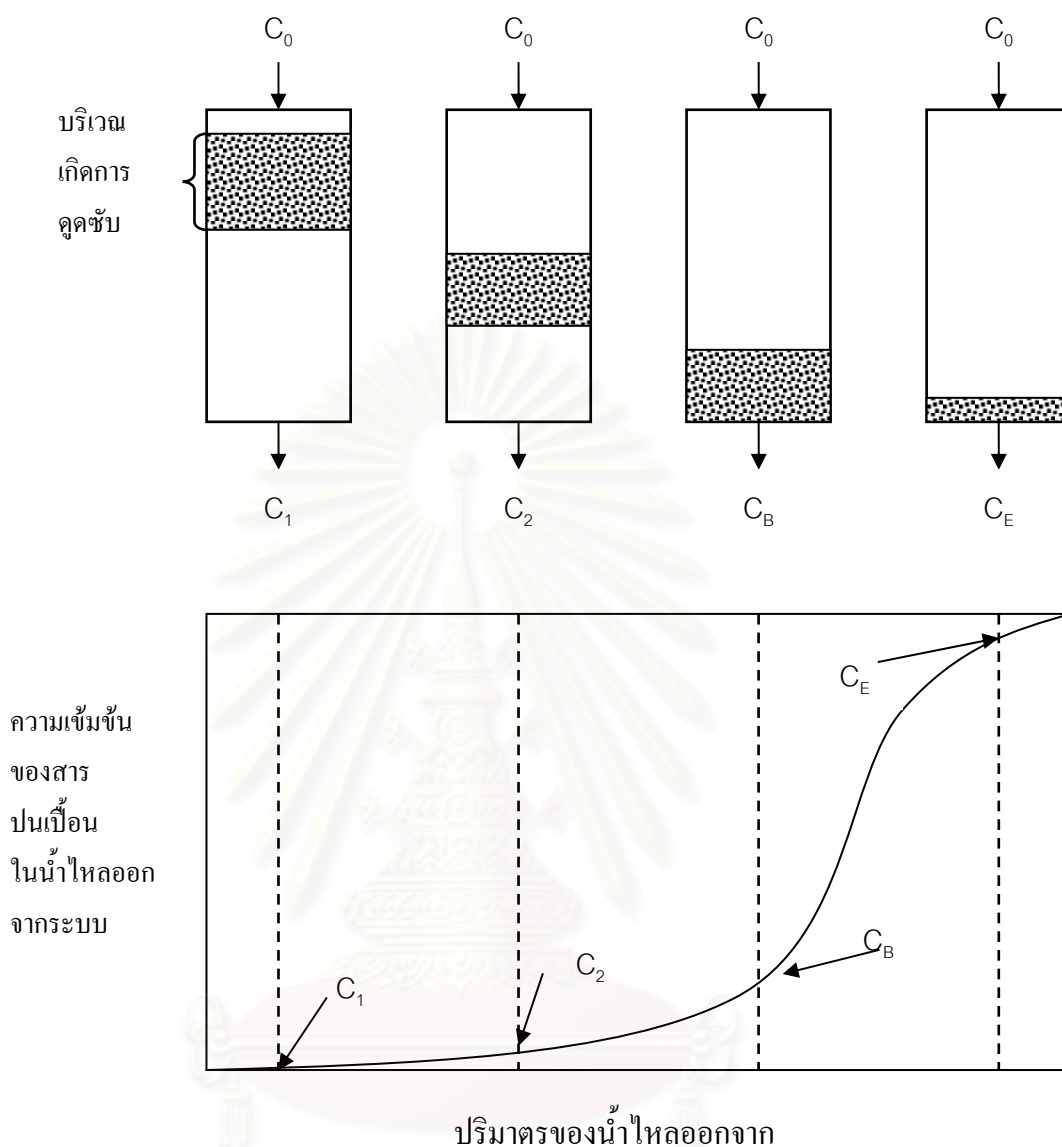
### 2.6.7 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบเท ระบบแบบไหลต่อเนื่องนิยมใช้กับปริมาณน้ำเสียมาก ๆ ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ 1) แบบชั้นตรึง(Fixed Bed) 2) แบบชั้นเคลื่อนที่(Moving Bed) และ 3) แบบฟลูอิดไดซ์(Fluidized Bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง (อ้างถึง: เกரியงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

2.6.7.1 แบบชั้นตรง(Fixed Bed) ระบบดูดซับแบบนี้ น้ำเสียความเข้มข้นเริ่มต้น  $= C_0$  ไหลลงผ่านชั้นถ่านที่อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง ลักษณะการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับค่อย ๆ เคลื่อนลงเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้น จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนล่างของชั้น ดังแสดงผลการดูดซับไว้ในรูปที่ 2.17 ณ จุด  $C_B$  คือจุดที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพนิยมเรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ(Breakpoint) และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งยกขึ้นสูงคือ การดูดซับค่อย ๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อีก ซึ่งนิยมเรียกเส้นโค้งนี้ว่า Breakthrough Curve เมื่อจนถึงจุด  $C_E$  ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ(Exhaustion Point) ส่วน  $C_0$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้นเข้าระบบ  $C_1$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียออกจากระบบในระยะแรก  $C_2$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียออกจากระบบในระยะที่สอง



รูปที่ 2.17 ระบบดูดซับแบบไหลต่อเนื่องในชั้นตรึง (อ้างอิง: เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

## จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.7.2 แบบชั้นเคลื่อนที่(Moving Bed) ระบบดูดซับแบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นพร้อม ๆ กับการเปลี่ยนสิ่งดูดซับจากบริเวณส่วนบนของถัง ซึ่งจะหมดสภาพก่อน ระบบนี้มักจะมีประสิทธิภาพค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ระบบนี้ไม่นิยมใช้กับการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องควบคุมดูแลการเคลื่อนย้ายสิ่งดูดซับออกอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของถัง ระบบนี้มีใช้กันในงานแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนของโรงงานปิโตรเลียม



2.6.7.3 แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized Bed) ระบบดูดซับแบบนี้ใช้น้ำเสียไหลขึ้นด้วยความเร็วสูงมากพอให้สิ่งดูดซับเกิดการแขวนลอยในระบบได้ แต่ต้องไม่ทำให้สิ่งดูดซับลอยขึ้นมากจนหลุดออกจากชั้นดูดซับ ในการควบคุมระบบให้ได้ผลอย่างสม่ำเสมอควรมีการเติมสิ่งดูดซับใหม่เข้าจากด้านบนของถัง และถ่ายสิ่งดูดซับเก่าออกจากด้านล่างของถัง ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงกว่าระบบแบบชั้นตรึง แต่มีข้อดีที่ระบบสามารถรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้าได้ค่อนข้างมากกว่า และสามารถเลือกใช้สิ่งดูดซับที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้โดยปราศจากปัญหาสูญเสียความดันสูงเกินไปในระบบ

## 2.6.8 การออกแบบระบบดูดซับ

ระบบดูดซับที่มีใช้กันคือทั้งแบบไหลลงและไหลขึ้น สำหรับจำนวนถังของระบบไหลลงควรมีอย่างน้อย 2 ถังหรือมากกว่า วางเรียงอนุกรม เพื่อให้ถังแรกเมื่อเกิดการหมดสภาพ จำเป็นต้องนำออกมาเพื่อปรับสภาพถ่านดูดซับให้คงสภาพดีเหมือนเดิม แล้วจึงนำกลับมาทำหน้าที่เป็นถังที่สอง โดยให้ถังที่สองเดิมทำหน้าที่เป็นถังแรก สำหรับจำนวนถังของระบบไหลขึ้นอาจใช้เพียงถังเดียวได้ โดยพยายามให้ขนาดความสูงของชั้นสิ่งดูดซับมีสูงกว่าบริเวณดูดซับ(Adsorption Zone) ข้อมูลการออกแบบระบบถ่านดูดซับแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลออกแบบระบบถ่านดูดซับ ( เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

ข้อมูลออกแบบระบบถ่านดูดซับ	ค่าออกแบบ
1. ขนาดของถ่านดูดซับ, mesh	8-40
2. ความลึกของชั้นถ่านดูดซับ, ม.	3-9
3. ภาระการไหล, ลบ.ม./(ตร.ม.นาที่)	0.08-0.40
4. เวลาเก็บกัก, นาที่	10-60
5. อัตราไหลย้อน, ลบ.ม./(ตร.ม.นาที่)	0.60-0.80
6. ปริมาณคาร์บอนที่ต้องการ :	
สำหรับระบบบำบัดขั้นสุดท้าย, กรัม/ลบ.ม.	24-48
สำหรับระบบบำบัดทางกายภาพ-เคมี, กรัม/ลบ.ม.	60-210

## 2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

### 2.7.1 ความดันป้อน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป้อนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป้อนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับที่เข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความดันป้อนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาสารดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ทำให้กรณีนี้ Pore Diffusion จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

### 2.7.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับ ความสามารถของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้พอดีการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าไม่สามารถเข้าได้พอดีความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

ในกรณีนี้ที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดลง แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุนทำให้ความสามารถในการดูดซับไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ(สุจินต์ เอี่ยมปี, 2544)

อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ(Adsorptive Capacity) นั่นคือสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมาก ย่อมดูดโมเลกุลสารถูกดูดซับได้มากกว่าสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

### 2.7.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลสารถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดกันผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้(หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไปทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวสารดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้ว่าเกิดมีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2538)

### 2.7.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

จากการวิจัยพบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของโพรงของสารดูดซับเล็กน้อย(พอดีเข้าไปในโพรงได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับและสารดูดซับจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งโดยปกติโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงจะถูกดูดเข้าไป

### 2.7.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน( $H_3O^+$ ) เนื่องจากที่ค่า pH ต่ำๆจะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่า pH สูงๆซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลสารถูกดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่เป็นสารละลายไอออนถ้าสารละลายมีค่า pH ต่ำๆจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแก่งแย่งกันที่จะดูดซับไอออนในสารละลายกับไฮโดรเนียมไอออน ซึ่งจะได้ผลในทางตรงกันข้ามกับเมื่อเป็นการดูดซับในสารละลายที่มีค่า pH สูงๆ นอกจากนี้ค่า pH ยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่างๆดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิว

## 2.7.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะมีค่าลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

## 2.8 โลหะหนัก

ธาตุโลหะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

- ก. Toxic heavy Metals คือ โลหะหนักที่มีพิษ
- ข. Strategic คือ โลหะที่เป็นสื่อไฟฟ้าได้
- ค. Precious Metal คือ โลหะที่มีค่า
- ง. Radionuclides คือ โลหะที่สามารถแผ่รังสีได้

ในบรรดาโลหะทั้ง 4 ประเภทนี้ ประเภท ก. และ ข. ที่เราควรที่จะกำจัดออกจากแหล่งน้ำอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะประเภท ก. จะพบได้ง่ายกว่าประเภท ข. เนื่องจากมักจะถูกใช้เป็นตัวเติมในกระบวนการทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปและมักจะปนเปื้อนออกมากับน้ำหรือสารเคมีที่ผ่านการชะล้างผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของโลหะหนักเหล่านี้ได้แก่ แคดเมียม(Cd), ทองแดง(Cu), นิกเกิล(Ni), ตะกั่ว(Pb), และสังกะสี(Zn) เป็นต้น

โลหะดังกล่าวนี้ถ้าปนเปื้อนไปภายในร่างกาย จะไปรบกวนกระบวนการทำงานของเอนไซม์และจะเกาะติดกับเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้การลำเลียงสารต่างๆในร่างกายมีความผิดปกติขึ้น ขอยกตัวอย่างโลหะหนักบางตัวที่น่าสนใจดังนี้

### 2.8.1 แคดเมียม (Cd)

แคดเมียมถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2360 ในธรรมชาติจะปะปนในแร่สังกะสีซัลไฟด์ และเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี แคดเมียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติอ่อนนุ่ม งอได้ มีสีขาวปนน้ำเงิน มีเลขอะตอม 48 มวลอะตอม 112.4 ความถ่วงจำเพาะ 8.6 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 765 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชัน +2 ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร (แม่เหล็กอมริทรี และ อมร เพชรสม, 2535) ทนต่อการกัดกร่อน เป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในกรดอ่อนและละลายได้ดีในกรดไนตริก(HNO<sub>3</sub>) และละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก(HCl)อย่างช้าๆ ระหว่างการ

หลอมเหลวด้วยความร้อนและแรงกดดันสูง จะกลายเป็นไอควันในรูปของแคดเมียมออกไซด์ แคดเมียมอาจอยู่ในรูปเกลือหรือสารประกอบต่างๆ เช่น แคดเมียมออกไซด์(CdO) แคดเมียมคลอไรด์(CdCl<sub>2</sub>) แคดเมียมซัลเฟต(CdSO<sub>4</sub>) แคดเมียมไนเตรท(Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) และแคดเมียมคาร์บอเนต(CdCO<sub>3</sub>) เป็นต้น

ในระยะ 50 ปีที่ผ่านมาแคดเมียมถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย อาทิ โรงงานชุบโลหะ โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โรงงานผลิตสีอียาเมล โรงงานผลิตสารฆ่าเชื้อรา โรงงานผลิตเส้นใย โรงงานสังกะสี โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ โรงงานเซรามิก โรงงานหมึกพิมพ์ โรงงานผลิตยางรถยนต์ โรงงานผลิตเส้นลวดโทรเลขและโทรศัพท์ กิจการถ่ายรูป และ โรงงานพลาสติก เป็นต้น หากมีของเสียหรือน้ำเสียจากโรงงานต่าง ๆ ข้างต้นออกสู่สิ่งแวดล้อมย่อมก่อให้เกิดภาวะพิษในสิ่งแวดล้อม

แคดเมียมเป็นสารที่มีคุณสมบัติในแง่ของพิษสะสมสูง เนื่องจากมีวงจรชีวิตมากกว่า 10 ปี การสะสมจะมากขึ้นตามอายุ ปริมาณครึ่งหนึ่งของแคดเมียมในร่างกายจะถูกเก็บสะสมอยู่ที่ตับ และ ไต เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมจะมีผลต่อระบบทางเดินอาหาร ทำให้อาเจียร มีผลต่อระบบเลือดที่เข้าสู่หัวใจเกิดภาวะความดันโลหิตสูงจนกระทั่งไปรบกวนระบบการสร้างเม็ดเลือด ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคโลหิต-อิต คือทำให้ลูกอ้วนชะบวม ไตทำหน้าที่ผิดปกติส่งผลให้ขัดขวางปฏิกิริยาการทำงานของแคลเซียมและฟอสฟอรัสทำให้เกิดโรคกระดูกผุตามมา โรคโลหิตจาง สกัตกั้นการเจริญเติบโตของทารก และเป็นสาเหตุสูโรคมะเร็ง แคดเมียมสามารถไปสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้เช่น สาหร่าย หอย ลูกน้ำ ข้าว และ ปลา ในปลาส่วนใหญ่จะเก็บสะสมแคดเมียมไว้ที่ตับ ไต ลำไส้ และเหงือก

มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร(ภาคผนวก ก.)

## 2.8.2 สังกะสี (Zn)

สังกะสีมีเลขอะตอม 30 มวลอะตอม 65.35 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 จุดหลอมเหลว 420 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชัน +2 ในธรรมชาติพบในแร่ zinc blende, calamine, zincite และ willemite ร่วมกับแคดเมียม ตะกั่ว พลวง และสารหนู โลหะสังกะสี ถูกนำมาใช้เพื่อทำโลหะผสมต่างๆ เช่น ทองเหลือง บรอนซ์ ใช้เคลือบเหล็กเพื่อป้องกันสนิม สารประกอบของสังกะสีมีความสำคัญในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมยา

อุตสาหกรรมยางเม็ด อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมยาปราบศัตรูพืช นอกจากนั้นยังมีการใช้สารประกอบอินทรีย์ของสังกะสีเป็นสารเพิ่มออกเทนในน้ำมันเชื้อเพลิงแทนสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว

สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของพืช สัตว์ และคน เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ต่างๆ เช่น alcohol dehydrogenase ในยีสต์และตับของคน alkaline phosphatase ใน E.coli รกและเม็ดเลือดขาว(leukocytes) ของคน corneal collagenase และ ALA-dehydrase ในเนื้อเยื่อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม lactate dehydrobenase ในกล้ามเนื้อ กระต่าย aldolase ในยีสต์และ E. coli เป็นต้น สังกะสีมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต การพัฒนากระดูกและ integrity ของผิวหนัง นอกจากนั้นยังช่วยในการรักษาสมดุลของโมเลกุลอินซูลินในเบตาเซลล์ ของตับอ่อนอีกด้วย

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าสังกะสีมักพบร่วมกับแคดเมียม ตะกั่ว พลวง และสารหนู ดังนั้นการเกิดพิษของสังกะสีจึงเกิดร่วมกับโลหะชนิดอื่น เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษของโลหะชนิดต่างๆ สังกะสีจัดว่าเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ อาการพิษเฉียบพลันของสังกะสีได้แก่ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการตีกร่อนของเยื่อบุทางเดินอาหาร ท้องร่วง ตาลาย เชื้องซึม สูญเสียการควบคุมกล้ามเนื้อ เป็นตะคริว ไตไม่ทำงานและโลหิตจาง อาการพิษเรื้อรังของสังกะสียังไม่ปรากฏแน่ชัด โดยมากจะเกิดร่วมกับพิษของโลหะหนักชนิดอื่น

มาตรฐานน้ำดื่มตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร(ภาคผนวก ก.)

### 2.8.3 ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่วมีเลขอะตอม 82 มวลอะตอม 207.29 ความถ่วงจำเพาะ 11.4 จุดหลอมเหลว 327.5 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,725 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชัน 0, +2, +3 สารประกอบของตะกั่วส่วนใหญ่มีเลขออกซิเดชัน +2 ตะกั่วนำความร้อนและไฟฟ้าไม่ดี ในธรรมชาติพบในรูปสารประกอบต่างๆเช่น lead sulphate, lead sulphide 40%ของโลหะตะกั่วใช้ในการทำแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ

ตะกั่วเป็นธาตุที่ทำให้เกิดพิษร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิต เข้าสู่ร่างกายคนได้ทั้งทางเดินอาหาร ทางเดินหายใจ และทางผิวหนัง ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วปริมาณสูงอย่างฉับพลัน จะเกิดอาการปวดท้องอย่างรุนแรง จุกเสียด ท้องร่วง กล้ามเนื้อกระตุก ตับ ไต และหัวใจล้มเหลว มีอาการโคม่าและ

ตาย อาการเป็นพิษเรื้อรังของตะกั่วคือ ความดันโลหิตสูง เกิดโรคโลหิตจาง อายุของเม็ดเลือดแดง  
 ลดลง การส่งกระแสประสาทช้าลง อัมพาต เซลประสาทถูกทำลายและทำให้เกิดโรคมะเร็งเป็นต้น  
 มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนด  
 ความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 0.2  
 มิลลิกรัมต่อลิตร(ภาคผนวก ก.)

การทดลองนี้เลือกโลหะแคดเมียมในการทดลอง เพราะมีใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหลาย  
 ประเภท และมาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานต้องไม่เกิน 0.03  
 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำมากแสดงว่าโลหะแคดเมียมน่าจะมีอันตรายร้ายแรงมากหากปนเปื้อนใน  
 สภาพแวดล้อม

## 2.9 กระบวนการต่างๆในการกำจัดโลหะหนัก

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะ  
 เลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆดังนี้คือ คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด  
 คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัด และความ  
 เป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

### 2.9.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้งเพื่อทำปฏิกิริยากับ  
 โลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธี  
 ด้วยกันแต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธีคือการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์  
 (Hydroxide precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์(Sulfide precipitation)

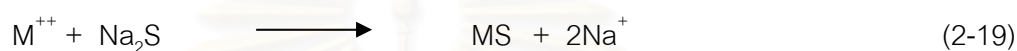
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมีคือ ปูน  
 ขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), โซเดียมไฮดรอกไซด์( $\text{NaOH}$ ) เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่  
 2-18



โดย  $\text{M}^{++}$  คือโลหะไอออน

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือโลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง(Amphoteric Property) คือจะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชกว้าง โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถจะละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ มักจะใช้โซเดียมซัลไฟด์( $\text{Na}_2\text{S}$ ) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์( $\text{NaHS}$ ) และเฟอร์รัสซัลไฟด์( $\text{FeS}$ )ในการทำให้ตกตะกอน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาตามสมการ 2-19

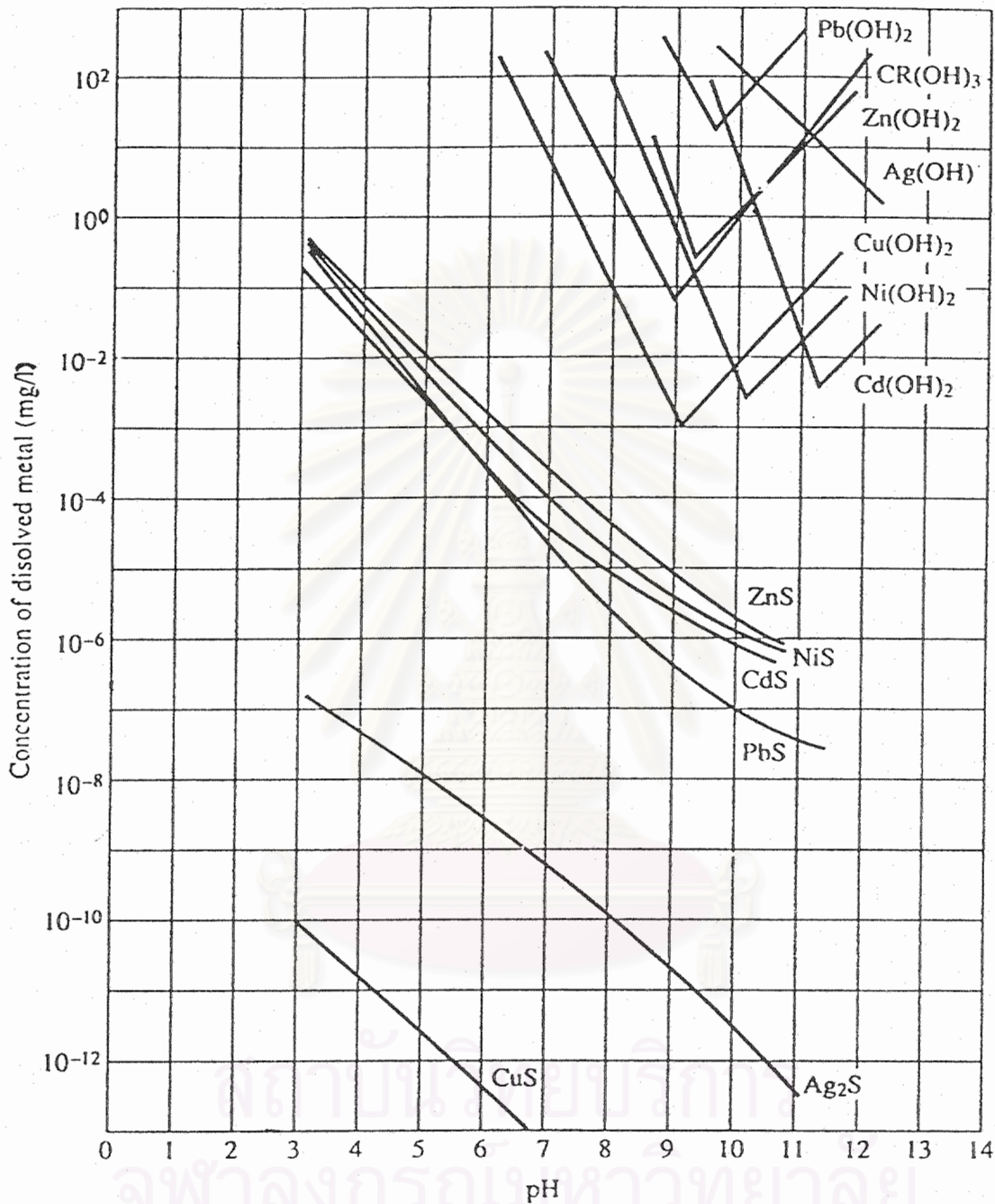


โดย  $\text{M}^{++}$  คือโลหะไอออน

ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์นี้มีข้อจำกัดคือเรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์(Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไป จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้น โดยบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง(จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์, 2539) การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ของโลหะหนักชนิดต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.18

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.18 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ของโลหะหนักชนิดต่างๆ (Eckenfelder, 2000)

### 2.9.2 โคแอกกูเลชัน,ฟลอคคูเลชัน (Coagulation/Flocculation)

เป็นกระบวนการที่รู้จักกันดีว่าสามารถจับโลหะหนักจากสารละลายได้โดยที่ Coagulation ใช้หลักการกระตุ้นประจุไฟฟ้าบนอนุภาค ส่วน Flocculation ใช้หลักการรวมอย่างช้าๆเพื่อให้อนุภาคจับตัวกันเป็นก้อน โดยสารเคมีที่ใช้กับกระบวนการ Coagulation ส่วนใหญ่คือ Ferric Sulfate หรือ Alum ซึ่งโลหะที่กำจัดได้จะเป็นพวก ตะกั่ว แคดเมียมและโครเมียม โดยในการกำจัดแคดเมียมในช่วง pH ที่ 8.5-11.3 จะมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 98 ถ้าใช้ Alum ต้องคำนึงถึงความขุ่นของน้ำทิ้งด้วย แต่ถ้าเป็นการกำจัดตะกั่วการใช้ Ferric Sulfate จะมีประสิทธิภาพร้อยละ 97 ส่วนการใช้ Alum จะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 80-90 แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำทิ้งด้วย(ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

### 2.9.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแลกเปลี่ยนโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน(Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่าแคตไอออนเอกเชนเจอร์(Cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่าแอนไอออน เอกเชนเจอร์(Anion exchanger) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า

### 2.9.4 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆเจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้

เกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟูริกไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนไลม์ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องมีความพอเหมาะปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์

### 2.9.5 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตต และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขึ้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน วิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

### 2.9.6 การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีที่ง่ายที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดาและการระเหยภายใต้สุญญากาศ วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

### 2.9.7 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

### 2.9.8 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

### 2.9.9 การดูดติดผิว (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลพิษสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับไมโครกรัม สารดูดติดผิวที่นิยมใช้ในระบบบำบัดคือถ่านกัมมันต์(Activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุด รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่  $20 \text{ \AA}$  ถึง  $20,000 \text{ \AA}$  การสังเคราะห์คาร์บอนชนิดนี้กระทำโดยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบเสียก่อน จากนั้นจึงเผาวัตถุดิบที่แห้งให้เป็นถ่าน(Carbonization) ที่อุณหภูมิประมาณ  $400 - 600$  องศาเซลเซียส คาร์บอนที่ได้ยังมีอำนาจการดูดติดผิวต่ำ เนื่องจากโพรงภายในคาร์บอนยังมี Tar อุดตันอยู่ คาร์บอนนี้จึงต้องเผาต่อที่อุณหภูมิประมาณ  $750 - 950$  องศาเซลเซียส ภายใต้ความชื้นที่เหมาะสมเพื่อไล่ Tar ออกให้หมด(ขั้นตอนนี้เรียกว่า Activation) จึงจะได้แอคติเวตเต็ดคาร์บอน เทคโนโลยีปัจจุบันสามารถทำให้ได้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนหนัก 1 กรัม มีพื้นที่ผิวประมาณ  $600 - 1,000$  ตารางเมตร(มันซิน ตันซูลเวสม์, 2538) กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้เช่น ถ่านคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมดและสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆเช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนเหลือถึงระดับที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่ม โดยไอออนโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดติดผิว สารดูดติดผิวอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

ก) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก(Bone Char) และแอคติเวตเต็ดซิลิกา ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ  $50 - 200$  ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือจับไมโครกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวประเภทสารอนินทรีย์ มีข้อจำกัดมาก

ข) แอคติเวตเต็ดคาร์บอน อันที่จริงคาร์บอนชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็น Adsorbent ที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1000 ตารางเมตรต่อกรัม

แอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้แล้วสามารถนำมาทำรีเจนเนอเรชันโดย นำแอคติเวตเต็ดคาร์บอนไปสะเด็ดน้ำให้แห้งและนำไปอบให้ระเหยน้ำจนได้คาร์บอนแห้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 – 950 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น จากนั้นนำคาร์บอนไปทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในถังน้ำเย็นและล้างเพื่อกำจัดส่วนที่เป็นฝุ่นออก นำไปใช้ได้ใหม่

ค) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่สารแลกเปลี่ยนไอออน(Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับแอคติเวตเต็ดคาร์บอน แต่มีข้อดีคือ สามารถรีเจนเนอเรตได้ง่ายกว่ามากและสิ้นเปลืองน้อย(มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกว่า Adsorbent (สารดูดซับ) จะอิ่มตัวด้วย Adsorbate(สารถูกดูดซับ) ซึ่งการนำเอาสารถูกดูดซับออกมาจากสารดูดซับเพื่อให้สามารถนำเอาสารดูดซับไปใช้ใหม่เรียกว่าการรีเจนเนอเรชัน(Regeneration Processing) หรือ ปรากฏการณ์การย้อนกลับการดูดซับ การรีเจนเนอเรชันอาจกระทำได้โดยการใช้ความร้อน(Thermal Swing Regeneration) ความดัน(Pressure Swing Regeneration) หรือ สารเคมี (Concentration Swing Regeneration)(แดน อินทร์มา,2539)

#### 2.9.10 การบำบัดโดยจุลินทรีย์ (Biological Treatment)

เป็นการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักเช่น จากกระบวนการ Activated Sludge พบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักเช่น ทองแดง นิกเกิล สังกะสีและโครเมียมได้อย่างใดอย่างหนึ่ง ในเงื่อนไขที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 2.10 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นของน้ำแสดงให้เห็นว่ามีสารแขวนลอยอยู่มากน้อยเพียงใด สารแขวนลอยที่มีอยู่ เช่น ดินละเอียด อินทรีย์สาร อนินทรีย์สาร แพลงตอน และสิ่งมีชีวิตเล็กๆ สารเหล่านี้จะกระจายและขัดขวางไม่ให้แสงส่องลงไปได้ลึก โดยสารเหล่านี้จะดูดซับแสงเอาไว้

ถึงแม้ว่าความขุ่นของน้ำจะเกิดจากปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำ แต่ปริมาณความขุ่นของน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารแขวนลอยดังกล่าว เนื่องจากความขุ่นของ

น้ำเราพิจารณาจากความเข้มของแสงที่สามารถส่งผ่านลงไปใต้น้ำ สารแขวนลอยแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซึมหรือสะท้อนแสงต่างกัน ดังนั้นระดับความขุ่นของน้ำจึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารแขวนลอยในน้ำ

ผลของความขุ่นของน้ำรวมทั้งสารแขวนลอยที่อาจจะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ อาจจะสามารถปรากฏได้ในลักษณะดังต่อไปนี้

1. น้ำที่มีความขุ่นมากทำให้แสงส่องไม่ถึง จะขัดขวางปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงของพืช โดยเฉพาะแพลงตอนพืช ซึ่งทำให้ปริมาณอาหารธรรมชาติของสัตว์น้ำและปริมาณออกซิเจนลดลง
  2. สารแขวนลอยที่ทำให้เกิดความขุ่นสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำโดยตรง โดยสารแขวนลอยจะไปอุดช่องเหงือกทำให้การหายใจของสัตว์น้ำไม่สะดวก ทำให้การเจริญเติบโตช้ากว่าปกติ การฟักตัวของไข่และการเติบโตของตัวอ่อนช้าลงหรือหยุดชะงัก
  3. ความขุ่นมีผลต่อการเคลื่อนไหวและการอพยพย้ายถิ่น การหาอาหาร และการล่าเหยื่อลดลง
  4. ความขุ่นทำให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะน้ำผิวบนจะดูดซับความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงกว่าปกติ และยังมีผลทำให้ออกซิเจนละลายได้น้อยลง (ประเทือง เชาวน์กลาง, 2534)
- คุณภาพน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำประเภทปลาความขุ่นไม่เกิน 5 NTU สูงสุดไม่เกิน 10 NTU ประเภทหอยความขุ่นไม่เกิน 5 NTU สูงสุดไม่เกิน 50 NTU (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538)
- นอกจากนี้ความขุ่นยังส่งผลให้การผลิตน้ำประปาหรือน้ำดื่มมีค่าใช้จ่ายมากขึ้น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค(รายละเอียดในภาคผนวก ก.) กำหนดให้เกณฑ์กำหนดสูงสุดค่าความขุ่นอยู่ที่ 5 ซิลิกา สเกล ยูนิต และเกณฑ์อนุโลมสูงสุดค่าความขุ่นอยู่ที่ 20 ซิลิกา สเกล ยูนิต

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**ดำรงค์ ขุนมงคล และ อภิสิตธี เจริญกุล (2533)** ได้ทำการวิจัยโดยใช้เกลือแกง (NaCl) เป็นตัวกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและขี้เลื่อย พบว่าการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงสุดโดยดูจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ คือ ควรใช้เวลากระตุ้นนาน 60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นคือ 800 °C

ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นกะลามะพร้าวและขี้เลื่อย มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 640 และ 542 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมคลอไรด์ต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 3 และเผาที่

อุณหภูมิ 800 °C ส่วนถ่านกัมมันต์จากซีลีอีนนั้นประมาณว่าจะมีอุณหภูมิ 800 °C หรืออาจจะสูงกว่า ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของไซเดียมคลอไรด์ต่อซีลีอีน 5

**ประกฤต เลิศจรัสอร่ามดี (2539)** ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีลีอีน ฟางข้าว และขุยมะพร้าว ผลการทดลองพบว่า ขุยมะพร้าวที่ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณ 0.20 กรัม ความสามารถในการกำจัดไอออนของตะกั่วและไอออนของปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ สามารถที่จะกำจัดได้ 80% และ 78% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการใช้ซีลีอีนและฟางข้าว พบว่า ขุยมะพร้าวมีความสามารถในการกำจัดไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าซีลีอีนและฟางข้าว สำหรับน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 0.3 – 0.7 ส่วนในล้านส่วน พบว่า ซีลีอีน ฟางข้าว และขุยมะพร้าวสามารถกำจัดไอออนของตะกั่วได้เกือบ 100%

**ชฎิล ฉายรัศมี, เมธิ ชลไมตรี และสุนทรี เฟื่องฟู (2541)** ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชัน คือ กากเมล็ดกาแฟ ชั่งข้าวโพด ชานอ้อย และแกลบ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของวัสดุชีวมวลที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันและขึ้นรูปด้วยดินเหนียว นำวัสดุที่ได้ไปดูดซับโลหะหนัก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิลและแคดเมียม พบว่ากากเมล็ดกาแฟมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลประมาณ 90 นาที ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักหลังขึ้นรูปด้วยดินเหนียวกับก่อนขึ้นรูปด้วยดินเหนียวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การขึ้นรูปด้วยดินเหนียวจะมีความแข็งแรงมากกว่า และพบว่าเม็ดดูดซับที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าขนาดใหญ่

**ไชยันต์ ไชยยะ (2542)** ได้ศึกษาปัจจัยการผลิตเม็ดดูดซับ โดยผลิตจากปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกากกาแฟผงกับดินที่ 80 ต่อ 20 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านการเผาแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักต่างๆได้ภายในเวลา 30 นาที เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด ( $V_m$ ) ด้วยแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ พบว่าเม็ดดูดซับสามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสีและนิกเกิล ได้ปริมาณสูงสุดที่ 39.52, 31.15, 19.53, 13.39 และ 11.0 มิลลิกรัมไอออนโลหะต่อกรัมเม็ดดูดซับตามลำดับ ในส่วนของการศึกษาการศึกษากลไกการดูดซับโดยใช้สารละลายไอออนแคดเมียมพบว่า ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดมีค่าน้อยลงเมื่อค่าพีเอชลดลง และมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพ

ในการศึกษาประสิทธิภาพของเม็ดดูดซับหลังจากใช้งานแล้วโดยการชะด้วยน้ำกลั่นพบว่า ประสิทธิภาพในการชะไอออนแต่ละครั้งค่อนข้างคงที่คือร้อยละ 90 และความสามารถในการดูดซับ ลดลงกว่าร้อยละ 10 หลังจากนำกลับมาใช้ใหม่เป็นครั้งที่ 3

**ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร (2543)** พบว่าการดูดซับสารละลายโลหะหนัก ตะกั่ว สังกะสี แคลเดียมและโครเมียม ด้วยตัวดูดซับต่างๆ ได้แก่ แร่ดินเหนียว kaolinite และ bentonite และดินเหนียวจากสถานที่ต่างๆ พบว่าจะเข้าสู่สมดุลของการดูดซับประมาณ 2 ชั่วโมง และเมื่อความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายโลหะหนักเริ่มต้นสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับต่างๆ ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพีเอชที่สูงขึ้นจะทำให้ประจุที่ผิวของคอลลอยด์เป็นลบมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถดูดซับประจุบวกของโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าแร่ดินเหนียว bentonite สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด รองมาคือแร่ดินเหนียว muscovite และแร่ดินเหนียว kaolinite ตามลำดับ ลำดับความสามารถในการถูกดูดซับจากมากไปน้อยดังนี้คือ  $Cr > Pb > Cd > Zn$  ยกเว้นแร่ดินเหนียว kaolinite ที่ดูดซับตะกั่วได้สูงสุด

**สุจรรย์ คุ้มเสงี่ยม (2544)** ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ ระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น กับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวและที่ผลิตจากกะลาปาล์ม มีค่าไอโอดีน 532.29 และ 486.45 มิลลิกรัม/กรัม พื้นที่ผิว 492.42 และ 385.91 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ

การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบพลุนดลิช โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวสามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 8.37 และ 5.52 มิลลิกรัม/กรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม สามารถดูดซับตะกั่วและปรอท ได้ 2.53 และ 1.63 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งแสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบพลุนดลิชพบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอท ได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิกรัมต่อกรัม การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแบ่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.83, 3.83, 3.75 และ 3.88 มิลลิกรัม/กรัม และดูดซับปรอทได้ 3.61, 3.83, 3.61 และ 3.72 มิลลิกรัม/กรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.853 และ 9.865 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ส่วนการทดสอบโดยใช้ถังดูดซับแบบแบ่งโดยผ่านน้ำทิ้งโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 2.45, 2.57, 2.69 และ 2.81 มิลลิกรัม/กรัม และดูดซับปรอทได้ 2.21, 2.45, 2.45 และ 2.70



มิลลิกรัม/กรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.824 และ 9.830 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

**ลลิตา นิตศนจารกุล (2544)** ทำการวิจัยการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้เกลือแกง ผลการทดลองพบว่า วัสดุดิบที่ผ่านการแช่ในสารละลายอิมิตัวของเกลือแกงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการอบแห้ง แล้วนำมาเผากระตุ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผากระตุ้น คือ  $800^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงสุดของถ่านเปลือกทุเรียนเท่ากับ 567 มิลลิกรัม/กรัม ส่วนถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์เท่ากับ 532 มิลลิกรัม/กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียสูงกว่า 90% ที่พีเอชของน้ำเสียตั้งแต่ 4 ถึง 9 และจากการทดลองหาไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพุนดิช พบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนมีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วสูงกว่าถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์

**มานพ ตีระรัตนสมโภช (2545)** พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ที่เหมาะสมคือการกระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์ เเผาที่  $800^{\circ}\text{C}$  องศาเซลเซียส และ กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ เเผาที่  $700^{\circ}\text{C}$  องศาเซลเซียส ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนัมเบอร์เท่ากับ 519.4 และ 1021.3 ตามลำดับ การทดลองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยคอลัมน์ ที่ระดับความลึกของถ่านกัมมันต์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่าจุด Breakthrough สามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 1.21, 14.17, 186.04 และ 209.17 ลิตร สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไฮเดียมคลอไรด์ และได้เท่ากับ 4.0, 21.5, 337.25 และ 829.5 ลิตร สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ตามลำดับ

**Chang (1991)** ได้ศึกษาการกำจัดสารละลายแคดเมียมและตะกั่วด้วย Powder activated carbon(PAC) โดยใช้ PAC 10 g/l เวลาสัมผัส 10 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มความปั่นป่วนของระบบ ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักทั้งสองชนิดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลของความปั่นป่วนที่มีต่อการกำจัดแคดเมียมและตะกั่ว

rpm	Cd residual(mg/l)	Cd removal(%)	Pb residual(mg/l)	Pb removal(%)
0	5.000	-	5.000	-
50	2.777	44.5	0.680	86.4
100	0.416	91.7	0.600	88.0
150	0.283	94.3	0.365	92.27
200	0.219	95.6	0.310	93.8
250	0.174	96.5	0.269	94.6

ที่มา: Chang,1991

**González, et al. (1994)** การดูดซับแคดเมียมและสังกะสีบนดินเบนโทไนท์(natural bentonite) ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการให้ความร้อนที่ 110 หรือ 200 องศาเซลเซียส และการดูดซับบนดินเบนโทไนท์ ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก( $H_2SO_4$ ) เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และ 2.5 โมลต่อลิตร ที่ 30 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองเหมาะสมกับสมการของ Langmuir ประสิทธิภาพการดูดซับ( $X_m$ ) ของแคดเมียม สำหรับacid-treat(2.5mol/l)เท่ากับ 2.39 mg/g และ heat-treat(200°C) เท่ากับ 4.54 mg/g

สำหรับกระบวนการดูดซับสังกะสีค่า  $X_m$  และ  $K_d$  ของ heat-treat มีค่ามากกว่า acid-treat ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับ(R) ของ acid-treat สำหรับแคดเมียมและสังกะสีเท่ากับ 65.9%และ 8.2%ตามลำดับ ส่วนของ heat-treat เท่ากับ 100% และ 19.9 % ตามลำดับ

**Seng , Lee และ Liew (2001)** ได้ศึกษาการใช้ดินฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำมัน มาดูดซับโครเมียม[Cr(VI)] และนิกเกิล[Ni(II)] ดินฟอกสีที่ใช้ถูกปรับสภาพโดยการใช้กรดตามด้วยการให้ความร้อน และปรับสภาพโดยความร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิระหว่าง 200 และ 800 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวของดินที่ปรับสภาพโดยความร้อนมีค่ามากที่สุด 120 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิการเผาระหว่าง 400 และ 500 องศาเซลเซียส ขณะที่การปรับสภาพด้วยกรดและความร้อนทำให้ดินมีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ 140 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับโครเมียม[Cr(VI)] ของทั้งสองวิธีมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 300 องศาเซลเซียส และจะมีค่าการ

ดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่านี้ ที่ค่าพีเอชต่ำๆ มากกว่า 95 % ของโครเมียมถูกดูดซับโดยดินที่เผาที่ 300 องศาเซลเซียสโดยใส่ตัวดูดซับ 1 กรัม กับสารละลายโครเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับนี้สอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรอนด์ริค(Freundlich) การดูดซับนิกเกิลโดยใช้ดินที่ปรับสภาพโดยการเผาที่ 200 และ 700 องศาเซลเซียส และโดยการใช้กรวดรวมกับการเผาที่ 200 และ 500 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 42 และ 44% ตามลำดับที่พีเอชเท่ากับ 6

Stefanova (2001) ได้ศึกษาการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว ทองแดงและสังกะสี ในสารละลายโดยดินมาร์ลที่ผ่านการกระตุ้นด้วยการเผาที่ 750 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโลหะหนักแรกเริ่ม เวลาสัมผัส พีเอชและอุณหภูมิสารละลาย โดยทำการทดลองแบบเบท พบว่าจุลศาสตร์การกำจัดไอออนโลหะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับ ที่ความเข้มข้นไอออนต่ำๆไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการของ Langmuir ขณะที่อัตราส่วนอัตราส่วนสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับมีค่าสูง ไอโซเทอมการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการของ Freundlich ค่า พีเอช มีผลต่อบริเวณขอบของการดูดซับ สามารถกำจัดไอออนโลหะได้จากการตกตะกอนและการเกิดสารประกอบที่ผิว จากการสังเกตพบว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 40 องศาเซลเซียส จากการศึกษพบว่าดินมาร์ลที่ถูกปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนสามารถกำจัดไอออนโลหะในสารละลายในช่วงความเข้มข้นกว้างได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ที่ห้องปฏิบัติการมูลฝอย (Solid waste laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ลำดับขั้นในการวิจัย

- 1) การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย
- 2) ศึกษาองค์ประกอบของดินเหนียว
- 3) การผลิตดินเผาดูดซับที่อัตราส่วนผสมดินเหนียวและซีลี้อยู่ อุณหภูมิในการเผาและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ
- 4) การเลือกดินเผาดูดซับที่ดีที่สุด
- 5) ศึกษาการดูดซับไอออนแคดเมียมที่ค่าพีเอชในช่วง 6 – 9 เพราะมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม กำหนดให้มีค่าพีเอชในช่วง 5.5 - 9
- 6) ศึกษาการชะละลายไอออนแคดเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรด
- 7) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเม็ดดูดซับที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด
- 8) ศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด
- 9) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของดินเผาดูดซับโดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง
- 10) ประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตดินเผาดูดซับ

#### 3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมดินเผาดูดซับ

- 1) ตู้อบความร้อน : WTB Binder. Germany

- 2) เตาเผา : Valcan box furnace รุ่น 3-1750. USA (รูปในภาคผนวก ข.)
- 3) ภาชนะดินเผาพร้อมฝาปิด (รูปในภาคผนวก ข.)
- 4) โถป้องกันความชื้น (Desiccator)
- 5) ตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 8, 30 และ 325
- 6) เครื่องบดดินละเอียด (รูปในภาคผนวก ข.)

### 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง : AND HM-300 Japan
- 2) เครื่องเขย่า (Shaker) ยี่ห้อ K รุ่น VRN-360 (รูปในภาคผนวก ข.)
- 3) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง : Desktop pH meter PHL-20, DKK Corporation. Japan
- 4) กระดาษกรอง Whatman No. 5
- 5) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการอื่นๆ
- 6) เครื่องกวนสาร
- 7) pH meter

### 3.2.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ลักษณะดิน ซึ่ละเอียด ดินเผาดูดซับและถ่านกัมมันต์

- 1) เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-5400
- 2) เครื่อง Specific Surface Area Analyzer บริษัท Micro Meritic รุ่น ASAP 2000
- 3) เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer บริษัท Perkin-Elmer รุ่น 1760X
- 4) เครื่อง Zeta – Sizer บริษัท Malvern รุ่น 3000
- 5) เครื่อง X-Ray Diffractometer บริษัท Bruker รุ่น D8 Advance
- 6) เครื่อง X-Ray Fluorescence บริษัท Philips รุ่น PW 2400
- 7) เครื่อง Mastersizer บริษัท Malvern Instruments รุ่น APA 2000

### 3.2.4 อุปกรณ์ในการอัดเม็ดและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

- 1) เครื่อง Pellet Mill บริษัท CPM รุ่น NH- 396165 (รูปในภาคผนวก ข.) สำหรับอัดดินเผาดูดซับให้เป็นเม็ด

- 2) เครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) : Perkin Elmer Instrument, Analyst 300 Atomic Adsorption Spectrophotometer. USA. สำหรับวิเคราะห์ ปริมาณโลหะแคดเมียม

### 3.2.5 อุปกรณ์ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

- 1) ท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.40 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร
- 2) สายยางใส วาล์ว และ ข้อต่อสายยาง
- 3) ถังเก็บน้ำขนาด 65, 20 และ 10 ลิตร
- 4) ปั๊มน้ำชนิด Submersible Pump ของ บริษัท Resun รุ่น SP-3800 ขนาด 25 W. Total Head 1.8 เมตร
- 5) โครงเหล็กฉาก
- 6) สายน้ำเกลือและอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

### 3.2.6 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ดินเหนียว (รูปในภาคผนวก ข.)
- 2) ซีลี้อย
- 3) น้ำกลั่น
- 4) สารละลายไอออนแคดเมียม เตรียมจากแคดเมียมไนเตรท
- 5) สารละลายกรดไนตริก( $\text{HNO}_3$ )
- 6) กรดฟอสฟอริก( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )
- 7) สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์( $\text{NaOH}$ )
- 8) สารละลายกรดซัลฟิวริก( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- 9) สารละลายสต็อกความเข้มข้นมาตรฐาน
- 10) สารละลายน้ำแป้ง(Soluble Starch)
- 11) สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
- 12) สารละลายไอโอดีน
- 13) สารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต( $\text{KIO}_3$ )
- 14) โซเดียมคาร์บอเนต( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- 15) โปตัสเซียมไอโอดีน( $\text{KI}$ )

### 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

ในการทดลองนี้จะแบ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 ชนิดคือ ตัวแปรกำหนด(Fixed Variables) ตัวแปรอิสระ(Independent Variables) และตัวแปรตาม(Dependent Variables) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 **ตัวแปรกำหนด** เป็นตัวแปรที่เรากำหนดขึ้นเองและมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง ในการทดลองนี้ตัวแปรกำหนดดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรกำหนดและพารามิเตอร์

ตัวแปรกำหนด	พารามิเตอร์
1. ความเร็วรอบของเครื่องเขย่า	150 รอบ/นาที
2. ระยะเวลาในการเขย่า	120 นาที
3. อุณหภูมิในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง(25 องศาเซลเซียส)
4. ความเข้มข้นไอออนแคดเมียม	1 มิลลิกรัม/ลิตร
5. ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	100 มิลลิลิตร
6. อุณหภูมิในการอบ	105 องศาเซลเซียส
7. ระยะเวลาในการเผาที่อุณหภูมิคงที่	30 นาที
9. ขนาดดินเผาดูดซับ	8-30 mesh
10. เบอร์ตะแกรงคัดขนาดดิน	140
11. เบอร์ตะแกรงคัดขนาดซีลี้อย	80
12. อัตราการไหลเข้าคอลัมน์	60 มิลลิลิตร/นาที
13. ค่าพีเอชของตัวชะละลายกรด	5
14. เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์	2.42 เซนติเมตร

3.3.2 **ตัวแปรอิสระ** เป็นตัวแปรที่เรากำหนดค่าขึ้นเอง ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรอิสระและพารามิเตอร์

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ชนิดของวัตถุดิบ	ดิน และ ซีเมนต์
2. อุณหภูมิในการเผา	400-900 องศาเซลเซียส
3. อัตราส่วนผสมดิน:ซีเมนต์	100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90
4. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา	3 และ 15 องศาเซลเซียส/นาที่
5. ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	6, 7, 8, 9
6. ปริมาณดินเผาดูดซับและถ่านกัมมันต์ในการทดลองหาไอโซเทอม	0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม
7. ความลึกชั้นดินเผาดูดซับในคอลัมน์	30, 60 และ 90 เซนติเมตร

3.3.3 **ตัวแปรตาม** เป็นตัวแปรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระ ซึ่งตัวแปรตามในการทดลองนี้ได้แก่

- 1) ความคงตัวของดินเผาดูดซับ
- 2) ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนแคดเมียม
- 3) ประสิทธิภาพในการถูกชะไอออน
- 4) ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลออกจากคอลัมน์จนถึงจุดหมดสภาพ
- 5) น้ำหนักถ่านในคอลัมน์
- 5) ค่าใช้จ่ายในการผลิตดินเผาดูดซับ



### 3.4 การดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 ศึกษาองค์ประกอบของดินรวมทั้งขนาดอนุภาคของดินเหนียวและซีลี้อย

3.4.1.1 ศึกษากลุ่มแร่ของดินเหนียว ที่นำมาจากหมู่บ้านเครื่องปั้นดินเผา อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) บริษัท Bruker รุ่น D8 Advance

3.4.1.2 ศึกษาธาตุองค์ประกอบของดินเหนียวโดย วิเคราะห์ดินเหนียวด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence ของบริษัท Phillip รุ่น PW 2400

3.4.1.3 ศึกษาขนาดอนุภาคดินเหนียว ด้วยเครื่อง Mastersizer บริษัท Malvern Instruments รุ่น APA 2000

3.4.1.4 ศึกษาขนาดอนุภาคซีลี้อย ด้วยเครื่อง Mastersizer บริษัท Malvern Instruments รุ่น APA 2000

#### 3.4.2 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม

3.4.2.1 การหาปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมเบื้องต้นโดยดูจากความคงรูป

1) นำก้อนดินเหนียวมาเข็นเป็นแผ่นบางๆ ประมาณ 2-3 มิลลิเมตร (รูปในภาคผนวก ข.) เพื่อนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง โดยกระจายให้ทั่วเตาอบ ปล่อยให้แผ่นของดินซ้อนกัน เมื่อแห้งนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดดิน จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 140 ส่วนที่ค้างบนตะแกรงให้นำมาบดอีกครั้งและร่อนซ้ำ

2) นำซีลี้อยมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง จนแห้งและนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80

3) นำดินเหนียวและซีลี้อยที่เตรียมได้มาผสมกันตามสัดส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่างดินเหนียว : ซีลี้อย ในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 เติมน้ำกลั่นประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพร้อมคลุกเคล้าส่วนผสมทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้ น้ำแทรกเข้าสู่เนื้อดินและซีลี้อยอย่างทั่วถึง นำไปอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดอาหารกึ่ง(เครื่อง Pellet Mill บริษัท CPM รุ่น NH- 396165 ) จะได้ชิ้นงานทรงกระบอกยาวประมาณ 0.4 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.26 เซนติเมตร

4) นำชิ้นงานที่ได้มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง

5) นำชิ้นงานที่อบแล้วมาใส่ในภาชนะดินเผาที่มีฝาปิดและเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 และ 15 องศาเซลเซียส ต่อนาที และให้ความร้อนคงที่นาน 30 นาที

6) นำดินเผาดูดซับทั้ง 120 ตัวอย่าง ที่เผาแล้วมาตำและร่อนคัดขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 30

7) นำดินเผาดูดซับทั้ง 120 ตัวอย่าง ที่เตรียมได้มาตัวอย่างละ 1 กรัม และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที

8) นำของผสมข้างต้น เทผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh แล้วนำส่วนที่ผ่านตะแกรงไปวัดความขุ่นด้วยวิธีในพีพีโรเมตริก เพื่อหาค่าความขุ่น

#### 3.4.2.2 การทดลองหาตัวอย่างที่มีค่าการดูดซับแคดเมียมสูงสุด

1) นำตัวอย่างดินเผาดูดซับที่มีค่าความขุ่นในน้ำต่ำกว่า 10 NTU จากข้อ 3.4.2.1 มาดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยนำสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร นำน้ำเสียดังกล่าวปริมาตร 100 มิลลิลิตร และดินเผาดูดซับ 1 กรัม เทใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ผ่านการล้างเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนักแล้ว นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที

2) นำของผสมมากรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บตัวอย่างที่กรองได้ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น ( $\text{HNO}_3$ ) นำไปวัดปริมาณไอออนแคดเมียมที่เหลือด้วยเครื่อง AAS.

3) นำตัวอย่างดินเผาดูดซับที่กำจัดแคดเมียมได้มากที่สุดหรือเหมาะสมที่สุด เพียงตัวอย่างเดียวมาทำการศึกษาต่อไป

4) ทำซ้ำข้อ 1) และ 2) แต่เปลี่ยนจากดินเผาดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด

### 3.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนแคดเมียมของดินเผาดูดซับ

3.4.3.1 การทดลองหาค่าทางจลศาสตร์(kinetic) ศึกษาเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยา(equilibrium) เพื่อนำไปใช้ในการหาความสามารถในการดูดซับและไอโซเทอมของดินเผาดูดซับ มีขั้นตอนและวิธีทำสรุปดังรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดดังนี้

- 1) เตรียมดินเผาดูดซับที่ดูดซับไอออนแคดเมียม( $\text{Cd}^{2+}$ ) ได้ดีที่สุดจากข้อ 3.2.3.5
- 2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียม( $\text{Cd}^{2+}$ ) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร จำนวน 12 ใบ
- 3) ใส่ดินเผาดูดซับที่บดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ปริมาณ 0.025 กรัม ใส่ในขวดพลาสติก(PE) จำนวน 12 ใบจากข้อ 2.
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ใช้ปิเปตดูดน้ำส่วนบนจากขวดใบที่ 1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที และดูดน้ำจากขวดแต่ละใบที่เหลือเมื่อเวลาผ่านไป 60, 90, 120, 240, 300, 360, 480, 660, 840, 1020 และ 1380 นาที ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เท่ากัน นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใสที่กรองได้ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง ปริมาตร 30 มิลลิลิตร หยดกรดไนตริกเข้มข้นประมาณ 2 หยด ลงในขวดเก็บตัวอย่างแต่ละใบ
- 5) นำน้ำตัวอย่างทั้ง 12 ตัวอย่าง ไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียมที่เหลือ โดยเครื่อง AAS. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟจลศาสตร์ ระหว่างเวลาและความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมที่เหลือ จากกราฟจะได้เวลาในการเข้าสู่สมดุล

### 3.4.3.2 การศึกษาไอโซเทอม ของดินเผาดูดซับและถ่านกัมมันต์ที่ค่าพีเอชต่างๆ

#### 3.4.3.2.1 การศึกษาไอโซเทอม ของดินเผาดูดซับที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช

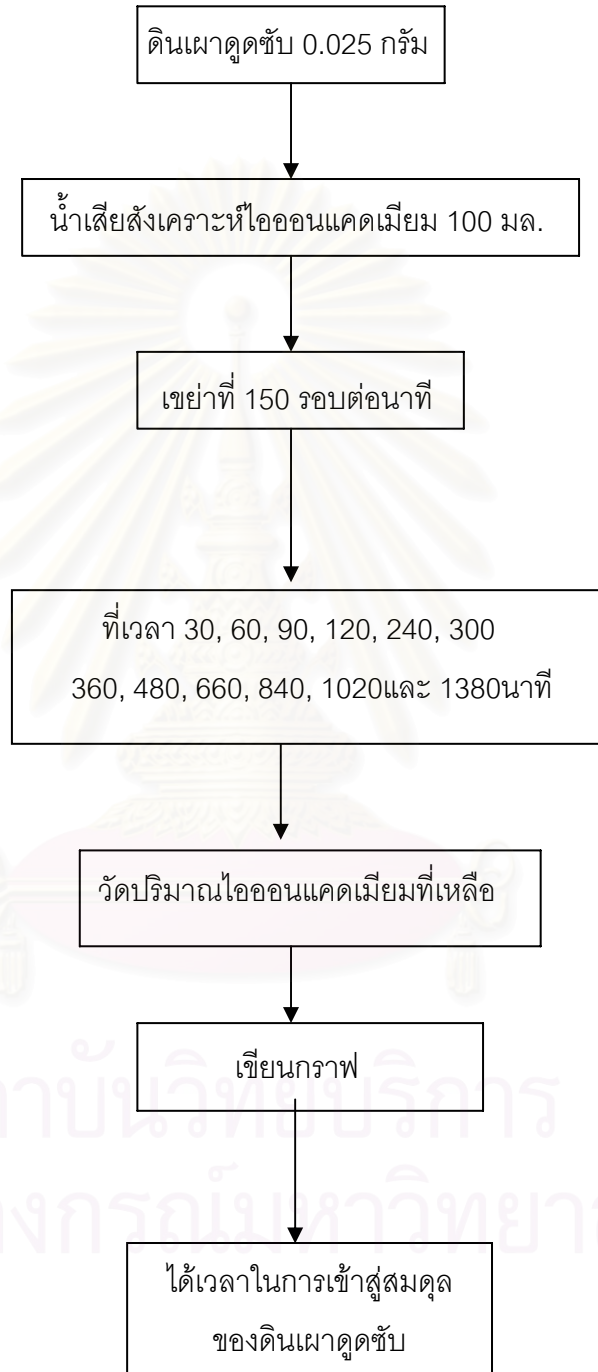
- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียม( $\text{Cd}^{2+}$ ) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) ชั่งดินเผาดูดซับปริมาณ 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม ลงในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่รอบการทำงาน 150 รอบต่อนาที
- 5) นำปิเปตดูดน้ำในแต่ละขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมดุล(ผลจากการหาค่าทางจลศาสตร์จากข้อ 3.4.3.1 ) นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใสไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง หยดกรดไนตริกเข้มข้นประมาณ 2 หยด ลงในขวดเก็บตัวอย่างแต่ละใบ

- 6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียม โดยเครื่อง AAS.
- 7) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ

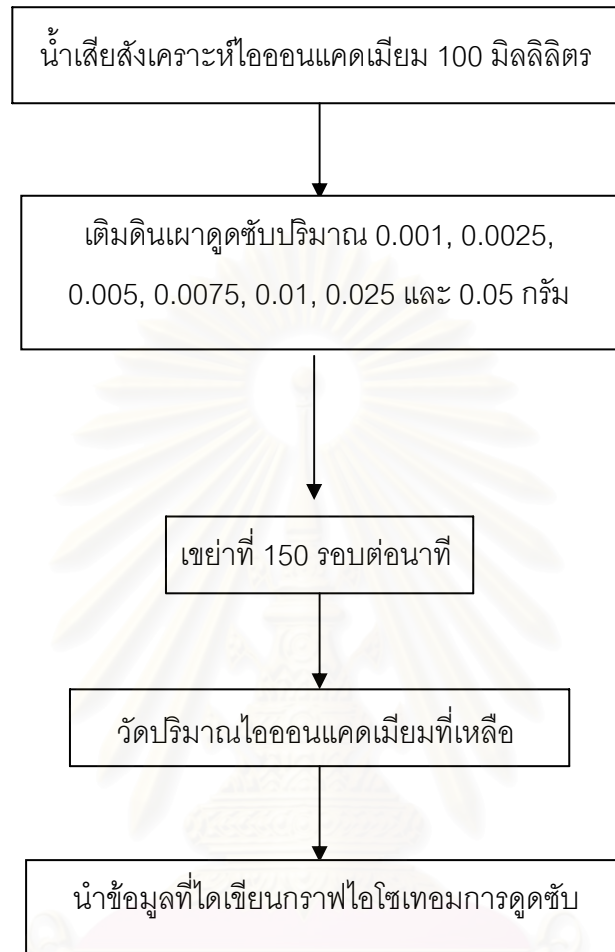
#### 3.4.3.2.2 การศึกษาไอโซเทอม ของถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแคดเมียม( $Cd^{2+}$ ) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) ชั่งถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม ลงในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่รอบการทำงาน 150 รอบต่อนาที
- 5) นำปิเปตดูดน้ำในแต่ละขวดปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมดุล(ผลจากการหาค่าทางจุลศาสตร์จากข้อ 3.4.3.1) นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง หยดกรดไนตริกเข้มข้นประมาณ 2 หยด ลงในขวดเก็บตัวอย่างแต่ละใบ
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียม โดยเครื่อง AAS.
- 7) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ

ขั้นตอนการทดลองการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและการทดลองหาไอโซเทอมของการดูดติดผิว แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุล



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลองหาไอโซเทอมของการดูดซับ

#### 3.4.3.2.3 การศึกษาไอโซเทอม ของดินเผาจุดซ์ที่ค่าพีเอช 6

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนแคดเมียม( $\text{Cd}^{2+}$ ) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่  $\text{H}_3\text{PO}_4$  0.7 มิลลิลิตร เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเขย่า ใช้สารละลายกรดไนตริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอช เป็น 6
- 2) ึ่งดินเผาจุดซ์ปริมาณ 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม ลงในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ

- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่ 150 รอบต่อนาที
- 5) นำปิเปตดูดน้ำในขวดแต่ละใบปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมมูล(ผลจากการหาค่าทางจุลศาสตร์) นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างหยดกรดไนตริกเข้มข้น 2 หยด ในขวดแต่ละใบ
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียม โดยเครื่อง AAS.
- 7) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ

#### 3.4.3.2.4 การศึกษาไอโซเทอม ของดินเผาดูดซับที่ค่าพีเอช 7

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนแคดเมียม( $\text{Cd}^{2+}$ ) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่  $\text{H}_3\text{PO}_4$  0.7 มิลลิลิตร เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเขย่า ใช้สารละลายกรดไนตริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอช เป็น 7
- 2) ชั่งดินเผาดูดซับปริมาณ 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม ลงในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่ 150 รอบต่อนาที
- 5) นำปิเปตดูดน้ำในขวดแต่ละใบปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมมูล(ผลจากการหาค่าทางจุลศาสตร์) นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างหยดกรดไนตริกเข้มข้น 2 หยด ในขวดแต่ละใบ
- 6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียม โดยเครื่อง AAS.
- 7) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ

#### 3.2.3.2.5 การศึกษาไอโซเทอม ของดินเผาดูดซับที่ค่าพีเอช 8

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนแคดเมียม( $\text{Cd}^{2+}$ ) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่  $\text{H}_3\text{PO}_4$  0.9 มิลลิลิตร เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเขย่า ใช้สารละลายกรดไนตริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอช เป็น 8
- 2) ชั่งดินเผาดูดซับปริมาณ 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม ลงในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่ 150 รอบต่อนาที

5) นำปิเปตดูดน้ำในขวดแต่ละใบปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมมูล(ผลจากการหาค่าทางจุลศาสตร์) นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างหยดกรดไนตริกเข้มข้น 2 หยด ในขวดแต่ละใบ

6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียม โดยเครื่อง AAS.

7) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ

### 3.2.3.2.6 การศึกษาไอโซเทอม ของดินเผาดูดซับที่ค่าพีเอช 9

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนแคดเมียม( $Cd^{2+}$ ) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่  $H_3PO_4$  0.9 มิลลิลิตร เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชให้คงที่ตลอดระยะเวลาการเขย่า ใช้สารละลายกรดไนตริกและสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอช เป็น 9

2) ชั่งดินเผาดูดซับปริมาณ 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม ลงในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร

3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ในข้อ 1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแต่ละใบ

4) นำขวดทั้งหมดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่ 150 รอบต่อนาที

5) นำปิเปตดูดน้ำในขวดแต่ละใบปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาถึงจุดสมมูล(ผลจากการหาค่าทางจุลศาสตร์) นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างหยดกรดไนตริกเข้มข้น 2 หยด ในขวดแต่ละใบ

6) นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียม โดยเครื่อง AAS.

7) นำค่าที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับ ที่ทำการศึกษาที่ค่าพีเอช 6, 7, 8 และ 9 เพราะเป็นค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 5.5 – 9 ตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม รายละเอียดในภาคผนวก ก.

### 3.4.4 การศึกษาการชะไอออนแคดเมียมด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น

3.4.4.1 นำดินเผาดูดซับขนาด 8-30 mesh ปริมาณ 1 กรัม เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที กับสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 มิลลิลิตร ในขวดพลาสติก(PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร เป็นเวลาเท่ากับเวลาในการเข้าสู่สมมูล ทำทั้งหมด 25 ชุด

3.4.4.2 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำถ่านที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จนแห้ง



3.4.4.3 นำถ่านที่ได้ 1 กรัม และ สารละลายกรดฟิเชช 5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เตรียมจากน้ำกลั่น 1 ลิตร กรด  $H_2SO_4$  เข้มข้น 0.3 มิลลิลิตร กรด  $H_3PO_4$  1 มิลลิลิตร ปรับค่าฟิเชช ให้เท่ากับ 5 ด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใส่ในขวดพลาสติก (PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร ทำทั้งหมด 9 ใบ นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ใช้ปิเปตดูดน้ำส่วนบนจากขวดใบที่ 1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที และดูดน้ำจากขวดแต่ละใบที่เหลือ เมื่อเวลาผ่านไป 30, 60, 90, 120, 240, 480, 720 และ 1440 นาที ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เท่ากัน นำไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เก็บน้ำไลที่กรองได้ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ไว้ในขวด เก็บตัวอย่างและหยดกรดไนตริกเข้มข้น 2 หยด ในขวดแต่ละใบ

3.4.4.4 นำน้ำตัวอย่างทั้ง 9 ไปตรวจปริมาณไอออนแคดเมียม โดยเครื่อง AAS.

3.4.4.5 ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.2.4.1 แต่เปลี่ยนจากสารละลายกรดเป็นน้ำกลั่น

### 3.4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง

3.4.5.1 นำดินเผาดูดซับที่ได้จากข้อ 3.4.2 ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (ขนาดอนุภาค 2.38 มิลลิเมตร) และ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 30 (ขนาดอนุภาค 0.59 มิลลิเมตร) มาบรรจุลงในคอลัมน์หรือถังดูดซับแบบแท่งที่เป็นท่ออะคริลิกแบบใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.42 เซนติเมตร และมีการเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นดินเผาดูดซับที่ 0, 30, 60 และ 90 เซนติเมตร บันทึกน้ำหนักของดินเผาดูดซับที่ใช้บรรจุในคอลัมน์สูง 90 เซนติเมตร

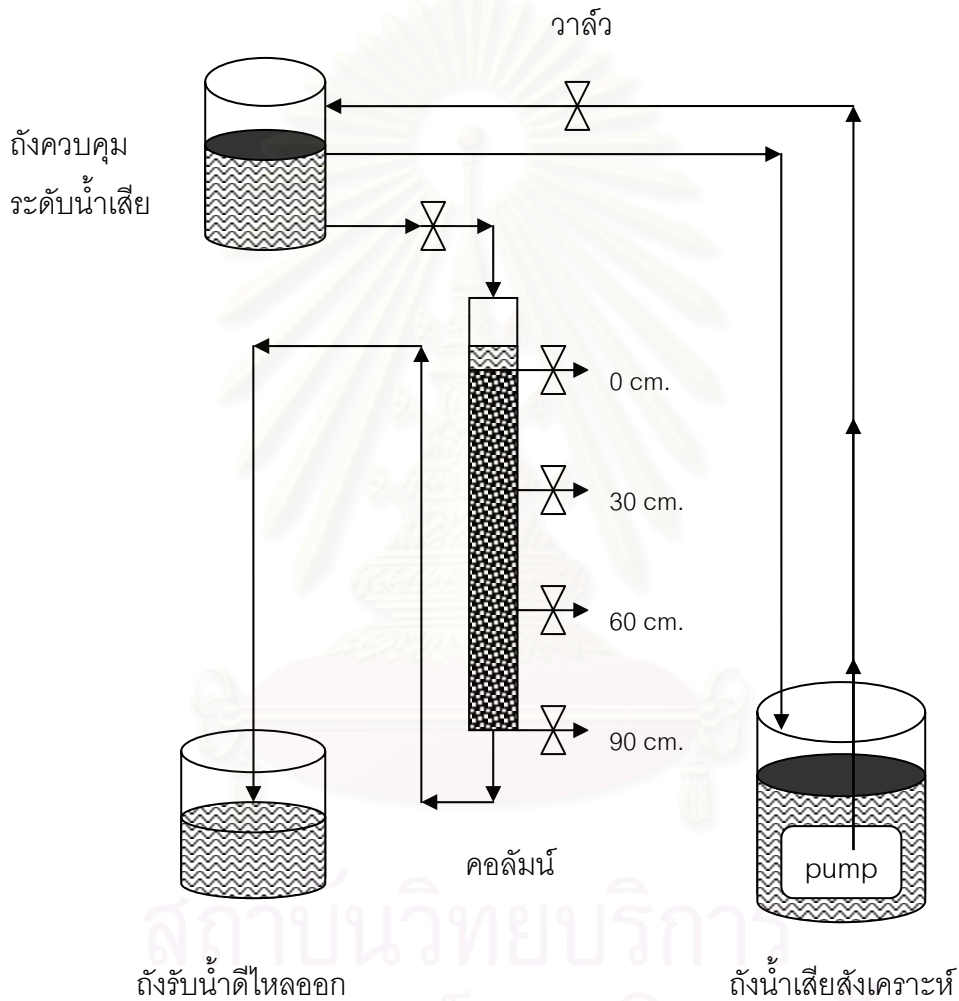
3.4.5.2 เตรียมน้ำเสียที่มีแคดเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจากสารละลายแคดเมียมไนเตรทเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร น้ำกลั่นจากโรงงานผลิตน้ำกลั่น ปริมาตร 49950 มิลลิลิตร กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เข้มข้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และปรับค่าฟิเชชที่เหมาะสมค่าใดค่าหนึ่งใน 4 ค่า คือ ฟิเชช 6, 7, 8 และ 9 ด้วยสารละลายกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.4.5.3 ป้อนน้ำเสียจากข้อ 3.4.5.2 เข้าสู่คอลัมน์ดังรูปที่ 3.3 โดยการปล่อยให้ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง (Down Flow) ควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ด้วยแรงดึงดูดของโลก ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

3.4.5.4 เมื่อมีน้ำเสียไหลออกจากระบบทุกๆ 5 ลิตร ให้เก็บตัวอย่างน้ำเสีย ที่ระดับความลึกของชั้นถ่าน 0, 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร วัดค่าฟิเชช นำมากรองผ่านกระดาษกรองของ Whatman เบอร์ 5 นำน้ำที่ได้ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ใส่ในขวดเก็บตัวอย่าง หยดกรดไนตริกเข้มข้น 1 หยด

3.4.5.5 นำไปวัดปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS. เมื่อค่าความเข้มข้นแคดเมียมที่ระดับความลึก 30, 60 และ 90 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับที่ระดับความลึก 0 เซนติเมตร ให้หยุดเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกนั้น

3.4.5.6 นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ



รูปที่ 3.3 ระบบการทำงานของคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.4.6 หาคุณลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับและถ่านกัมมันต์

นำดินเผาดูดซับและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆดังนี้

3.4.6.1 Iodine Number ตามมาตรฐาน ASTM D 4607-86 (รายละเอียดในภาคผนวก ค.)

3.4.6.2 Surface Area, Total Pore Volume และ Average Pore Diameter โดยเครื่อง BET Surface Area Analyzer

3.4.6.3 Zeta Potential โดยเครื่อง Zetasizer

3.4.6.4 ถ่ายภาพขยาย 2000 เท่า โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope

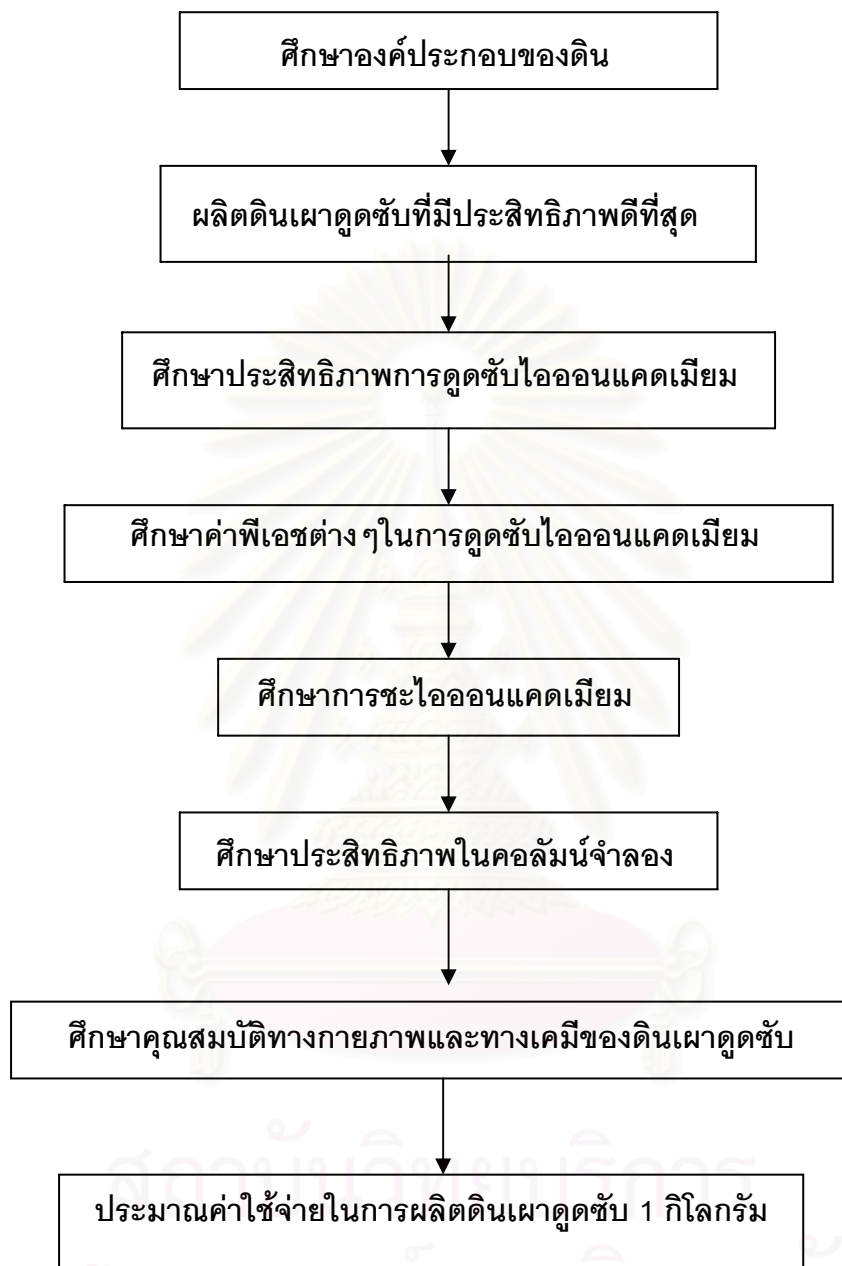
3.4.6.5 Functional Group โดยเครื่อง FT-IR

### 3.4.7 ประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตดินเผาดูดซับ

ประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตดินเผาดูดซับ 1 กิโลกรัม โดยคิดจากค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้าและค่าแรงงาน เปรียบเทียบราคากับถ่านกัมมันต์

สรุปขั้นตอนและวิธีทำการทดลองทั้งหมดเป็นแผนผัง ดังรูปที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การดำเนินการทดลองในการวิจัยนี้ ได้ทำตามแผนการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งมีผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 การศึกษาองค์ประกอบของดิน

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม คือ ดินเหนียวได้จากหมู่บ้านเครื่องปั้นดินเผาบ้านเกาะเกร็ด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี นำมาอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 mesh ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ ซี้เลื่อยได้จากโรงเลื่อยไม้กระดาน วงกบ ประตู หน้าต่าง เขตสวนหลวง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นไม้รวมหลายประเภทเช่น ไม้เต็ง ไม้สัก ไม้แดง และ ไม้ขนุน เป็นต้น นำมาอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 mesh ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ดินเหนียวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.2 ซีเลียวที่ใช้เป็นวัตถุุดิบในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม

#### 4.1.1 วิเคราะห์ดินเหนียวด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

จากการวิเคราะห์ดินเหนียวที่ใช้ในการทดลอง ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) บริษัท Bruker รุ่น D8 Advance ได้ผลดังรูปที่ 4.3 จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าดินเหนียวที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบคือ ควอตซ์ (Quartz) เกาลินไนท์ (Kaolinite) อิลไลท์ (Illite) และมอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ซึ่งนักเรวิทยาได้อธิบายกลุ่มของแร่ดินไว้ดังนี้

กลุ่มแร่เกาลินไนท์ (Kaolinite) มีโครงสร้างของผลึกดินเป็นแผ่นบางๆ เรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ เบียดอัดกันแน่น โครงสร้างของผลึกประสานกันแข็งแรง แร่อื่นไม่สามารถที่จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของผลึกได้ มีความทนไฟสูงความเหนียวต่ำ

กลุ่มอิลไลท์ (Illite) หรือมีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่ากลุ่มแร่ไมก้า ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากกลุ่มแร่เกาลินไนท์อย่างสิ้นเชิง ผลึกของดินไม่ได้เรียงตัวซ้อนกันด้วยแรงแชนิตเดียวกัน แต่มีผลึกของแร่อื่นเข้ามาแทรกอยู่ในระหว่างผลึกด้วย เป็นแร่ดินขาวที่มีไมก้าสูง จึงมีจุดหลอมละลายต่ำกว่าดินขาวบริสุทธิ์

กลุ่มมอนท์มอริลโลไนท์(Montmorillonite) มีโครงสร้างผลึกไม่แน่นอน เม็ดของผลึกดินมีความละเอียดมาก โครงสร้างของผลึกแตกต่างกันอยู่หลวมๆ ดังนั้นน้ำ อินทรีย์สาร และแร่ธาตุจึงแทรกเข้าไปตามชั้นของผลึกดินได้ ทำให้ดินไม่บริสุทธิแต่มีความเหนียวสูงและมีเนื้อดินละเอียดมาก ส่วนควอทซ์(Quartz) จะทำให้ดินเมื่อเผาจนสุกตัวแล้วมีความแข็งสูง

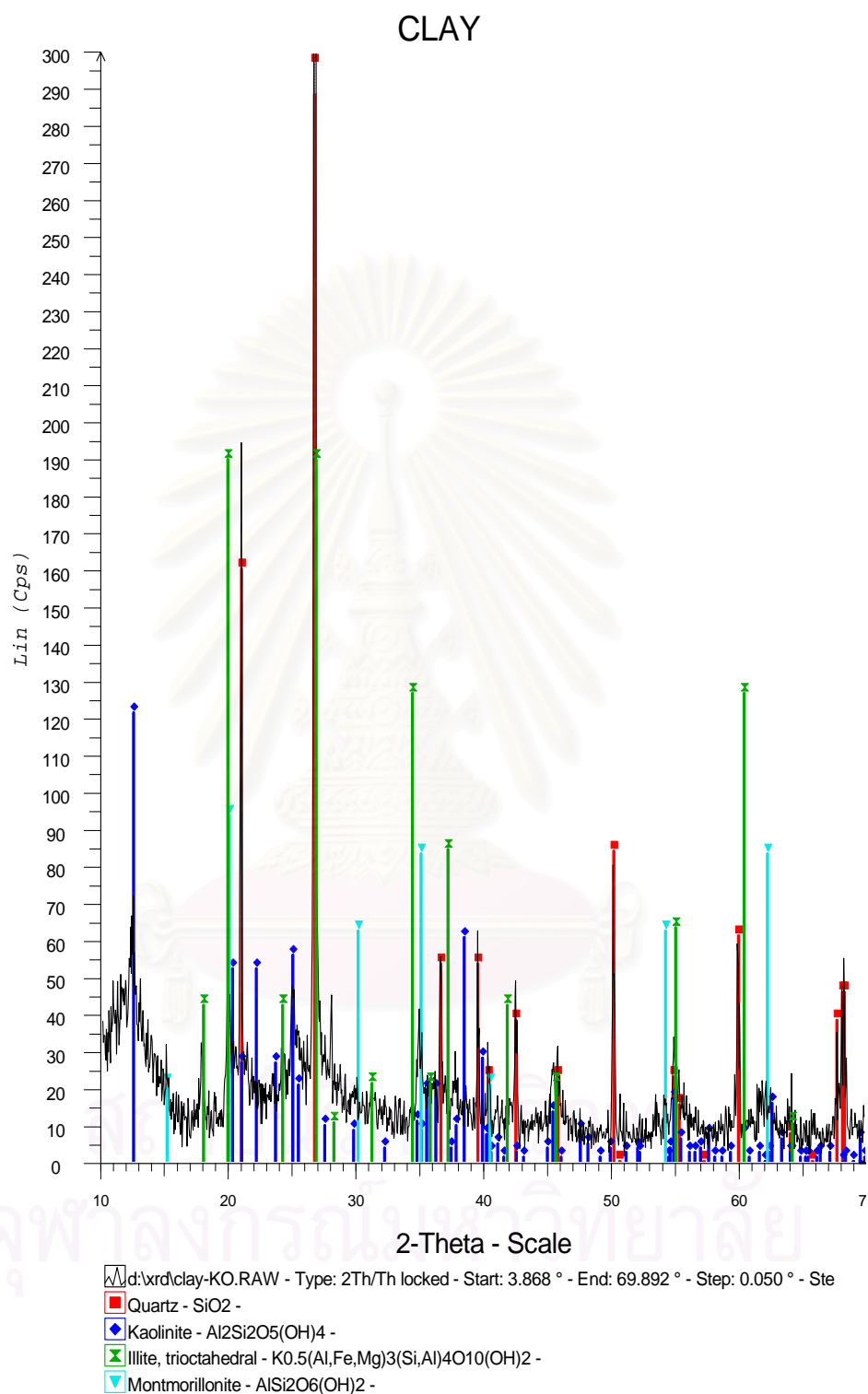
จากผลการทดลอง ดินประกอบด้วยกลุ่มของแร่ดินหลายกลุ่มไม่ชัดเจน ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่มาของดินเป็นดินที่ขุดมาจากท้องนา จึงมีแร่ดินหลายกลุ่มและมีอินทรีย์สารอยู่สูง และจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของดิน พบว่าดินมีลักษณะเนื้อละเอียด มีสีเทาดำ ผสมน้ำแล้วเหนียวมาก ปั้นเป็นก้อนได้ง่าย

#### 4.1.2 วิเคราะห์ดินเหนียวด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

จากการวิเคราะห์ดินเหนียวด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence ของบริษัท Phillips รุ่น PW 2400 ได้ผลดังตารางที่ 4.1 พบว่าดินเหนียวมีธาตุต่าง ๆ ดังนี้ Si, Al, Fe, K, Mg, Ti, Ca และ Na

ตารางที่ 4.1 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของดินเหนียว ที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

Compound	Conc. (%)	Compound	Conc. (%)
SiO <sub>2</sub>	68.440	MgO	1.244
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.204	TiO <sub>2</sub>	0.804
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.874	Na <sub>2</sub> O	0.634
K <sub>2</sub> O	2.205	CaO	0.594

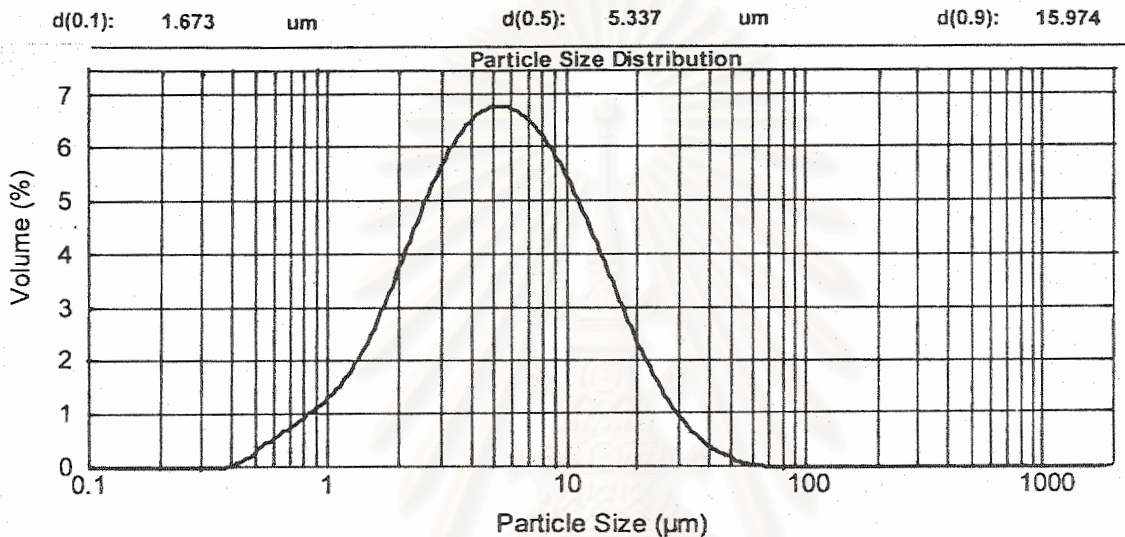


รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ดินเหนียวด้วยเครื่อง XRD



#### 4.1.3 วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคดินเหนียว

จากการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของดิน ที่ผ่านการบดโดยเครื่องบดดิน และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 140 ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 รุ่น APA 2000 ได้ผลดังรูปที่ 4.4

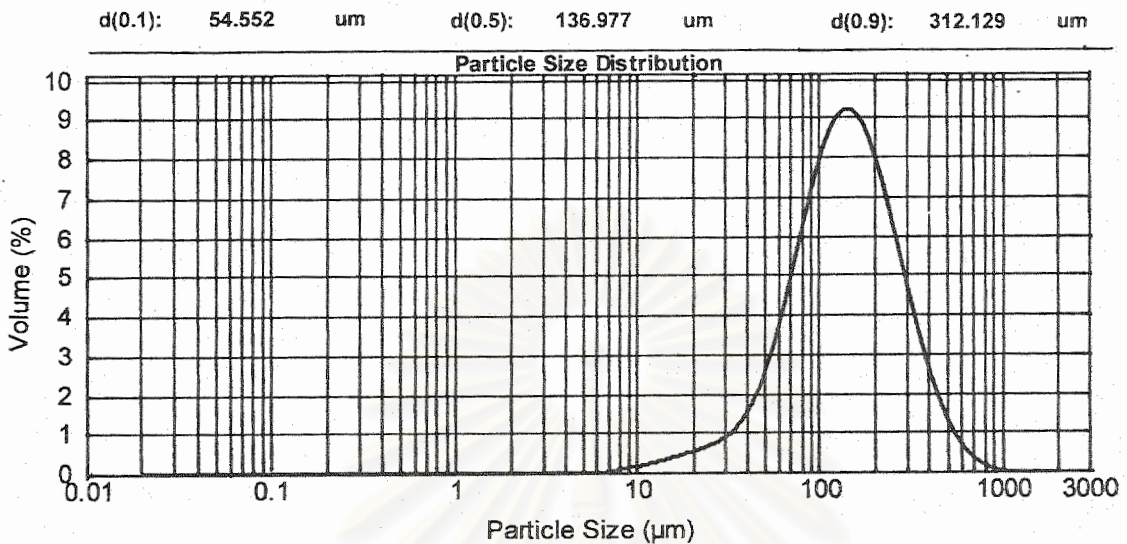


รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของดินเหนียวที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 4.4 พบว่าขนาดอนุภาคดินเล็กที่สุดอยู่ในช่วง 0.399 - 0.488 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคดินใหญ่ที่สุดอยู่ในช่วง 56.368 - 63.246 ไมโครเมตร และ Mass Media Diameter มีค่าเท่ากับ 5.337 ไมโครเมตร หมายถึง 50% ของดินเหนียวมีขนาดเล็กกว่า 5.337 ไมโครเมตร และอีก 50% ของดินเหนียวมีขนาดใหญ่กว่า 5.337 ไมโครเมตร (รายละเอียดในภาคผนวก ง.)

#### 4.1.4 วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคซีลี้อย

จากการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคซีลี้อยที่ผ่านการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80 ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 รุ่น APA 2000 ได้ผลดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคของขี้เถ้าที่ใช้ในการทดลอง

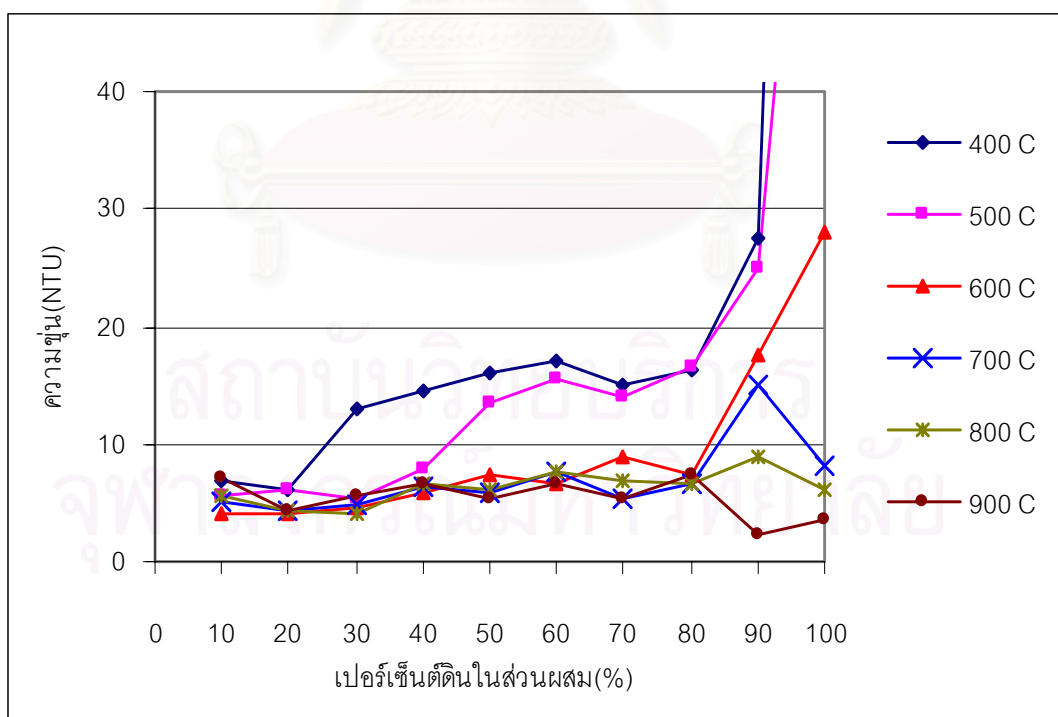
จากรูปที่ 4.5 พบว่าขนาดอนุภาคขี้เถ้าที่เล็กที่สุดอยู่ในช่วง 7.096 – 7.962 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคขี้เถ้าที่ใหญ่ที่สุดอยู่ในช่วง 893.367 – 1002.374 ไมโครเมตร และ Mass Media Diameter มีค่าเท่ากับ 136.977 ไมโครเมตร หมายถึง 50% ของขี้เถ้ามีขนาดเล็กกว่า 136.977 ไมโครเมตร และอีก 50% ของขี้เถ้ามีขนาดใหญ่กว่า 136.977 ไมโครเมตร (รายละเอียดในภาคผนวก ง.)

ขนาดอนุภาคที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80 น่าจะมีค่าใหญ่ไม่เกิน 177 ไมโครเมตร แต่ผลการวิเคราะห์พบว่าขี้เถ้ามีขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ในช่วง 893.367 – 1002.374 ไมโครเมตร ที่เป็นเช่นนี้เพราะขี้เถ้ามีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เมื่อแท่งขี้เถ้าที่มีความสูงของทรงกระบอกในช่วง 893.367 – 1002.374 ไมโครเมตร นอนราบไปบนตะแกรงก็ไม่สามารถลอดผ่านรูตะแกรงได้ แต่ถ้าขี้เถ้าดังกล่าวถูกร่อนและตั้งตรงก็สามารถลอดผ่านรูตะแกรงได้ ดังนั้นขนาดดังกล่าวน่าจะเป็นความสูงของแท่งขี้เถ้า และหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของขี้เถ้าได้เท่ากับ 11 เปอร์เซ็นต์

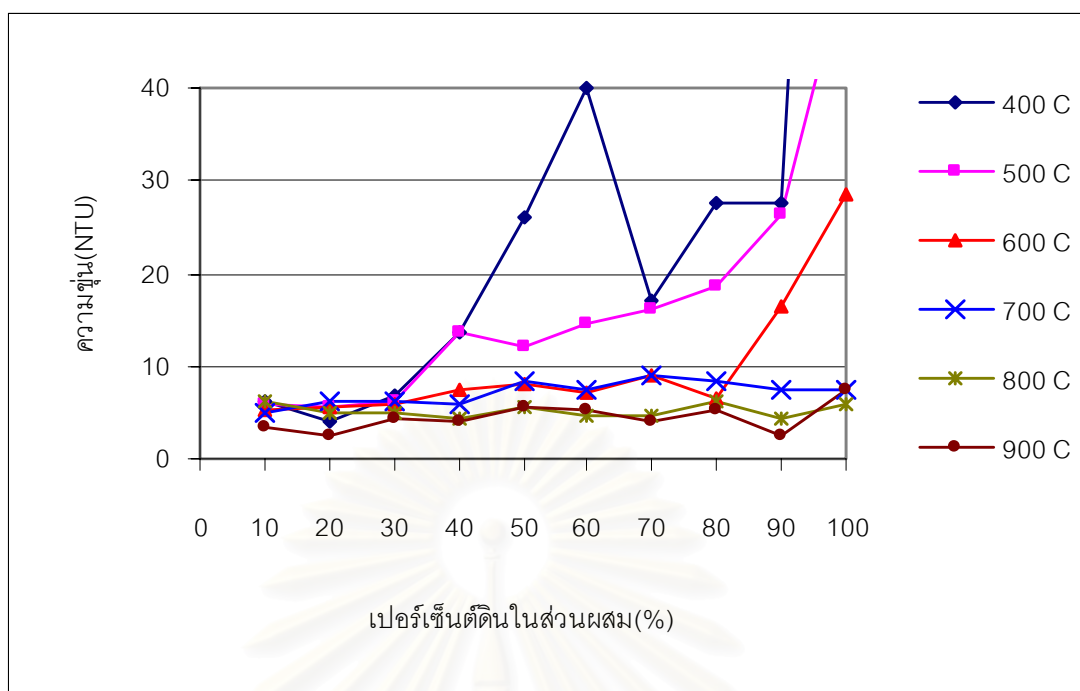
## 4.2 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตดินเผาอุตสาหกรรม

### 4.2.1 การหาปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมเบื้องต้น

ดำเนินการโดยนำดินเหนียวผสมกับขี้เถ้าที่อัตราส่วนระหว่างดินต่อขี้เถ้าอย่างนี้ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 นำส่วนผสมต่างๆ คลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน ผสมน้ำประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ทิ้งไว้ 15 นาที นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ด จากนั้นนำมาเผาที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยใส่ในภาชนะดินเผาที่มีฝาปิด ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 และ 15 องศาเซลเซียส จากปัจจัยการผลิตต่างๆ จะได้ดินเผาอุตสาหกรรมทั้งหมด 120 ตัวอย่าง ที่มีคุณสมบัติต่างกัน และเพื่อหาตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดเพียงตัวอย่างเดียว ในเบื้องต้นจะทำการวิเคราะห์โดยนำตัวอย่างทั้ง 120 ตัวอย่าง มาบดและคัดขนาดให้ได้ขนาด 8-30 mesh ตัวอย่างละ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที นาน 120 นาที จากนั้นกรองด้วยตะแกรงขนาด 40 mesh นำน้ำที่ได้ไปวัดค่าความขุ่นด้วยวิธีเนฟฟีโรเมตริกได้ผลดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ค่าความขุ่นของดินเผาที่อัตราส่วนดินต่อขี้เถ้า อุณหภูมิการเผา และที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 4.7 ค่าความขุ่นของดินเผาที่อัตราส่วนดินต่อซีลี้อยู่ อุณหภูมิการเผา และที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที

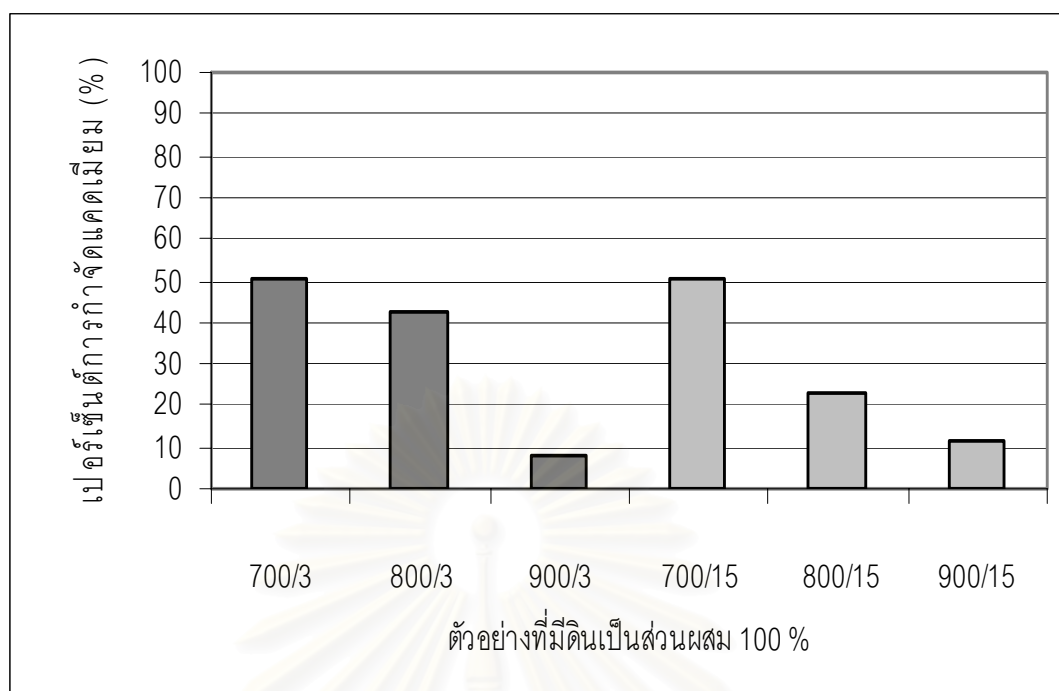
จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ค่าในแกนแนวนอน หมายถึงเปอร์เซ็นต์ของดินที่มีอยู่ในส่วนผสมที่เหลือเป็นซีลี้อยู่ เช่น ค่าในแกนแนวนอน เท่ากับ 20 หมายถึงมีดินในส่วนผสม 20% และมีซีลี้อยู่ในส่วนผสม 80% เป็นต้น จะเห็นว่าดินเผาดูดซับที่อุณหภูมิการเผาต่ำจะมีแนวโน้มของค่าความขุ่นสูงกว่าดินเผาดูดซับที่อุณหภูมิการเผาสูงโดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะมีค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU ในทุกๆอัตราส่วนดินต่อซีลี้อยู่และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่อุณหภูมิการเผาสูงดินมีความสุกตัวมากกว่าที่อุณหภูมิการเผาต่ำเมื่อดินสุกตัวอนุภาคดินจะเกาะกันมากขึ้นและแข็งขึ้นเมื่อนำมาเขย่ากับน้ำกลั่น ทำให้ดินไม่ละลายออกมา และในช่วงอุณหภูมิการเผา 400-500 องศาเซลเซียส ค่าความขุ่นส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิการเผา 600-900 องศาเซลเซียส และมีค่ามากกว่ามากจนสังเกตได้อย่างชัดเจน เป็นเพราะการเผาที่อุณหภูมิดังกล่าวดินยังไม่สุกตัว มีการเกาะกันของอนุภาคดินอย่างหลวมๆ เมื่อนำไปเขย่ากับน้ำกลั่นอนุภาคดินจึงละลายออกมาทำให้น้ำกลั่นมีความขุ่นมากขึ้น แต่ตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์ดินในส่วนผสม 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU เป็นเพราะมีดินอยู่ในส่วนผสมน้อยดินจึงละลายออกมาน้อย และซีลี้อยู่ที่มีมากในส่วนผสมเป็นตัวแทรกให้เกิดช่องว่างในดิน ความร้อนจึงกระจายเข้าสู่เนื้อดินได้สะดวก การสุกตัวจึงมีมากกว่าเมื่อดินอัดตัวกันแน่นที่อุณหภูมิการเผาเดียวกัน และเมื่อมองภาพรวมทั้ง 120 ตัวอย่าง ค่าความขุ่นของอัตราการ

เพิ่มอุณหภูมิที่ 3 และ 15 องศาเซลเซียสต่อหน้าที่ มีลักษณะแนวโน้มของเส้นกราฟความขุ่นใกล้เคียงกันหรือไม่แตกต่างกันมากนัก เป็นเพราะขนาดของดินเผาดูดซับที่เผามีขนาดเล็กมาก ทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อโครงสร้างและความแข็งแรงของดินเผาไม่มากเท่ากับชิ้นงานขนาดใหญ่

จากผลการทดลองตัวอย่างทั้ง 120 ตัวอย่าง (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก จ.) ที่มีค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU จะนำมาทดลองในการทดลองต่อไป เพราะการที่วัดความขุ่นได้สูงแสดงว่าดินเผาดูดซับดังกล่าวมีการแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ปะปนกับน้ำกลั่นหรือมีความคงรูปต่ำไม่สามารถนำมาใช้งานได้ แต่ตัวอย่างที่มีค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าลักษณะดินเผาดูดซับยังคงรูปอยู่และถือว่ามีค่าความคงรูปที่สามารถนำไปใช้งานได้ อีกประการแม้มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมจะไม่ได้ระบุค่าความขุ่นก็ตาม แต่หากปล่อยน้ำที่มีค่าความขุ่นสูงลงในแหล่งน้ำก็จะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา จึงเลือกค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU เป็นเกณฑ์ เพราะจากคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลา กำหนดค่าความขุ่นสูงสุดไม่เกิน 10 NTU (มันลิน ต้นทุลเวศม์, 2538) หากปล่อยน้ำที่มีค่าความขุ่นมากกว่า 10 NTU ก็จะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และค่าดังกล่าวยังอยู่ในช่วงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคที่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดสูงสุดที่ 5 ซิลิกาสเกลยูนิท (Silica Scale Unit) และเกณฑ์อนุโลมสูงสุดที่ 20 ซิลิกาสเกลยูนิท (ภาคผนวก ก.)

#### 4.2.2 ทดลองหาตัวอย่างที่มีค่าการดูดซับแคดเมียมสูงที่สุด

นำตัวอย่างที่มีความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU ซึ่งมีทั้งหมด 87 ตัวอย่าง จาก 120 ตัวอย่าง มาทดลองหาค่าการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยนำดินเผาดูดซับขนาด 8-30 mesh มาตัวอย่างละ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที นาน 120 นาที กับน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งในการทดลองนี้จะขอแสดงเฉพาะตัวอย่างที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์และตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด (F300) ได้ผลดังรูปที่ 4.8 ส่วนข้อมูลละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ.

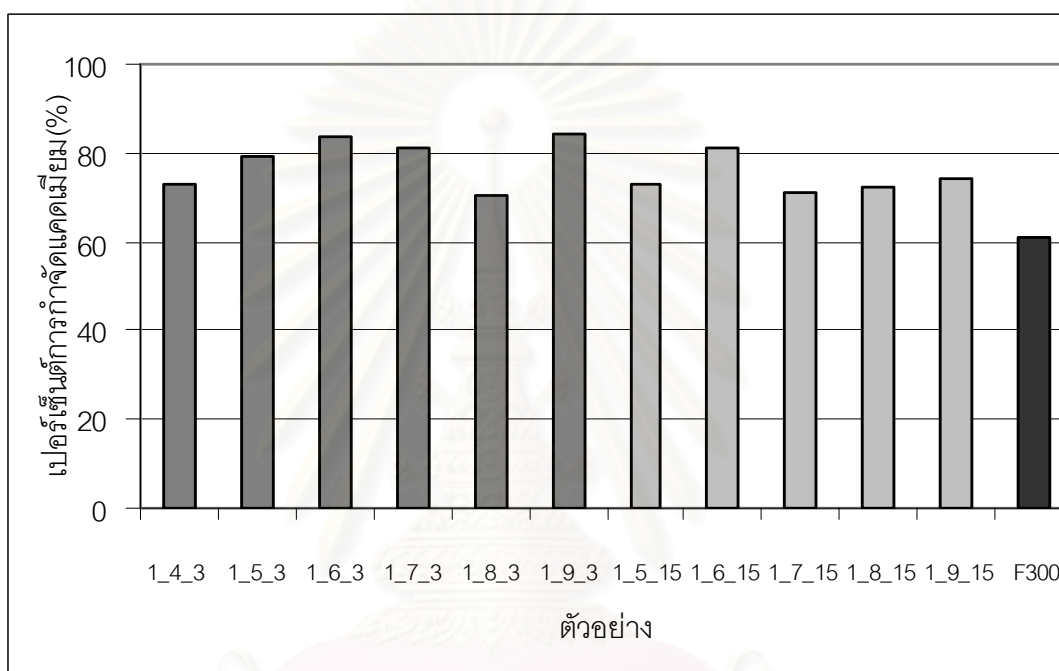


รูปที่ 4.8 ร้อยละการกำจัดแคดเมียมของดินเผาอุตสาหกรรมที่มีดินเป็นส่วนผสม 100%

จากรูปที่ 4.8 ในแนวนอน 700/3 หมายถึง อุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียส และ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที 800/3 หมายถึง อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส และ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที 900/3 หมายถึง อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส และ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที 700/15 หมายถึง อุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียส และ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที 800/15 หมายถึง อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส และ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที และ 900/15 หมายถึง อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส และ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที

ดินเผาที่ไม่มีส่วนผสมของซีเมนต์คือทำจากดินเหนียวเพียงอย่างเดียว แต่ก็สามารถกำจัดแคดเมียมได้ ที่อุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที สามารถกำจัดแคดเมียมได้ถึงร้อยละ 50.55 และที่อุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที ก็สามารถกำจัดแคดเมียมได้ถึงร้อยละ 50.15 ซึ่งใกล้เคียงกัน และหากเพิ่มอุณหภูมิการเผาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 และ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที สามารถกำจัดแคดเมียมได้ประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น ที่เป็นเช่นนั้น

เพราะที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ดินสุกตัว เนื้อดินจะมีความแข็งแรงมากแต่ความพรุนจะน้อยและค่าประจุลบที่ผิวก็ลดลง ทำให้กำจัดแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ซึ่งมีประจุเป็นบวก 2 ได้น้อย ส่วนการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเนื้อดินยังไม่สุกตัวมากมีความพรุนตัวสูงกว่า และยังมีประจุลบที่ผิวอยู่สูงจึงกำจัดแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ซึ่งมีประจุเป็นบวก 2 ได้มากกว่า และเมื่อพิจารณาเฉพาะดินเผาดูดซับที่มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างดินเผาดูดซับที่มีอัตราการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด (F300)

จากรูปที่ 4.9 ตัวเลขกำกับชุดข้อมูล 11 ชุดแรกในแนวแกนอธิบายดังนี้ 1\_4\_3 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที 1\_5\_3 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที 1\_6\_3 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที 1\_7\_3 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที 1\_8\_3 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อ

นาที่ 1\_9\_3 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที 1\_5\_15 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที 1\_6\_15 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที 1\_7\_15 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที 1\_8\_15 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที 1\_9\_15 หมายถึง มีดินเป็นส่วนผสม 10% ซี้เลื่อย 90% เเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที และ F300 หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก จ.)

ตัวอย่างที่มีร้อยละการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ทั้งหมด 11 ตัวอย่าง ซึ่งทั้งหมดเป็นตัวอย่างที่มีอัตราส่วนดินต่อซี้เลื่อยเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ ในทุกช่วงอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าซี้เลื่อยที่ใส่เข้าไปในปริมาณที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมของดินเผาดูดซับ แต่ดินเผาที่มีผลต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เช่นกัน โดยดูได้จากดินเผาดูดซับที่มีอัตราส่วนดินต่อซี้เลื่อยเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 0 เปอร์เซ็นต์ หรือเป็นดิน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิการเผา 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้อุณหภูมิ 3 และ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที ให้ค่าการกำจัดแคดเมียมร้อยละ 50.55 และ 50.15 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะหว่าง 3 และ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที ที่อัตราส่วนดินต่อซี้เลื่อยเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ และ อุณหภูมิการเผาต่างๆ เห็นว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาทีมีแนวโน้มมากกว่าที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาที เป็นเพราะการเผาที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที ใช้เวลาในการเผา 3 ชั่วโมง 40 นาที (เวลาที่ได้จากเตาเผา) ส่วนการเผาที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสต่ออนาทีใช้เวลาในการเผา 1 ชั่วโมง 07 นาที(เวลาที่ได้จากเตาเผา) ซึ่งการเผาที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที ใช้เวลาในการเผามากกว่าถึง 2 ชั่วโมง 33 นาที การเผาที่ใช้เวลานานทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างช้าๆและสมบูรณ์ เกิดการเผาไหม้อย่างทั่วถึงทุกๆจุด สิ่งเจือปนที่อยู่ในเนื้อไม้เช่น ยางไม้ น้ำมัน ถูกกำจัดออกไปได้มากกว่าจึงเกิดรูพรุนมากกว่า ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินเผาดูดซับทุกๆตัวที่แสดงในรูปที่ 4.9 กับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด(F300) เห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดมีค่าร้อยละการกำจัดแคดเมียมเพียงร้อยละ 60.9 เท่านั้นซึ่งน้อยกว่าดินเผาดูดซับทุกๆตัว และมีค่าน้อยกว่าดินเผาดูดซับที่



อัตราส่วนดินต่อซีลี้อยเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที อยู่ถึง 23.05 เปอร์เซ็นต์

การเลือกศึกษาดินเผาดูดซับเพียงสูตรเดียวที่ดีที่สุดจากการทดลองนี้ ในเบื้องต้นจะเลือกตัวอย่างที่มีร้อยละการกำจัดแคดเมียมสูงที่สุด ซึ่งก็คือตัวอย่างที่อัตราส่วนดินต่อซีลี้อยเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม 84.35 เปอร์เซ็นต์ แต่จะเห็นว่าตัวอย่างที่อัตราส่วนดินต่อซีลี้อยเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม 83.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีร้อยละการกำจัดแคดเมียมใกล้เคียงกันมาก ต่างกันเพียง 0.40 เปอร์เซ็นต์ แต่เผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าถึง 200 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเลือกดินเผาดูดซับที่อัตราส่วนดินต่อซีลี้อยเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพราะจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมสูงถึง 83.95 เปอร์เซ็นต์ แต่ใช้พลังงานในการเผาต่ำ ทำให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยต่ำแต่ได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

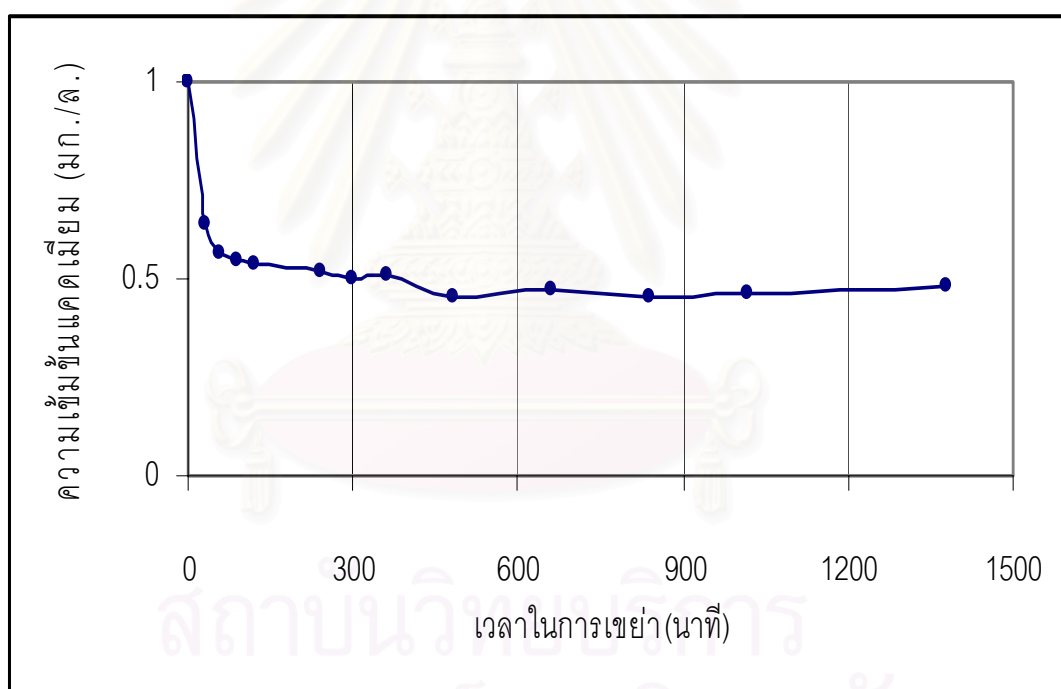


รูปที่ 4.10 ดินเผาดูดซับก่อนเผาและหลังการเผา

### 4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนแคดเมียม ( $\text{Cd}^{2+}$ ) ของดินเผาดูดซับที่ผลิตได้

#### 4.3.1 การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุล

การทดลองหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลของดินเผาดูดซับ ใช้ตัวอย่างที่ได้จากการทดลองที่ 4.2 โดยมีอัตราส่วนดินต่อซีลี้อยู่เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส เผานาน 30 นาที นำตัวอย่างที่ได้มา บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh ปริมาณ 0.25 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลาย แคดเมียม 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ที่เวลาในการเขย่า ต่างๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เวลาในการเข้าสู่สมดุลของดินเผาดูดซับ

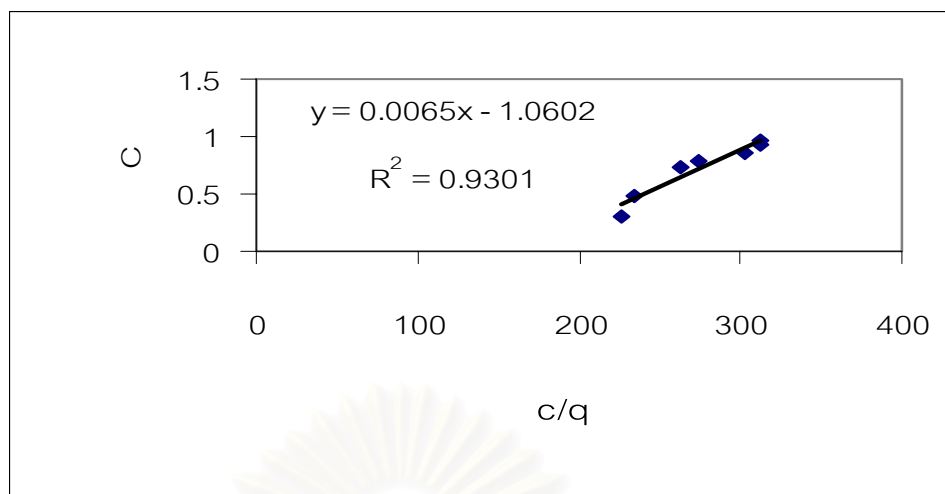
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าความเข้มข้นแคดเมียมลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 120 นาทีแรก โดยดูที่ความชันของกราฟ ซึ่งเป็นเวลาที่สอดคล้องกับที่ใช้ในการหาไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐาน ASTM(D3860-89a) แต่เพื่อให้แน่ใจว่าระบบเข้าสู่สมดุลจริงๆ จึงใช้เวลา 480 นาที

เพราะ ที่เวลา 480 นาที ถึงเวลา 1,380 นาที กราฟจะค่อนข้างคงที่ไม่มี การลดลงอีก ซึ่งให้เห็นว่า ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลจริงๆหรือเกิดสมดุลการดูดติดผิว (adsorption equilibrium) คือดินเผาดูดซับมีอัตราการคายของแคดเมียมเท่ากับอัตราการดูดติดผิว ที่เวลา 480 นาที หรือ 8 ชั่วโมง จึงจะใช้เวลาดังกล่าวในการศึกษาหาไอโซเทอมของการดูดติดผิวในการทดลองต่อไป (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก จ.)

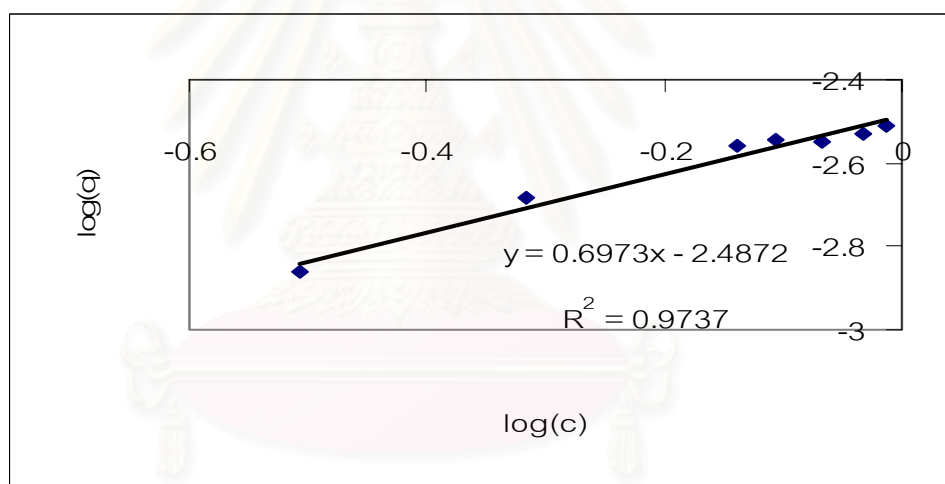
#### 4.3.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของดินเผาดูดซับ

ในการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับของดินเผาดูดซับที่ผลิตได้ (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก จ.) จะใช้ตัวอย่างที่ได้จากการทดลองที่ 4.2 โดยมีอัตราส่วนดินต่อซีลี้อยู่เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 90 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส เผานาน 30 นาที นำตัวอย่างที่ได้มาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh ปริมาณ 0.001, 0.0025, 0.005, 0.0075, 0.01, 0.025 และ 0.05 กรัม (ASTM : D 3860-89a) ใส่ในขวดโพลีเอทิลีน (PE) ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายแคดเมียม 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที นานเท่ากับเวลาที่ได้จากการทดลองที่ 4.3.1 คือ 8 ชั่วโมง

ไอโซเทอมการดูดซับมีอยู่หลายสมการ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 3 สมการ คือ Langmuir, BET และ Freundlich แต่สำหรับการดูดซับด้วยถ่านมักจะนิยมใช้สมการของ Langmuir และ Freundlich ในการทดลองนี้จะเลือกใช้สมการของ Freundlich มาอธิบาย เนื่องจากการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นต่ำ และจากการค้นคว้างานวิจัยต่างๆเกี่ยวกับการใช้ถ่านเป็นตัวดูดซับ นิยมใช้สมการของ Freundlich มาอธิบาย แต่เพื่อให้แน่ใจจึงได้นำข้อมูลที่ 'ได้จากการทดลองการดูดติดผิวที่ค่าพีเอช 8 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่ไม่มีการตกตะกอนของแคดเมียม เป็นค่าที่ไม่ต่ำเกินไปและไม่สูงเกินไปของช่วงพีเอชที่นำไปใช้จริง (6,7,8, และ 9) และเป็นค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองกับถังดูดติดผิวแบบแท่งต่อไป นำข้อมูลจากการทดลองที่ค่าพีเอช 8 มาเขียนกราฟเพื่อหาค่า  $R^2$  ของแต่ละสมการได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 ค่า  $R^2$  ของสมการ Langmuir Isotherm



รูปที่ 4.13 ค่า  $R^2$  ของสมการ Freundlich Isotherm

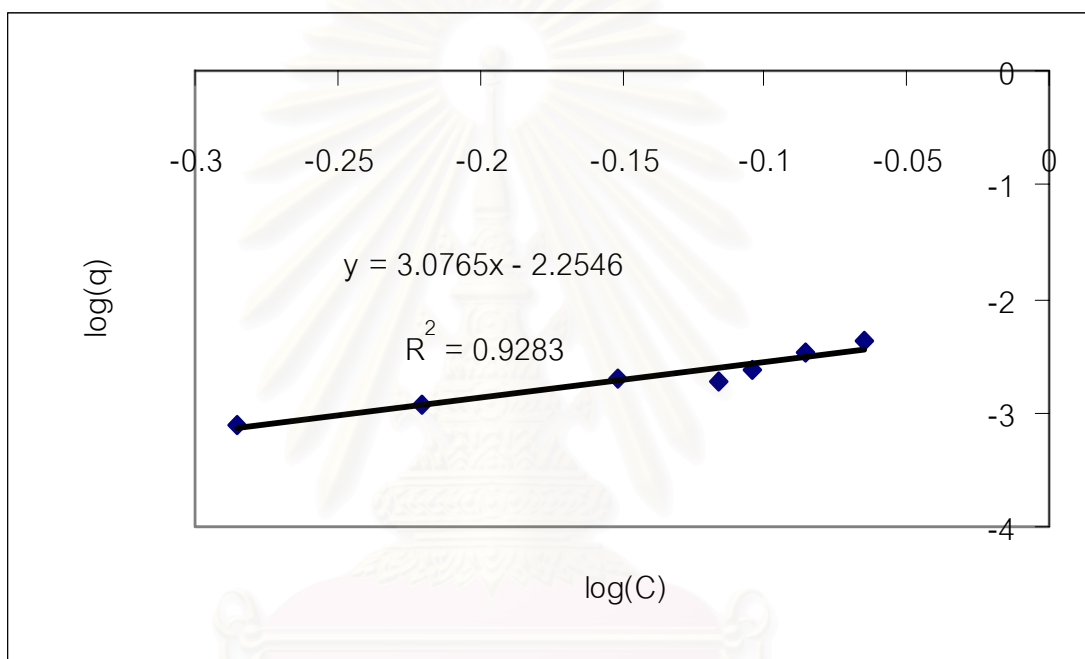
จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 สมการ Langmuir Isotherm มีค่า  $R^2 = 0.9301$  สมการ Freundlich Isotherm มีค่า  $R^2 = 0.9737$

ซึ่งสมการ Freundlich Isotherm มีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกสมการ Freundlich Isotherm เพื่อใช้อธิบายผลการทดลองที่ค่าพีเอชอื่นๆต่อไป

การศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับ จะทำการศึกษาแยกย่อยในหลายๆ ช่วงพีเอชดังนี้

#### 4.3.2.1 ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช

ในการทดลองนี้จะศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับ ในน้ำเสียสังเคราะห์ แคลเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ไม่ต้องใส่สารเคมีใดๆเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการปรับค่าพีเอช โดยมีแต่แคลเมียมและน้ำกลั่นเท่านั้นและเมื่อเตรียมสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว ค่าพีเอชที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 3.28 และผลการศึกษาได้ผลดัง รูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาดูดซับที่พีเอช 3.28

จากสมการของ Freundlich  $q = K_F C^{1/n}$

จากรูปที่ 4.14 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ  $1/n = 3.0765$

จุดตัดแกน  $\log(q)$  เท่ากับ  $\log(K_F) = -2.2546$

$$K_F = 0.005564$$

$$q = 0.005564 C^{3.0765}$$

โดยที่ :  $q$  = ปริมาณแคลเมียมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ(กรัม/กรัม)

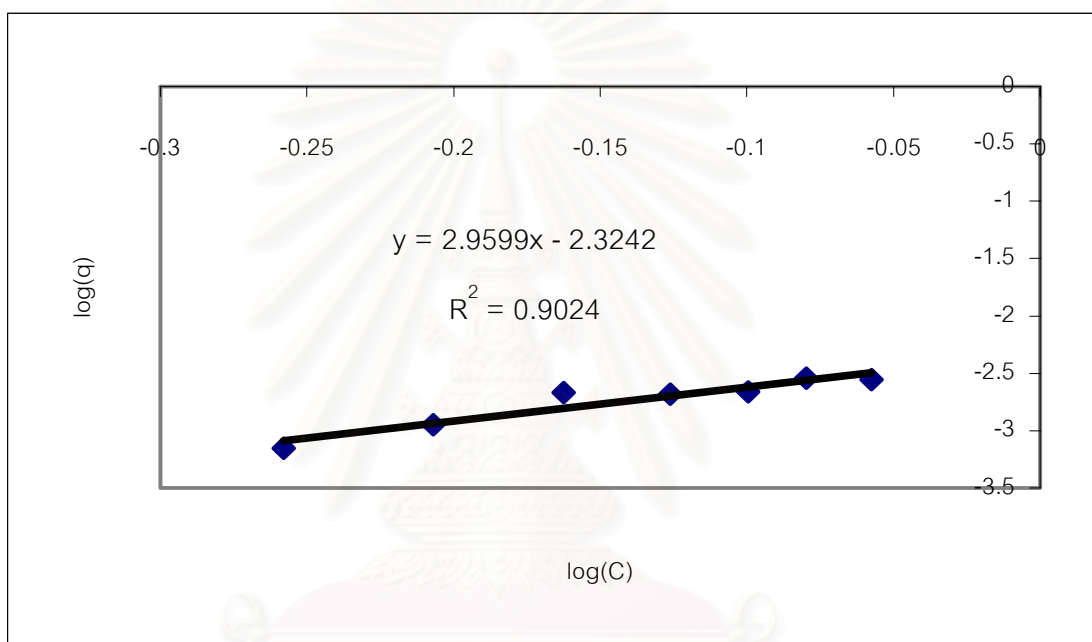
$C$  = ความเข้มข้นแคลเมียม(มิลลิกรัม/ลิตร)

$K_F$  = ค่าคงที่(จุดตัดแกนแนวตั้ง)

$1/n$  = ค่าคงที่(ความชันของกราฟ)

#### 4.3.2.2 ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช

ในการทดลองนี้จะศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์(F300) ที่มีขายตามท้องตลาด ในน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ไม่ต้องใส่สารเคมีใดๆ เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการปรับค่าพีเอช โดยมีแคดเมียมและน้ำกลั่นเท่านั้นและเมื่อเตรียมสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว ค่าพีเอชที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 3.28 และผลการศึกษาได้ผลดัง รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด(F300) ที่พีเอช 3.28

จากสมการของ Freundlich  $q = K_F C^{1/n}$

จากรูปที่ 4.15 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ  $1/n = 2.9599$

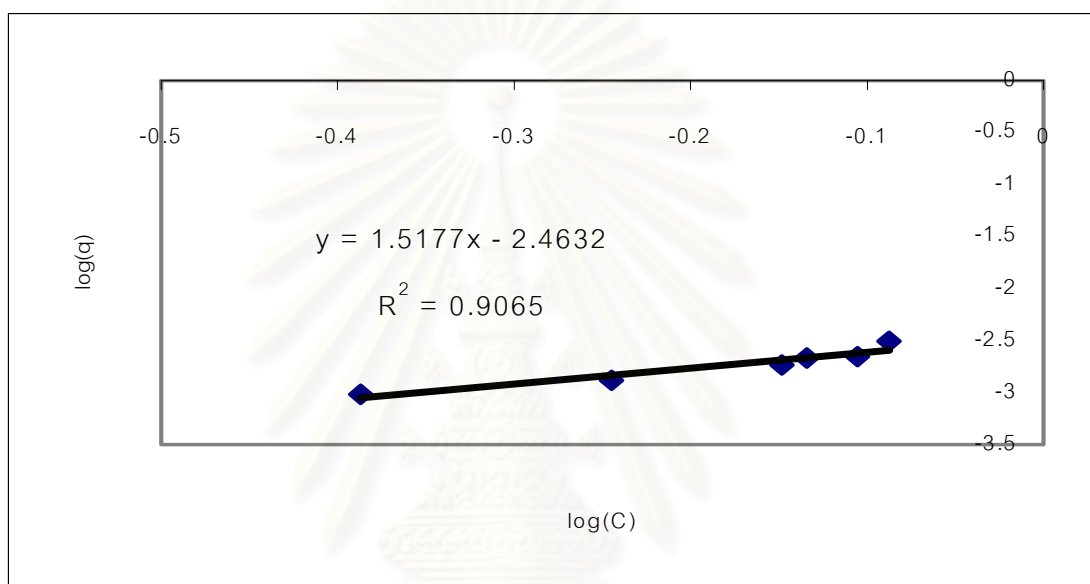
จุดตัดแกน  $\log(q)$  เท่ากับ  $\log(K_F) = -2.3242$

$$K_F = 0.004740$$

$$q = 0.004740 C^{2.9599}$$

#### 4.3.2.3 ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับที่พีเอช 6

ในการทดลองนี้จะศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับ ในน้ำเสียสังเคราะห์ แคลเซียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช ให้เท่ากับ 6 และใช้กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่าพีเอชให้เท่ากับ 6 ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาได้ผลดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาดูดซับที่พีเอช 6

จากสมการของ Freundlich

$$q = K_F C^{1/n}$$

จากรูปที่ 4.16 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ  $1/n = 1.5177$

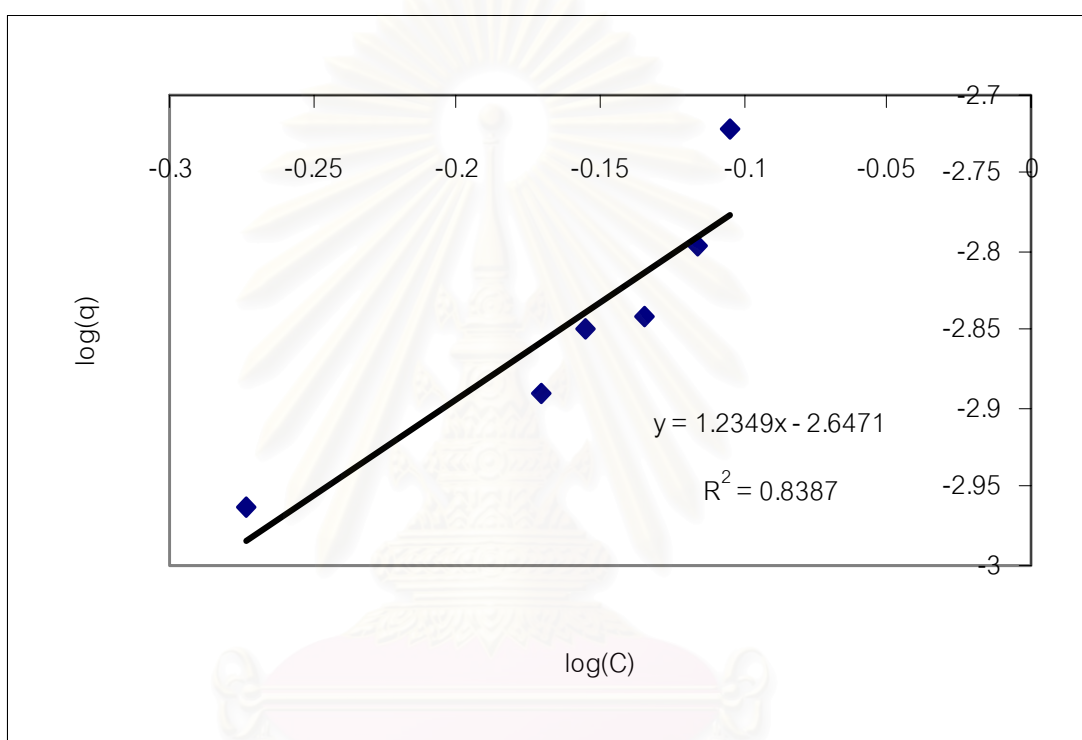
จุดตัดแกน  $\log(q)$  เท่ากับ  $\log(K_F) = -2.4632$

$$K_F = 0.003442$$

$$q = 0.000344 C^{1.5177}$$

#### 4.3.2.4 ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับที่พีเอช 7

ในการทดลองนี้จะศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับ ในน้ำเสียสังเคราะห์ แคลเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช ให้เท่ากับ 7 และใช้กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่าพีเอชให้เท่ากับ 7 ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาได้ผลดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาดูดซับที่พีเอช 7

จากสมการของ Freundlich

$$q = K_F C^{1/n}$$

จากรูปที่ 4.17 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ  $1/n = 1.2349$

จุดตัดแกน  $\log(q)$  เท่ากับ  $\log(K_F) = -2.6471$

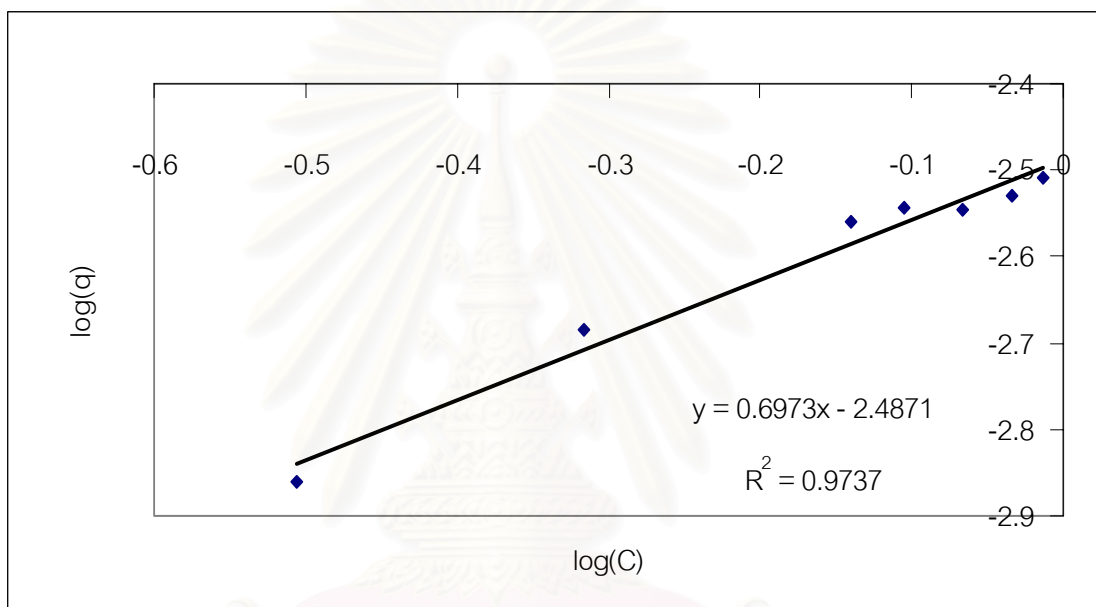
$$K_F = 0.002254$$

$$q = 0.002254 C^{1.2349}$$



#### 4.3.2.5 ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับที่พีเอช 8

ในการทดลองนี้จะศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับ ในน้ำเสียสังเคราะห์ แคลเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช ให้เท่ากับ 8 และใช้กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่าพีเอชให้เท่ากับ 8 ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาได้ผลดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาดูดซับที่พีเอช 8

จากสมการของ Freundlich  $q = K_F C^{1/n}$

จากรูปที่ 4.18 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ  $1/n = 0.6973$

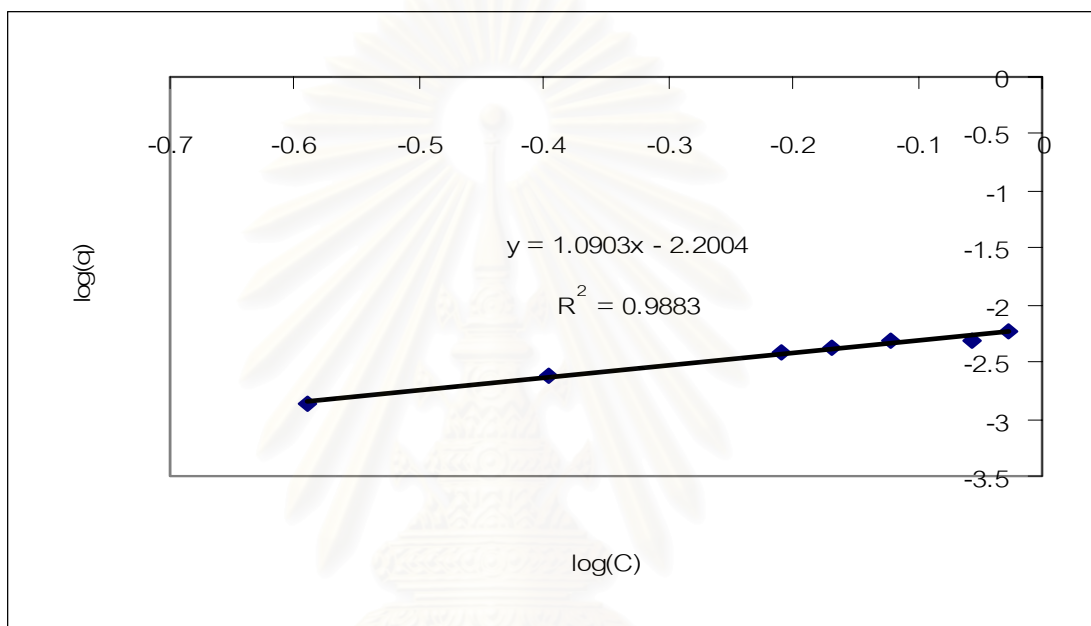
จุดตัดแกน  $\log(q)$  เท่ากับ  $\log(K_F) = -2.4871$

$$K_F = 0.003257$$

$$q = 0.003257 C^{0.6973}$$

#### 4.3.2.6 ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับที่พีเอช 9

ในการทดลองนี้จะศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับ ในน้ำเสียสังเคราะห์ แคลเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการปรับค่าพีเอช ให้เท่ากับ 9 และใช้กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่าพีเอชให้เท่ากับ 9 ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาได้ผลดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ไอโซเทอมแบบฟรุนดริชของดินเผาดูดซับที่พีเอช 9

จากสมการของ Freundlich

$$q = K_F C^{1/n}$$

จากรูปที่ 4.19 ความลาดของเส้นตรงเท่ากับ  $1/n = 1.0903$

จุดตัดแกน  $\log(q)$  เท่ากับ  $\log(K_F) = -2.2004$

$$K_F = 0.006304$$

$$q = 0.006304 C^{1.0903}$$

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับได้สูงสุดต่อปริมาณสารดูดซับ ( $q_{max}$ ) ของ ถ่านกัมมันต์และดินเผาดูดซับที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

สารดูดซับ	pH	ความเข้มข้นcd หลังตกตะกอน, $C_0$ (มก./ลิตร)	$K_F$	$1/n$	$R^2$	$q_{max}$ ที่ $C=C_0$ (มก.Cd <sup>2+</sup> / กรัม สารดูดซับ)
ถ่านกัมมันต์	3.28	0.904	0.004740	2.9599	0.9024	3.516
ดินเผาดูดซับ	3.28	0.904	0.005564	3.0765	0.9283	4.079
ดินเผาดูดซับ	6	0.895	0.003442	1.5177	0.9065	2.909
ดินเผาดูดซับ	7	0.805	0.002254	1.2349	0.8387	1.724
ดินเผาดูดซับ	8	1.000	0.003257	0.6973	0.9737	3.257
ดินเผาดูดซับ	9	1.000	0.006304	1.0903	0.9883	6.304

จากตารางที่ 4.2 เมื่อนำค่าคงที่  $K_F$  และ  $1/n$  มาเข้าสมการของ Freundlich  $q = K_F C^{1/n}$  ที่ค่า  $C = C_0$  โดยที่  $C_0$  คือความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองหักลบกับค่าที่แคดเมียมตกตะกอน จะได้ค่า  $q_{max}$  มีหน่วยเป็นกรัมแคดเมียมที่ถูกดูดซับต่อกรัมสารดูดซับ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินเผาดูดซับที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด โดยศึกษาในกรณีที่ไม่มีการปรับค่าพีเอชและสภาวะในการทดลองต่างๆเหมือนกัน จะเห็นว่าดินเผาดูดซับมีค่า  $q_{max}$  เท่ากับ 4.079 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมสารดูดซับ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดมีค่า  $q_{max}$  เท่ากับ 3.516 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมสารดูดซับ แสดงให้เห็นว่าดินเผาดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด โดยดินเผาดูดซับ 1 กรัมสามารถดูดซับแคดเมียมได้ 4.079 มิลลิกรัมกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด 1 กรัมสามารถดูดซับแคดเมียมได้ 3.516 มิลลิกรัมกรัม ที่ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าประมาณ 0.904 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่าประมาณร้อยละ 13.8 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองที่ 4.2 ที่ดินเผาดูดซับกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 83.95 มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดซึ่งกำจัดแคดเมียมได้เพียงร้อยละ 60.9

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของดินเผาดูดซับที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เห็นว่า ที่ค่าพีเอชที่เป็นต่างคือที่พีเอช 8 และ 9 จะมีค่า  $q_{max}$  สูงกว่าที่ค่าพีเอช 6 และ 7 ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน( $H_3O^+$ ) เนื่องจากที่ค่า pH ต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออน( $H_3O^+$ ) มากกว่าที่ค่า pH สูง ๆ ถ้าสารละลายแคดเมียมมีค่า pH ต่ำ ๆ

จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแก่งแย่งกันที่จะดูดซับไอออน แคลเซียมในสารละลายกับไฮโดรเนียมไอออน ซึ่งเป็นไอออนบวกเหมือนกัน และจะได้ผลในทางตรงกันข้ามกับเมื่อเป็นการดูดซับในสารละลายที่มีค่า pH สูง ๆ นอกจากนั้นค่า pH ที่มากขึ้นยังมีผลทำให้การเคลื่อนที่หรือเคลื่อนไหวของแคลเซียมทำได้น้อยลง ส่งผลให้เมื่อแคลเซียมเข้าไปในโพรงของดินเผาและไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้การดูดซับทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกประการในสิ่งแวดล้อมที่เป็นด่าง  $H^+$  ซึ่งเกาะอยู่กับออกซิเจน (O) บนผิวของอนุภาคดินเผาดูดซับทำปฏิกิริยากับ  $OH^-$  ของด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อ  $H^+$  หลุดออกทำให้เกิดประจุลบบนอนุภาคดินเผาดูดซับมากขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) เมื่อมีประจุลบมากก็สามารถดูดยึดแคลเซียมซึ่งเป็นประจุบวกได้มากขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 การเกิดประจุลบบนผิวของดินเผาดูดซับในสารละลายต่าง

จากเหตุผลข้างต้น เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่พีเอช 6 และ 7 ที่พีเอช 7 น่าจะมีค่า  $q_{max}$  สูงกว่าที่พีเอช 6 แต่ผลกลับเป็นตรงกันข้าม ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่พีเอช 7 แคลเซียมตกตะกอนไปถึง 19.5 % ซึ่งมากกว่าที่พีเอช 6 ตะกอนเหล่านี้จะไปรบกวนหรือแทนที่การถูกดูดซับของไอออนแคลเซียม เมื่อดินเผาดูดซับดูดซับตะกอนเหล่านี้ไว้ ทำให้พื้นที่ในการดูดซับลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนแคลเซียมลดลง และเมื่อแคลเซียมตกตะกอนไปทำให้ไอออนแคลเซียมในน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำลงเหลือเพียง 0.805 มก./ลิตร โอกาสที่ไอออนแคลเซียมจะสัมผัสกับดินเผาดูดซับก็ลดลงส่งผลให้ค่า  $q_{max}$  ลดลง ซึ่งในการคำนวณค่า  $q_{max}$  จะไม่นำค่าที่ไอออนแคลเซียมลดลงโดยการตกตะกอนมารวมด้วย ทำให้ค่า  $q_{max}$  ที่คำนวณได้มีค่าต่ำ

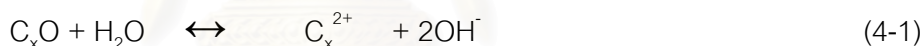
ส่วนที่ค่าพีเอช 3.28 มีค่า  $q_{max}$  สูงกว่าที่ค่าพีเอช 6, 7 และ 8 เป็นเพราะที่ค่าพีเอช 3.28 ไม่มีการปรับพีเอช จึงไม่ต้องใส่สารละลายกรด เบส และบัฟเฟอร์ ( $H_3PO_4$ ) มีแต่น้ำกลั่นและสารละลายแคลเซียมเท่านั้นทำให้ไม่มีตัวรบกวนการดูดซับมากนัก เพราะสารละลายกรด เบส และบัฟเฟอร์ ( $H_3PO_4$ ) อาจไปแทรกในโพรงของดินเผาทำให้พื้นที่ในการดูดซับแคลเซียมเหลือน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแคลเซียมลดลง

หากพิจารณาว่าช่วงพีเอชใดเหมาะสมกับการดูดซับแคลเซียม ที่ความเข้มข้นประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มากที่สุด จะพิจารณาจากค่า  $q_{max}$  ทุก ๆ ค่าพีเอชดังนี้

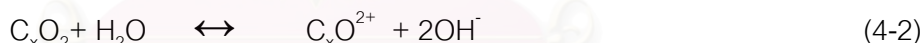
ที่ค่าพีเอช 3.28	จะได้ค่า $q_{max}$	เท่ากับ	4.1	มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมดินเผาดูดซับ
ที่ค่าพีเอช 6.00	จะได้ค่า $q_{max}$	เท่ากับ	2.9	มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมดินเผาดูดซับ
ที่ค่าพีเอช 7.00	จะได้ค่า $q_{max}$	เท่ากับ	1.7	มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมดินเผาดูดซับ
ที่ค่าพีเอช 8.00	จะได้ค่า $q_{max}$	เท่ากับ	3.3	มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมดินเผาดูดซับ
ที่ค่าพีเอช 9.00	จะได้ค่า $q_{max}$	เท่ากับ	6.3	มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมดินเผาดูดซับ

เห็นได้ว่าการดูดซับสารละลายแคดเมียมเข้มข้นประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 9 ดินเผาดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดคือ ดินเผาดูดซับ 1 กรัม สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 6.3 มิลลิกรัม

จากการทดลองศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์และดินเผาดูดซับที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช พบว่าเมื่อใส่ตัวดูดซับ 0.05 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ค่าพีเอชหลังเขย่ามีค่าสูงขึ้นโดยเฉพาะถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 3.38 ส่วนดินเผาดูดซับมีค่าเท่ากับ 3.32 (ภาคผนวก จ.) ที่เป็นเช่นนี้เพราะบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีกลุ่มฟังก์ชันนัลที่อยู่ในรูปของ  $C_xO$  และ  $C_xO_2$  เมื่อสัมผัสกับน้ำในสารละลายที่สภาวะเป็นกลางหรือสภาวะเป็นกรด กลุ่มฟังก์ชันนัลบนผิวของถ่านกัมมันต์เหล่านี้จะออกซิไดซ์โมเลกุลของน้ำที่อยู่รอบๆถ่านกัมมันต์ ดังสมการที่ 4-1 และ 4-2



หรือ



ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและกลุ่มฟังก์ชันนัลบนผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดไฮดรอกซิลอิออน ( $OH^-$ ) ขึ้น เป็นผลให้พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น

#### 4.4 การศึกษาการชะไอออนแคดเมียมของดินเผาดูดซับด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น

การศึกษาการชะไอออนแคดเมียมจะทำโดยนำดินเผาดูดซับ 1 กรัม ขนาด 8 - 30 mesh มาดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์คือสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 3.28 แคดเมียมตกตะกอนไป 0.096 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือแคดเมียม 0.904 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่ 150 รอบต่อนาที นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.017 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 6.20 แสดงว่าดินเผาดูดซับ 1 กรัม ดูดซับแคดเมียมไป 0.0887 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 98.12

นำดินเผาดูดซับดังกล่าวข้างต้นที่ดูดซับแคดเมียมแล้ว มาศึกษาการชะไอออนแคดเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 โดยสารละลายกรดดังกล่าวมีส่วนผสมของ  $H_2SO_4$  0.02 โมลต่อลิตร  $H_3PO_4$  0.01 โมลต่อลิตร ปรับพีเอชจนได้ 5 ด้วย NaOH ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การชะไอออนแคดเมียมด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดพีเอช 5

ชะด้วยน้ำกลั่น				ชะด้วยสารละลายกรดพีเอช 5			
เวลาในการเขย่า (ชั่วโมง)	พีเอชหลังเขย่า	$Cd^{2+}$ ที่ถูกชะ (มก./ล.)	$Cd^{2+}$ ที่ถูกชะ (%)	เวลาในการเขย่า (ชั่วโมง)	พีเอชหลังเขย่า	$Cd^{2+}$ ที่ถูกชะ (มก./ล.)	$Cd^{2+}$ ที่ถูกชะ (%)
0.25	5.57	0.000	0	0.25	5.00	0.000	0.000
0.5	5.60	0.000	0	0.5	5.00	0.000	0.000
1	5.62	0.000	0	1	5.00	0.000	0.000
1.5	5.57	0.000	0	1.5	5.00	0.008	0.902
2	5.54	0.000	0	2	5.00	0.015	1.691
4	5.20	0.000	0	4	5.00	0.016	1.804
8	5.19	0.000	0	8	5.00	0.017	1.917
12	5.15	0.000	0	12	5.00	0.020	2.255
24	5.21	0.000	0	24	5.00	0.024	2.706

จากตารางที่ 4.3 เมื่อชะด้วยน้ำกลั่น วัดความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำชะได้เท่ากับ 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอด 24 ชั่วโมง แสดงว่าไม่มีการละลายของแคดเมียมออกจากดินเผาดูดซับเมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวชะละลาย หรือกล่าวได้ว่าเกิดการดูดซับอย่างมั่นคงและแข็งแรง ส่วนการชะด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 ซึ่งมีส่วนผสมของ  $H_2SO_4$  0.02 โมลต่อลิตร แคดเมียมจะเริ่มถูกชะออกมาเมื่อเวลาในการชะผ่านไป 1 ชั่วโมง 30 นาที และจะถูกชะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงเวลาในการชะ 24 ชั่วโมง แคดเมียมจะถูกชะออกมา 0.024 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 2.706 เหตุที่  $Cd^{2+}$  ถูกชะออกด้วยสารละลายกรดเพราะในสารละลายกรดมี  $H^+$  ซึ่งสามารถเข้าไปแทนที่หรือไล่ที่  $Cd^{2+}$  ที่เกาะอยู่ที่ผิวของดินเผาดูดซับให้หลุดออก และ  $SO_4^{2-}$  ซึ่งมีประจุลบ 2 ก็ไปดึงจับแคดเมียมซึ่งมีประจุบวก 2 ได้ดังสมการที่ 4-3



ซึ่งแรงของปฏิกิริยาดังกล่าวมีค่ามากกว่าแรงที่ดินเผาดูดซับกระทำกับแคดเมียม และมากพอที่จะดึงแคดเมียมออกมาได้บางส่วน ถือว่าแคดเมียมถูกชะออกมาได้น้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะการดูดซับของดินเผาดูดซับมีทั้งการดูดซับทางกายภาพ(Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ซึ่งการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปมาระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับพื้นผิวของสารดูดซับ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นมา และจะมีการหลุดออก(Desorption) เกิดขึ้นน้อยมาก

ด้วยเหตุนี้หากนำไปใช้งานจริง เมื่อใช้ดินเผาดูดซับจนหมดสภาพแล้วไม่ควรนำมากองทิ้งไว้ เพราะหากโดนน้ำฝนที่มีกรด  $H_2SO_4$  หรือที่เรียกว่าฝนกรด(พีเอชน้อยกว่า5)ชะ แคดเมียมก็จะถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อม จึงควรเก็บใส่ภาชนะที่กันน้ำ แข็งแรงและนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธีต่อไป และจากปริมาณที่แคดเมียมถูกชะออกมา มีปริมาณน้อยเกินไปที่จะนำมาชะด้วยสารละลายกรดดังกล่าวแล้วนำไปใช้ใหม่

#### 4.5 การศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง

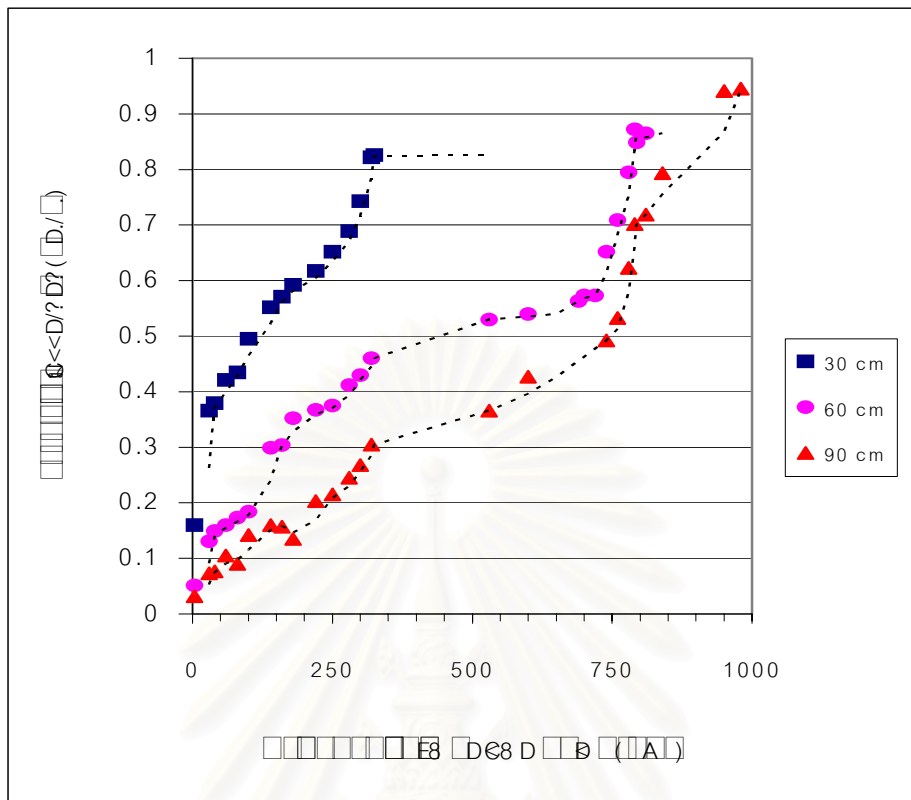
การศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง ได้ทำการศึกษาที่ค่าพีเอชที่ไม่ทำให้แคดเมียมตกตะกอน(จากการทดลองแบบเท) ซึ่งก็มี 2 ค่าคือ พีเอช 8 และ 9 แต่ที่พีเอช 8 มีค่า  $q_{max}$  ใกล้เคียงที่ค่าพีเอช 6 และ 7 จึงน่าจะเป็นตัวแทนของค่าพีเอชดังกล่าวได้ดีกว่าที่ค่าพีเอช 9 และที่ค่าพีเอช 8 สิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับพีเอชน้อยกว่า ส่วนที่ค่าพีเอช 9 เมื่อใส่ดินเผาดูดซับมากขึ้นในการทดลองแบบเท ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงแต่ก็ไม่มากก็ตามแต่ก็ถือว่าไม่คงที่ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลองที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 8

การออกแบบระบบคอลัมน์จำลองนี้ ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 2.42 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร มีปริมาตรระบอบก 407 มิลลิลิตร ใส่ดินเผาดูดซับปริมาณ 70 กรัม เต็มพอดีที่ 90 เซนติเมตร มีจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ความลึกชั้นดินเผาดูดซับ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร น้ำเสียสังเคราะห์ไหลจากบนลงล่างความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าภาระถึง(Column Loading Rate) 0.133 ลบ.ม./(ตร.ม.นาที) ท่วมชั้นดินเผาดูดซับตลอดเวลาและเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ปริมาณน้ำทิ้งต่างๆที่ตำแหน่ง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร จนถึงจุดหมดสภาพ(Breakthrough) คือความเข้มข้นแคดเมียมที่เข้าเท่ากับ ความเข้มข้นแคดเมียมที่ออก การเก็บตัวอย่างทุกครั้งจะกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 ของ Whatman ก่อนนำไปปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 และนำไปวัดความเข้มข้นแคดเมียมต่อไป อุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.22



สถิตยวิทย์บริการ  
รูปที่ 4.21 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคอดัมน้ำจาลอง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.22 ปริมาณน้ำเสียที่จุดหมดสภาพของดินเผาดูดซับในคอลัมน์ที่ระยะ 30, 60 และ 90 ซม.

จากรูปที่ 4.22 น้ำเสียไหลจากบนลงล่างแสดงให้เห็นว่าดินเผาดูดซับจะหมดสภาพจากส่วนบนก่อน จากนั้นค่อยๆหมดจนถึงส่วนกลางและถึงส่วนล่างของคอลัมน์ในที่สุด จุดสูงสุดของเส้นกราฟคือจุดที่ความเข้มข้นน้ำเสียเข้าเท่ากับความเข้มข้นน้ำเสียออก ( $C/C_0 = 1$ ) หรือจุดหมดสภาพของดินเผาดูดซับ

จุดหมดสภาพที่ 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 325 ลิตร หรือคิดเป็น 2395.9 Bed Volume (BV) ความเข้มข้นแคดเมียมเท่ากับ 0.826 มิลลิกรัมต่อลิตร

จุดหมดสภาพที่ 60 เซนติเมตร อยู่ที่ 810 ลิตร หรือคิดเป็น 2985.7 BV ความเข้มข้นแคดเมียมเท่ากับ 0.865 มิลลิกรัมต่อลิตร

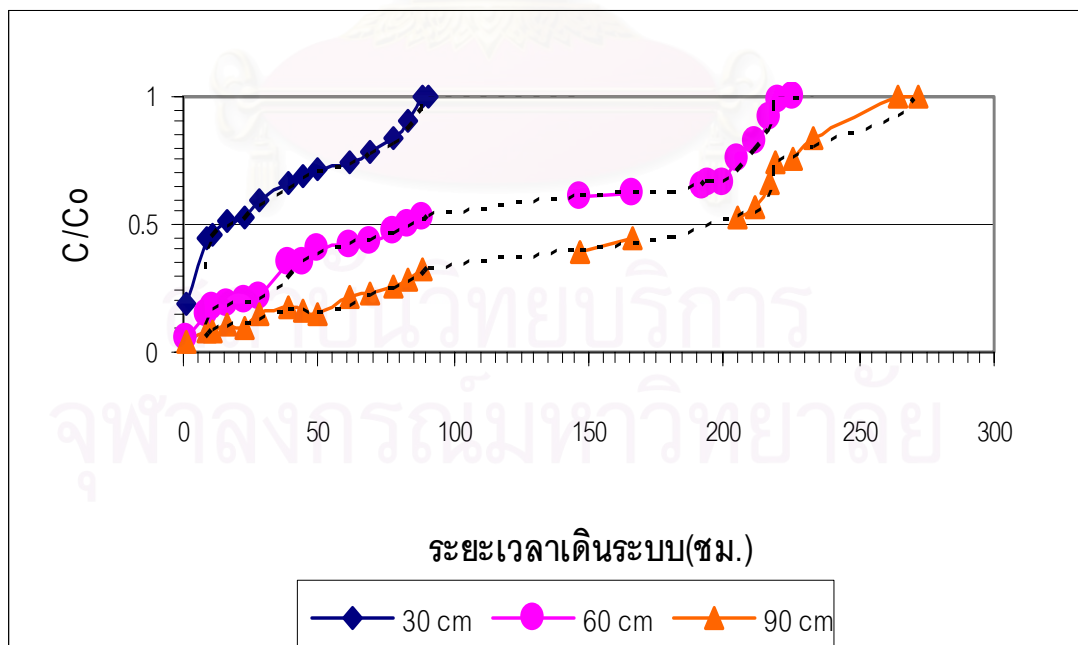
จุดหมดสภาพที่ 90 เซนติเมตร อยู่ที่ 980 ลิตร หรือคิดเป็น 2408.2 BV ความเข้มข้นแคดเมียมเท่ากับ 0.945 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย Bed Volume (BV) คือ มีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ผ่านการบำบัดต่อปริมาตรของชั้นดินเผาดูดซับในคอลัมน์ (ข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก จ.)

ที่มีค่าความเข้มข้นแคดเมียมไม่เท่ากันและไม่เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้ง 3 จุด เพราะน้ำที่นำมาผสมทำน้ำเสียสังเคราะห์มีคุณภาพไม่เท่าน้ำบริสุทธิ์ โดยได้มาจากเครื่องกรองน้ำที่กรอง

ได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ น้ำที่ได้จะไม่มีประจุ แต่การที่เครื่องกรองใช้งานมานานประสิทธิภาพอาจลดลง และการนำน้ำหลังจากการล้างเครื่องกรองใหม่ ๆ กับน้ำที่ได้หลังจากล้างเครื่องกรองนานมาก คุณภาพน้ำหลังจากล้างเครื่องกรองใหม่ ๆ ย่อมดีกว่ามาก มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งในการทดลองใช้ระยะเวลานานและมีการล้างเครื่องกรองในช่วงที่ทำการทดลองคุณภาพน้ำจึงแตกต่างกัน เมื่อคุณภาพน้ำที่ใช้ไม่ดีมีสารปนเปื้อนอยู่ในน้ำ เช่น  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{OH}^-$  สารเหล่านี้จะไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียม บางตัวทำให้แคลเซียมตกตะกอนและไม่ละลายน้ำเช่น  $\text{CO}_3^{2-}$  ดังสมการที่ 4-4



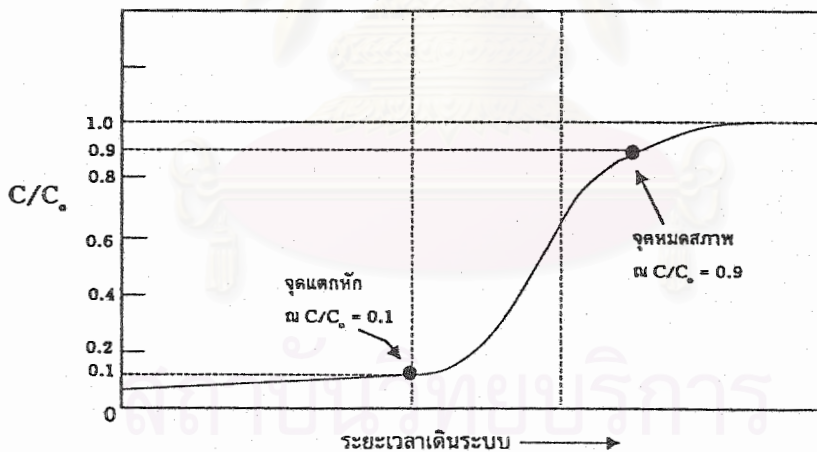
ได้ผลึกสีขาวของ Cadmium Carbonate ซึ่งไม่ละลายน้ำ จุดหมดสภาพจึงไม่เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผู้ทดลองเคยใช้น้ำประปาแทนน้ำกลั่นในการทดลองแบบเทที่ค่าพีเอช 8 ความเข้มข้นแคลเซียม 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าแคลเซียมตกตะกอนไปประมาณ 0.864 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือแคลเซียมในน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 0.136 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่านั้น เพื่อให้เปรียบเทียบความลึกทั้ง 3 ได้เท่าๆกัน จึงได้แสดงกราฟเป็นค่า  $C/C_0$  กับ ระยะเวลาเดินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ลักษณะการหมดสภาพของคอลัมน์ที่ระดับความลึก 30, 60 และ 90 ซม. ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.23 ค่า  $C$  หมายถึง ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำที่ผ่านคอลัมน์หรือน้ำทิ้ง และค่า  $C_0$  หมายถึง ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเสียเริ่มต้น จะเห็นว่าอัตราเร็วในการหมดสภาพของดินเผาดูดซับจะมีค่าไม่คงที่ เมื่อพิจารณาคุณภาพน้ำทิ้งของจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ความลึกของชั้นดินเผาดูดซับเท่ากับ 90 เซนติเมตร พบว่าในช่วงแรกคุณภาพน้ำที่ได้จากระบบจะดีอย่างต่อเนื่อง และเมื่อถึงจุดหนึ่งคุณภาพน้ำที่ได้จะแยลงอย่างรวดเร็วหรือมีอัตราเร็วในการหมดสภาพของดินเผาดูดซับอย่างรวดเร็ว ตำแหน่งที่กล่าวถึงคือตำแหน่งที่ค่า  $C/C_0$  เท่ากับ 0.6 ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการออกแบบระบบคอลัมน์เมื่อค่า  $C/C_0$  เท่ากับ 0.6 ให้ทำการเปลี่ยนดินเผาดูดซับทันทีเพราะถ้าปล่อยให้ดินเผาดูดซับจะหมดสภาพอย่างรวดเร็ว และอาจมีการคายแคดเมียมออก(Desorption)

หากเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จะนิยมใช้ค่า  $C/C_0$  เท่ากับ 0.1 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก และความชันของกราฟในช่วงแรกมีค่าต่ำมากเช่นกัน ในการเดินระบบจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก หากเปลี่ยนถ่านกัมมันต์เลยจุดดังกล่าวเพียงนิดเดียวอาจไม่ทันเวลาเพราะถ่านกัมมันต์จะหมดสภาพอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ลักษณะการหมดสภาพของคอลัมน์ดูดซับ(อ้างถึง:เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546)

หากพิจารณาทั้ง 3 ความลึก คือ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร พบว่าที่ความลึก 30 เซนติเมตร บำบัดน้ำเสียได้ 2395.9 BV ความลึก 60 เซนติเมตร บำบัดน้ำเสียได้ 2985.7 BV และความลึก 90 เซนติเมตร บำบัดน้ำเสียได้ 2408.2 BV เห็นได้ว่าช่วงความลึกของชั้นถ่าน 60 เซนติเมตร บำบัดน้ำเสียต่อหน่วยได้มากที่สุด

จากการทดลองที่ 4.3.2.5 ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของดินเผาดูดซับที่พีเอช 8 ได้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 8 มีค่าเท่ากับ 3.257 มก./กรัม และจากการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีความลึก 30, 60 และ 90 เซนติเมตร บำบัดน้ำเสียได้ 325, 810 และ 980 ลิตร ความเข้มข้นแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 0.826, 0.865 และ 0.945 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นแคดเมียมทั้งหมดในระบบประมาณ 848.625 มิลลิกรัม และมีดินเผาดูดซับในคอลัมน์ 70 กรัม แสดงว่าดินเผาดูดซับสามารถดูดซับแคดเมียมได้เท่ากับ  $848.63 / 70 = 12.12$  มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมดินเผาดูดซับ ซึ่งมากกว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 8 ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ย่อมไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองจริง การทดลองในคอลัมน์ทดลองที่ที่อุณหภูมิตั้งที่ 38 องศาเซลเซียส ส่วนการทดลองหาไอโซเทอมทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้นการทดลองในคอลัมน์จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า และในการหาไอโซเทอมมีการบดดินเผาดูดซับให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ได้(ตามมาตรฐาน ASTM D3860-89a) ทำให้โครงสร้างและรูพรุนของดินเผาดูดซับเปลี่ยนแปลงไม่เหมาะสมกับการดูดซับไอออนแคดเมียม นอกจากนี้ความเร็วในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีอาจไม่เหมาะสมกับการดูดซับไอออนแคดเมียมด้วยดินเผาดูดซับ

#### 4.6 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด

การทดลองหาค่า Iodine Number ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การหาค่า Surface Area, Total Pore Volume และ Average Pore Diameter ด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer บริษัท Micro Meritics รุ่น ASAP 2000

การหาค่า Zeta Potential ด้วยเครื่อง Zeta-Sizer บริษัท Malvern รุ่น 3000

การหาหมู่ฟังก์ชันโดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) บริษัท Perkin-Elmer รุ่น 1760X

การถ่ายภาพขยาย 2000 เท่า โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM.)

การศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยเครื่อง X-RAY Fluorescence บริษัท Philips รุ่น PW2400

ได้ผลการทดลองหาค่า Iodine Number, Zeta Potential, Surface Area Total Pore Volume และ Average Pore Diameter ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด

พารามิเตอร์	ดินเผาดูดซับ	ถ่านกัมมันต์(F300)
Iodine Number (mg.l/g)	204.17	891.25
Surface Area (sq.m/g)	108.97	955.70
Total Pore Volume (cc./g)	0.12	0.49
Average Pore Diameter (A)	43.76	20.73
Zeta Potential (mV)	-31.00	-20.20

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าค่า Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume ของดินเผาดูดซับมีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะในการผลิตดินเผาดูดซับไม่มีการกระตุ้น (Activation) ทั้งทางฟิสิกส์ (Physical Activation) และทางเคมี (Chemical Activation) ส่วนถ่านกัมมันต์มีการกระตุ้น ซึ่งการกระตุ้นเป็นกระบวนการที่ทำให้สิ่งต่างๆที่อยู่ในรูพรุน เช่น น้ำมันดิน ชี้อัด เป็นตัน หลุดออกมา เมื่อไม่มีสิ่งใดอุดตันอยู่ในรูจึงทำให้มีรูมีความพรุนมากขึ้นส่งผลให้ Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume มีค่ามากขึ้น แต่ค่า Average Pore Diameter ของดินเผาดูดซับมีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ อาจเป็นเพราะใช้วัตถุดิบคนละชนิด โดยถ่านกัมมันต์ผลิตจากถ่านหินแต่ดินเผาดูดซับผลิตจากดินเหนียวและซีลี้อย

จากผลการทดลองค่า Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume ของถ่านกัมมันต์มีค่ามากกว่าดินเผาดูดซับ น่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม ของถ่านกัมมันต์มีค่ามากกว่าดินเผาดูดซับ แต่ผลกลับเป็นไปในทางตรงกันข้ามซึ่งดูได้จากผลการทดลองที่ 4.2.2 และ 4.3.2 ที่ว่าดินเผาดูดซับสามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะการที่ค่า Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume มีค่ามากก็จริงแต่ขนาดและความคดเคี้ยวของรูพรุนอาจไม่เหมาะสมกับการดูดซับแคดเมียมและที่สำคัญดินเผาดูดซับมีค่า Zeta Potential เท่ากับ -31 ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ถึง 34.8 เปอร์เซ็นต์ (รายละเอียดในภาคผนวก ฉ.) ดังนั้นดินเผาดูดซับจึงมีแรงดึงดูดให้แคดเมียมซึ่งมีประจุตรงกันข้ามเข้ามาได้มากกว่าและดูดซับไว้ได้มากกว่า

ซึ่งค่า Zeta Potential หมายถึงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคดินเผา ดูดซับ ซึ่งดินเผาดูดซับมีค่า Zeta Potential น้อยกว่า หรือมีประจุไฟฟ้าเป็นลบมากกว่า ถ่านกัมมันต์ เป็นเพราะดินเผาดูดซับมีดินซึ่งมีประจุเป็นลบเป็นส่วนผสมซึ่งถ่านกัมมันต์ไม่มี จึงทำให้ดินเผาดูดซับแสดงความเป็นประจุลบออกมามากกว่าถ่านกัมมันต์

ดินเผาดูดซับมีประจุที่ผิวเป็นลบมากกว่าถ่านกัมมันต์ จึงสามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ ไอออนประจุบวกหรือ  $Cd^{2+}$  ที่อยู่ในน้ำวิ่งเข้ามาหาได้มากกว่าและหลุดเข้าไปติดอยู่ในโพรงได้มากกว่า จึงทำให้ดินเผาดูดซับสามารถดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์

จากเหตุผลข้างต้น ทำให้เชื่อว่ามีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นระหว่างดินเผาดูดซับกับ แคดเมียม และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของไชยยันต์ ไชยยะ ที่ใช้ดินผสมกับกากกาแฟ และเผาได้เป็นเม็ดดูดซับ นำมาดูดซับไอออนแคดเมียม พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ ของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ได้ค่าการดูดซับสูงสุดที่พีเอช 9 เท่ากับ 39.06 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกรัมเม็ดดูดซับ ส่วนดินเผาดูดซับมีค่า 6.304 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมดินเผาดูดซับ ค่า Zeta Potential ของเม็ดดูดซับเท่ากับ -37.1 mV เห็นได้ว่าการทดลองของ ไชยยันต์ ไชยยะ มีค่า การดูดซับสูงสุดมากกว่าดินเผาดูดซับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะ การทดลองของ ไชยยันต์ ไชยยะ ใช้ความ เข้มข้นแคดเมียมในการทดลองไม่เท่ากับการทดลองของดินเผาดูดซับ คือในช่วง 25 – 250 มก./ล. ซึ่งสูงกว่า 1 มก./ล.มาก และ ที่สำคัญใช้วัสดุที่แตกต่างกันจึงทำให้มีค่า Zeta Potential เป็นลบ มากกว่าดินเผาดูดซับ ซึ่งดินเผาดูดซับมีค่า -31 mV ส่งผลให้เม็ดดูดซับของไชยยันต์ ไชยยะ มีแรง ดึงดูดไอออนแคดเมียมมากกว่าดินเผาดูดซับ จึงทำให้ผลการดูดซับสูงสุดมีค่ามากกว่าดินเผา ดูดซับ

เมื่อเปรียบเทียบค่า Iodine Number และ Surface Area ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้ เลื่อยและกระตุ้นด้วย  $ZnCl_2$  ของมานพ ตีระรัตนสมโภช ซึ่งมีค่า 1021.3 mg.I/g และ 1572.51 sq.m/g ซึ่งมีค่ามากกว่าดินเผาดูดซับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อยของ มานพ ตีระรัตนสมโภช มีการกระตุ้นทางเคมีเพื่อเพิ่มปริมาตรรูพรุนด้วย  $ZnCl_2$  จึงทำให้มีค่า Iodine Number และ Surface Area สูงกว่าเม็ดดูดซับซึ่งไม่ได้ผ่านการกระตุ้น

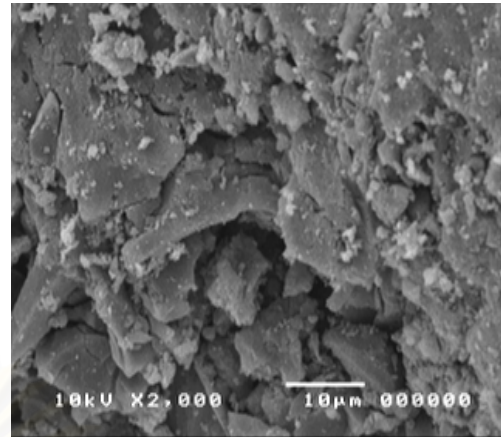
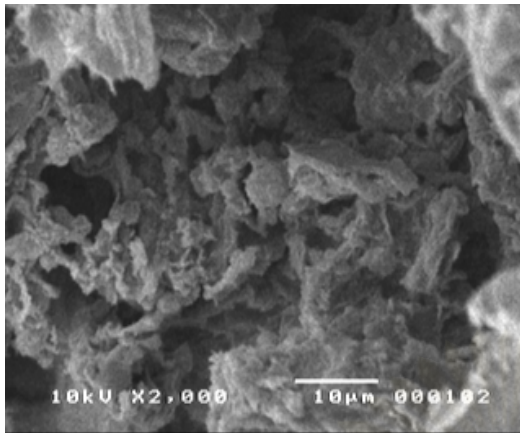
เพื่อให้อธิบายได้ดีขึ้นถึงลักษณะของรูพรุน จึงได้นำดินเผาดูดซับและถ่านกัมมันต์ถ่ายภาพ ขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) ได้ผลดังรูปที่ 4.25 และ 4.26

จากรูปที่ 4.25 เห็นได้ว่าดินเผาดูดซับมีผิวที่ไม่เรียบ มีรูพรุนหรือโพรงขนาดใหญ่และ สลับซับซ้อนกว่าถ่านกัมมันต์ แต่ถ่านกัมมันต์มีผิวเรียบกว่า รูพรุนหรือโพรงเล็กและแคบ ที่ผิวมีจุดสีดำซึ่งน่าจะเป็นรูขนาดเล็กจำนวนมาก จึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีค่า Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume มากกว่าดินเผาดูดซับ ส่วนขนาดโพรงของดินเผาดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับค่า Average Pore Diameter จากการทดลองด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer

ดินเผาดูดซับที่ผ่านการศึกษาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลองแล้ว พื้นผิวเรียบกว่าดินเผาดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการทดลอง ที่เป็นเช่นนี้เพราะพื้นผิวมีการปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ ซึ่งจะประกอบไปด้วยแคดเมียม สารละลายกรดและเบสนั่นเอง

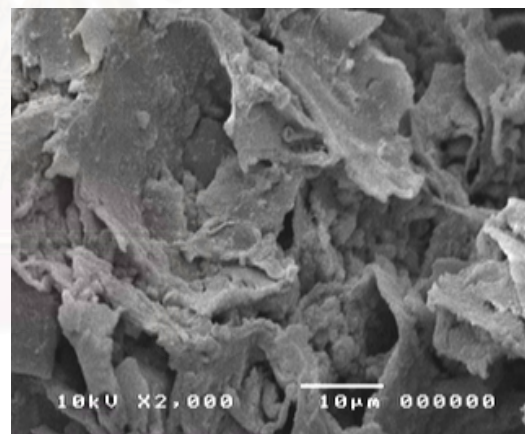
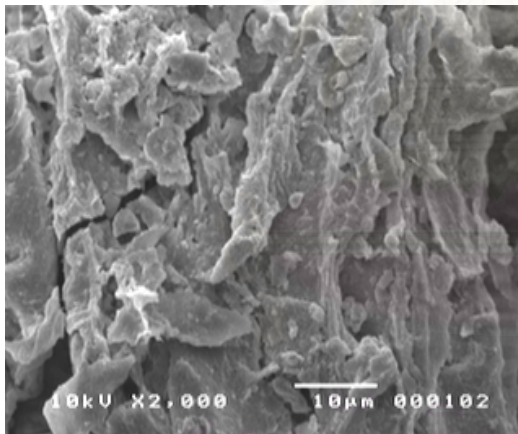
ซีลี้อยที่ผ่านกระบวนการเผาเช่นเดียวกับดินเผาดูดซับแต่ไม่มีดินเป็นส่วนผสม เห็นว่ามีความพรุนตัว โพรงมีขนาดใหญ่และมีความสลับซับซ้อนคล้ายกับดินเผาดูดซับ แสดงให้เห็นว่าความพรุนตัวของดินเผาดูดซับเกิดจากซีลี้อยเป็นส่วนใหญ่

จากรูปที่ 4.26 เป็นภาพดินเหนียวที่ผ่านกระบวนการเผาเช่นเดียวกับดินเผาดูดซับ แต่ไม่มีซีลี้อยเป็นส่วนผสม เห็นว่าผิวมีลักษณะไม่เรียบ ไม่มีความพรุนตัว ไม่มีรูพรุนที่มีความสลับซับซ้อนเหมือนดินเผาดูดซับ จึงยืนยันว่าความพรุนตัวของดินเผาดูดซับมาจากซีลี้อยที่ผสมเข้าไป



ดินเผาดูดซับ มีวัตุดิบเป็นดิน 10%  
 ซี้เฉลี่ย 90% เผาที่ 600°C  
 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3°C / นาที  
 เผานาน 30 นาที

ถ่านกัมมันต์(F300)

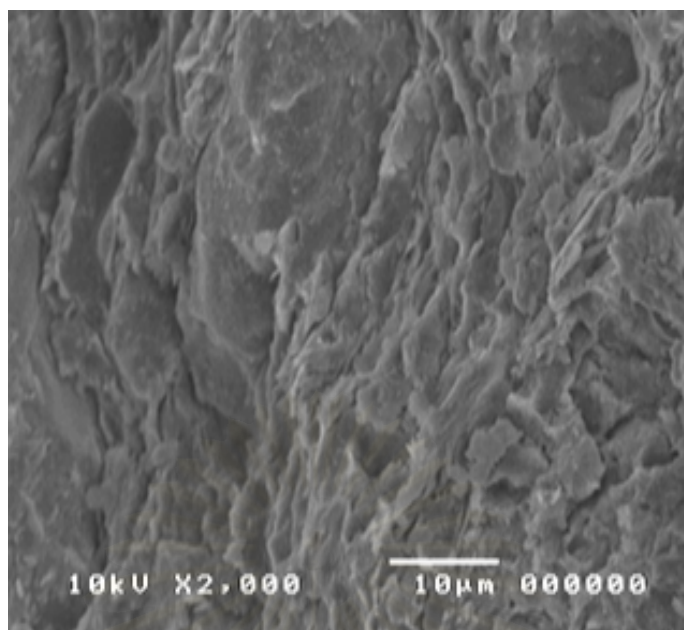


ดินเผาดูดซับที่ผ่านการศึกษาประสิทธิภาพ  
 ในคอลัมน์จำลอง

ซี้เฉลี่ยเผาที่ 600°C อัตรา 3°C / นาที  
 เผานาน 30 นาที

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) กำลังขยาย 2000 เท่า ของวัสดุต่างๆ

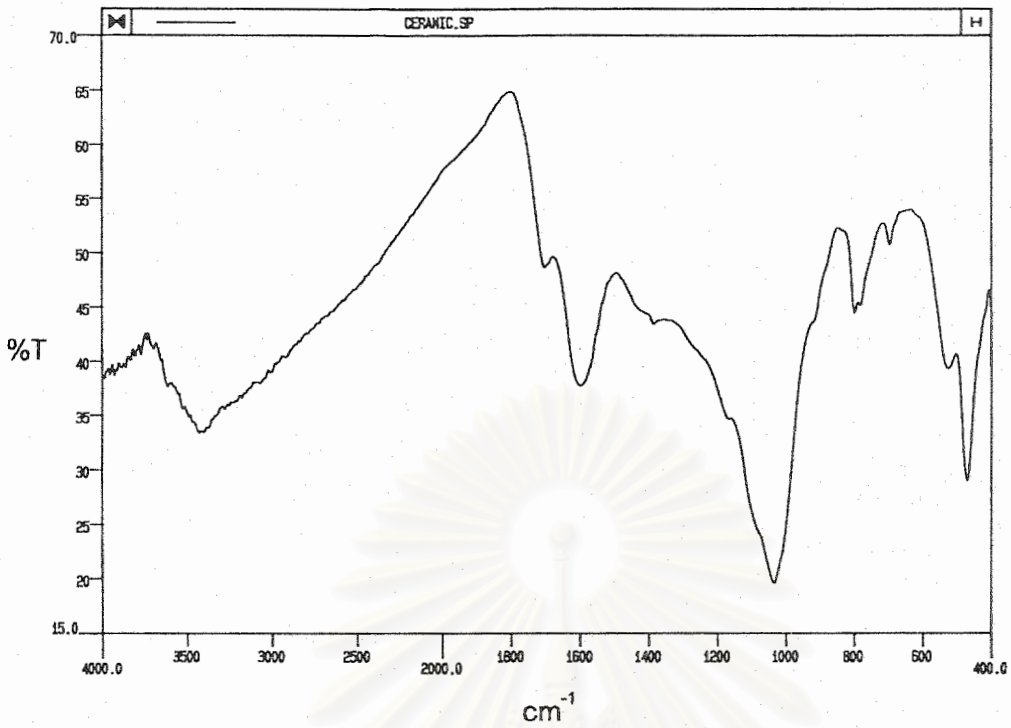




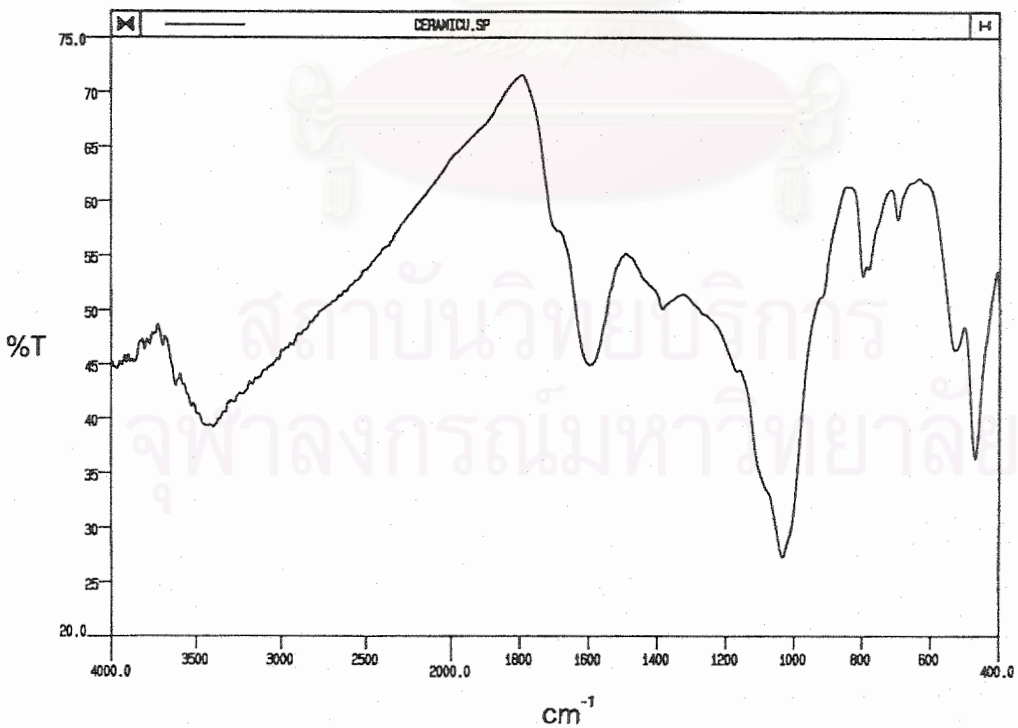
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM)ของดินเหนียวเผาที่ 600°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3°C /นาที่ เผานาน 30 นาที

เพื่อให้รู้ถึงหมู่ฟังก์ชันหลัก (Functional Group) จึงนำถ่านกัมมันต์ ดินเผาดูดซับและดินเผาดูดซับที่ผ่านการทดสอบการหาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ได้ผลดังรูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29

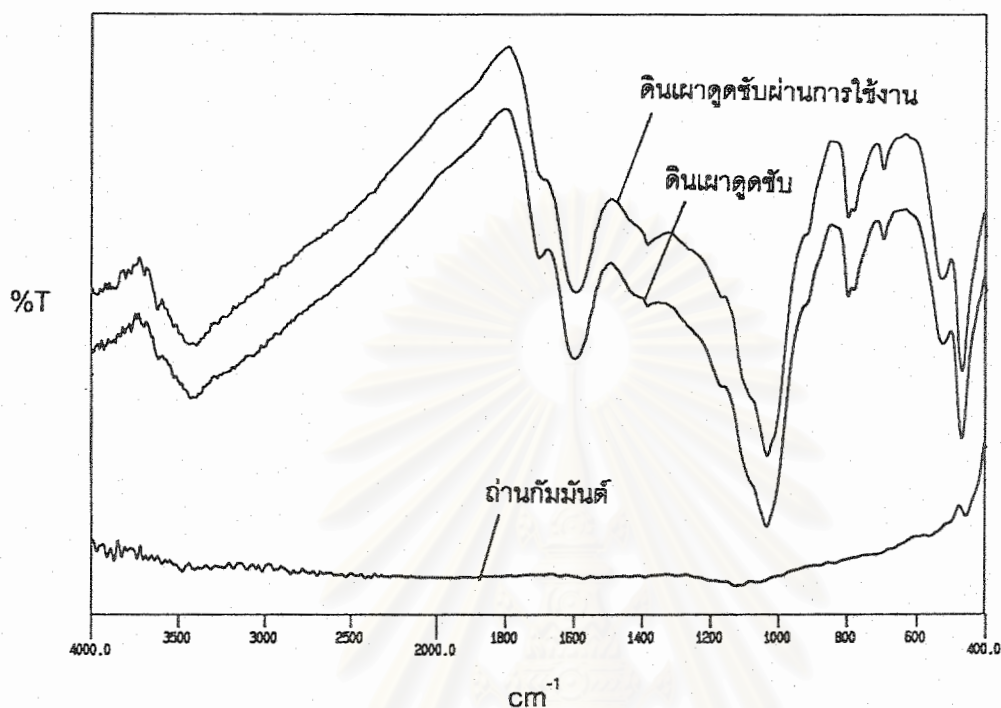
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 %T(Transmittance) และช่วงความถี่( $\text{cm}^{-1}$ ) ของดินเผาดูดซับ



รูปที่ 4.28 %T(Transmittance) และช่วงความถี่( $\text{cm}^{-1}$ ) ของดินเผาดูดซับที่ผ่านการทดลองการหาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง



รูปที่ 4.29 %T(Transmittance) และช่วงความถี่( $\text{cm}^{-1}$ ) ของดินเผาดูดซับ ดินเผาดูดซับที่ผ่านการทดลองการหาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง และ ถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.27 วิเคราะห์ได้ว่า พบ Functional Group ในดินเผาดูดซับดังนี้

- หมู่ O-H ที่ช่วงความถี่  $3570-3200 \text{ cm}^{-1}$
- หมู่ C=O ที่ช่วงความถี่  $1800-1720 \text{ cm}^{-1}$
- หมู่ arC-O ที่ช่วงความถี่  $1625-1575 \text{ cm}^{-1}$
- หมู่ C-H ที่ช่วงความถี่  $1355-1395 \text{ cm}^{-1}$
- หมู่ Si-O-C ที่ช่วงความถี่  $1110-1000 \text{ cm}^{-1}$
- หมู่ Si-C ที่ช่วงความถี่  $860-7600 \text{ cm}^{-1}$
- หมู่ Si-O ที่ช่วงความถี่  $465 \text{ cm}^{-1}$

เห็นได้ว่ามีหมู่ O-H, Si-O-C, Si-C, Si-O ซึ่งได้มาจากดินเหนียว เพราะจากการหาองค์ประกอบของดินเหนียวพบว่ามี Si เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ส่วนหมู่ arC-O, C=O, C-H ได้มาจากซีลี้อยเป็นส่วนใหญ่เพราะธาตุองค์ประกอบหลักของซีลี้อยซึ่งเป็นสารอินทรีย์หลังการเผาคือ คาร์บอน(C)

จากรูปที่ 4.28 วิเคราะห์ได้ว่าพบ Functional Group ในดินเผาดูดซับที่ผ่านการทดลอง การหาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง ดังนี้

หมู่	O-H	ที่ช่วงความถี่	3570-3200 $\text{cm}^{-1}$
หมู่	C=O	ที่ช่วงความถี่	1800-1720 $\text{cm}^{-1}$
หมู่	arC-O	ที่ช่วงความถี่	1625-1575 $\text{cm}^{-1}$
หมู่	C-H	ที่ช่วงความถี่	1355-1395 $\text{cm}^{-1}$
หมู่	Si-O-C	ที่ช่วงความถี่	1110-1000 $\text{cm}^{-1}$
หมู่	Si-C	ที่ช่วงความถี่	860-7600 $\text{cm}^{-1}$
หมู่	Si-O	ที่ช่วงความถี่	465 $\text{cm}^{-1}$

เห็นได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันนัลกรุปเหมือนกับดินเผาดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งาน

จากรูปที่ 4.29 สังเกตเส้นกราฟของดินเผาดูดซับและดินเผาดูดซับที่ผ่านการทดลอง การหาประสิทธิภาพในคอลัมน์จำลอง พบว่าทั้งสองมีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกันมากหรือมีความสมมาตรกัน แต่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดตรงที่ความถี่  $1383 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1697 \text{ cm}^{-1}$  แสดงว่ามีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชันนัลกรุปตรงตำแหน่งนั้น ทำให้หมู่ฟังก์ชันนัลกรุปเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันนัลกรุปทำให้เชื่อว่าเป็นการดูดซับทางเคมี

จากเส้นกราฟของถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีลักษณะขนานไปกับแนวแกนนอน และค่า%T(Transmittance) ค่อนข้างคงที่ไม่มีพีคอะไรที่โดดเด่น จึงทำให้ไม่สามารถหาหมู่ฟังก์ชันนัลกรุปได้

#### 4.7 ประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตดินเผาดูดซับ

ค่าใช้จ่ายในการผลิตประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า และ ค่าแรงงาน ดังนี้

##### 4.7.1 ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

ในการผลิตดินเผาดูดซับปริมาณ 750 กรัม เป็นปริมาณที่ผลิตได้ต่อการเผา 1 ครั้ง

1) ดินเหนียว ซื้อมา 2.80 บาท/กิโลกรัม 1000 กรัม อบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เหลือ ดินประมาณ 750 กรัม นำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 mesh เหลือดิน

ประมาณ 500 กรัม ดังนั้นค่าดินที่พร้อมนำไปใช้งานมีราคาประมาณ 5.60 บาท/กิโลกรัม และใช้เพียง 150 กรัมเป็นเงิน 0.84 บาท

2) ขี้เลื่อยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 mesh ปริมาณ 1350 กรัม ไม่เสียค่าใช้จ่ายเพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งของโรงเลื่อยไม้

3) น้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร ราคา 0.18 บาท

#### 4.7.2 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต

สำหรับผลิตดินเผาดูดซับประมาณ 750 กรัม

1) ค่าไฟในการอบ การหาค่าไฟในการอบ ได้ใช้เครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าหรือ Single – Phase Kilowatt – Hour Meter ขนาด 15(45) Amp (รูปในภาคผนวก ข.) ทำการวัดกับเตาอบในขณะที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบดินเหนียว 3 ชั่วโมง อบขี้เลื่อย 3 ชั่วโมง (โดยอบพร้อมกัน) อบดินเหนียวและขี้เลื่อยที่ขึ้นรูปเสร็จแล้ว 1 ชั่วโมง รวมเวลาในการอบ นาน 4 ชั่วโมง ได้ค่าจาก Single – Phase Kilowatt – Hour Meter เท่ากับ 2.14 KW-H โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2543)

คำนวณค่าใช้จ่าย

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} * (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 2.14 * (1.8047 + 0.2612) \\ &= 4.42 \text{ บาท} \end{aligned}$$

2) ค่าไฟในการเผา การหาค่าไฟในการเผา ได้ใช้ Single – Phase Kilowatt – Hour Meter ขนาด 15(45) Amp ทำการวัดกับเตาเผาในขณะที่ทำการเผาที่อุณหภูมิเริ่มต้น 28 ถึง 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที เผาอุณหภูมิคงที่ที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ได้ค่าเท่ากับ 3.93 KW-H คำนวณค่าใช้จ่ายเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} * (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 3.93 * (1.8047 + 0.2612) \\ &= 8.11 \text{ บาท} \end{aligned}$$

3) ค่าไฟในการอบดิน เครื่องอบดินไม่สามารถใช้ Single – Phase Kilowatt – Hour Meter ทำการวัดได้เพราะไม่มีจุดต่อเชื่อม จึงใช้วิธีคำนวณจากมอเตอร์ไฟฟ้าแทน โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.37 KW ใช้เวลาการอบดินปริมาณ 220 กรัม เพื่อให้ได้ดินประมาณ 150 กรัม เท่ากับ 3 นาที คำนวณค่าใช้จ่ายเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟ} &= \text{KW} * \text{TIME}(\text{hr.}) * (1.8047 + 0.2612) \\ &= 0.37 * 0.05 * (2.0659) \\ &= 0.04 \text{ บาท} \end{aligned}$$

4) ค่าไฟในการอัดเป็นเม็ด เครื่องอัดเม็ดไม่สามารถใช้ Single – Phase Kilowatt – Hour Meter ทำการวัดได้เพราะไม่มีจุดต่อเชื่อม จึงใช้วิธีคำนวณจากมอเตอร์ไฟฟ้าแทน โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.170 และ 1.5 KW ใช้เวลาการอัดเม็ดวัตถุดิบและซีลี้อยปริมาณ 1500 กรัม เท่ากับ 15 นาที คำนวณค่าใช้จ่ายเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟ} &= \text{KW} * \text{TIME} * (1.8047 + 0.2612) \\ &= 1.67 * 0.25 * (2.0659) \\ &= 0.86 \text{ บาท} \end{aligned}$$

#### 4.7.3 ค่าแรงที่ใช้ในการผลิต

จะเป็นค่าแรงในการเตรียมวัตถุดิบเช่น ร่อนดิน ร่อนซีลี้อย ผสมดินและซีลี้อยเป็นต้น ซึ่งการผลิตดินเผาดูดซับ 750 กรัม ใช้เวลาในการทำงานประมาณ 1 ชั่วโมง 40 นาที คิดค่าแรงที่ 20.40 บาท/ชั่วโมง รวมเป็นเงิน 35.84 บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดเพื่อผลิตดินเผาดูดซับปริมาณ 750 กรัม  
มีค่าเท่ากับ 0.84+0.18+4.42+8.11+0.04+0.86+35.84 = 50.29 บาท

หรือคิดเป็น 67.05 บาท/กิโลกรัม รวม Vat 7% = 71.80 บาท/กิโลกรัม

ส่วนถ่านกัมมันต์ (Filtrisorb 300) ราคาลิตรละ 100 บาท หรือคิดเป็น 190 บาท/กิโลกรัม ซึ่งเป็นราคาที่รวมค่าการตลาดแล้ว หากดินเผาดูดซับเพิ่มค่าการตลาดเป็น 2 เท่า (ราคาประมาณ 144 บาท/กิโลกรัม) ก็ยังมีราคาต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด จึงน่าสนใจที่จะพัฒนาในเชิงการค้า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการผลิตดินเผาดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด และศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินเผาดูดซับที่ผลิตขึ้น รวมถึงความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งทำการทดลองทั้งแบบเทและแบบคอลัมน์ และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ กับถ่านกัมมันต์ที่มีขายทั่วไป สามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

1) ปัจจัยต่างๆที่มีผลสำหรับการผลิตดินเผาดูดซับเพื่อให้ดินเผาดูดซับมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุด มีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่เหมาะสมและมีความคงรูปเมื่อนำไปใช้งานคืออัตราส่วนผสมระหว่างดินกับซีลี้อยและอุณหภูมิการเผา ส่วนอัตราการเพิ่มอุณหภูมิไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัด และสรุปได้ว่าดินเผาดูดซับต้องผลิตจากดินเหนียวและซีลี้อย ที่มีร้อยละของดินเหนียวต่อซีลี้อยเป็น 10 ต่อ 90 เเผาในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึง 600 องศาเซลเซียส เป็น 3 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยที่ดินเผาดูดซับดังกล่าวขนาด 8-30 mesh ปริมาณ 1 กรัมสามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ได้ร้อยละ 83.95 และกำจัดได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ถึงร้อยละ 23.05 ในการทดลองเดียวกัน

2) เวลาในการเข้าสู่สมดุลของดินเผาดูดซับคือ 8 ชั่วโมง ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมสอดคล้องกับสมการของ Freundlich เป็นอย่างดี ที่ค่าพีเอชต่างกันประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมมีค่าต่างกัน มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 6.304 มิลลิกรัมแคดเมียม/กรัมดินเผาดูดซับ ที่พีเอช 9 ดังนั้นถ่านนำไปใช้จริงควรนำไปดูดซับน้ำเสียที่ค่าพีเอชดังกล่าว และที่ค่าพีเอช 3.28 (น้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีการปรับค่าพีเอช) ดินเผาดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ถึงร้อยละ 13.8 แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะมีค่า Iodine Number, Surface Area และ Total Pore Volume มากกว่าดินเผาดูดซับก็ตาม เป็นเพราะดินเผาดูดซับมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ 31 ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเพียง 20.2 จึงดึงดูดแคดเมียมให้มาใกล้และดูดซับได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ ดังนั้นดินเผาดูดซับจึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้มากกว่าถ่านกัมมันต์

3) เมื่อดินเผาดูดซับได้ดูดซับแคดเมียมไปแล้ว แคดเมียมจะไม่สามารถถูกชะออกมาด้วยน้ำกลั่นได้แต่จะสามารถถูกชะด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 ได้ 2.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ 24 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าถูกชะได้น้อยมาก เป็นเพราะการดูดซับของดินเผาดูดซับเป็นการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมี และเนื่องจากการดูดซับทางเคมีจึงทำให้การหลุดออกของแคดเมียมเกิดขึ้นได้ยาก

4) ในการศึกษาประสิทธิภาพคอลัมน์จำลองที่พีเอช 8 พบว่าจุดหมดสภาพที่ความลึก 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 2395.9 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 60 เซนติเมตร อยู่ที่ 2985.7 BV และจุดหมดสภาพที่ความลึก 90 เซนติเมตร อยู่ที่ 2408.2 BV ในระบบคอลัมน์มีถ่าน 70 กรัม หรือคิดเป็นดินเผาดูดซับ 1 กรัม ดูดซับแคดเมียมได้ 12.12 มิลลิกรัม จนหมดสภาพ

5) ดินเผาดูดซับมีค่าใช้จ่ายในการผลิต (ค่าวัตถุดิบ ไฟฟ้าและแรงงาน) ประมาณ 71.8 บาทต่อกิโลกรัม ถูกกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีราคา 190 บาท/กิโลกรัม ซึ่งเป็นราคาที่รวมค่าการตลาดแล้ว หากดินเผาดูดซับเพิ่มค่าการตลาดเป็น 2 เท่า (ราคาประมาณ 144 บาท/กิโลกรัม) ก็ยังมีราคาต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมดีกว่า จึงน่าสนใจที่จะพัฒนาในเชิงการค้าและเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ในการดูดซับแคดเมียมหรือโลหะหนักอื่น ๆ ที่มีประจุบวกและมีความเข้มข้นในน้ำเสียต่ำประมาณ 1 มก./ล. รวมทั้งยังสามารถใช้ได้ทั้งระบบบำบัดน้ำเสียแบบเทหรือแบบคอลัมน์ก็ได้

## ข้อเสนอแนะ

1) ใช้วัตถุดิบที่เป็นวัสดุชีวมวลอื่นๆแทนซีลีเยอในการผลิตดินเผาดูดซับ เช่น ฟุนไ้ม้ กระดุกปน แกลบปน เศษยาง หรือ เมล็ดผลไม้แทนป่น เป็นต้น และใช้วัสดุเซรามิกชนิดอื่นๆแทนดินเหนียวเช่น ดินขาว ดินดำ หรือใช้วัตถุดิบหลายๆชนิดรวมกัน

2) ศึกษาผลของการกระตุ้นดินเผาดูดซับ ทั้งการกระตุ้นทางฟิสิกส์และทางเคมี เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นถ่านในดินเผาดูดซับให้มากขึ้น

3) ศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆที่น่าจะมีผลต่อการดูดซับ เช่น ขนาดของวัตถุดิบ ขนาดดินเผาดูดซับ ความปั่นป่วน ชนิดของโลหะหนัก ความเข้มข้นของโลหะหนัก

4) ศึกษาการนำน้ำเสียจริงมาทำการทดลองแทนน้ำเสียสังเคราะห์

5) ศึกษาการดูดซับก๊าซเสียโดยดินเผาดูดซับ ในปล่องของเตาเผาขยะ โดยเลือกตัวอย่างที่ดูดซับแคดเมียมได้ดีที่สุดประมาณ 30 ตัวอย่าง มาทำการทดลอง เพราะตัวอย่างที่ดูดซับแคดเมียมไม่ดีอาจดูดซับฝุ่นโลหะหนักบางชนิดได้ดี



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

การไฟฟ้านครหลวง, อัตราค่าไฟฟ้า. (ม.ป.ท.), 2543.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด สยามสเตชันนารีซัพพลาย, 2542.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. ของเสียอันตราย. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรังสิต, 2546.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.

จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์. การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ชฎิล ฉายรัศมี, เมธี ชลไมตรี และ สุนทรี เพ็ญฟู. การดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุชีวมวลผสม  
ดินเหนียว. รายงานโครงการ ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. หลักเคมี 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์กราฟิกอาร์ต, 2522.

ไชยยันต์ ไชยยะ. การพัฒนาออกแบบเม็ดดูดซับเซรามิกส์ผลิตจากกากกาแฟ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.

ดำรงค์ ขุนมงคล และ อภิสสิทธิ์ เจริญกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น.  
วิศวกรรมสาร 43 (พฤศจิกายน – ธันวาคม 2533): 96 – 99.

แดน อินทร์มา. พลศาสตร์การดูดซับความชื้นจากอซิโตนโดยสารดูดซับไมเลคูลาร์ซีฟชนิดสามเอ  
ในหลอดดูดซับ. วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ทวี พรหมพุกษ์. วิชาเครื่องเคลือบดินเผาเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์,  
2523.

ธิตีพันธ์ กว่างสุขสถิตย์. คุณสมบัติเบื้องต้นของสารเซรามิก. เชียงใหม่: คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.

นันทนา ชูฉัตร. ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต.

วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์. Ceramic Rheology and Behavior. ความรู้พื้นฐานของวัสดุ ความแข็งแรง  
และการเลือกใช้. หน้า 3-17. 31 พฤษภาคม - 2 มิถุนายน 2538 ณ สถาบันวิจัยโลหะและ  
วัสดุ

ประภคต เลิศจรุสอ่วมดี. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เถ้า ฟาง  
ข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะ  
แวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ประเทือง เซาว์วันกลาง. คุณภาพน้ำทางการประมง. กรุงเทพมหานคร: พิสิษฐ์เซ็นเตอร์, 2534.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. เซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์-  
มหาวิทยาลัย, 2539.

ปิยะพร บารมี. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิต  
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

พงศ์ศักดิ์ โอซารส. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดโดยใช้  
เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่  
เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2539.

ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. เนื้อดินเซรามิก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2541.

มันลิน ตันทุลเวศม์. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ  
เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, 2538.

มันลิน ตันทุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. 2000เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร:  
บริษัท แชน.อี 68 แลป, 2543.

มันลิน ตันทุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, 2538.

มานพ ตีระรัตนสมโภช. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม  
สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2545.

แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.

กรุงเทพมหานคร: ชวนชมการพิมพ์, 2535.

ลลิตา นิตศนจารกุล. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้

ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา  
วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

เล็ก สีคง. วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2540.

วรวจน์ กนกกันตพงษ์. การเพิ่มประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ในการดูดซับอูมิเนียมและเหล็กโดย  
เปอร์แมงกาเนตไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.

วัลย์ภรณ์ อนุ และ สุจิตรา พงศ์ธรรุณพานิช. พอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างขยะพลาสติก

พอลิโพรพิลีนและขี้เถ้า. โครงการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์  
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

ศิริวัฒน์ ศรีเกษเพชร. การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง.

วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

ศุภชัย คุ้มเสงี่ยม. เทคโนโลยีเซรามิกเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์  
ทหารผ่านศึก, 2529.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์  
(มอก. 900-2532). กระทรวงอุตสาหกรรม, 2532.

สุเจนี๋ คุ้มเสงี่ยม. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จาก  
กะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์  
สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

สุจินต์ เอี่ยมปี่. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.

สุรพล ดำริห์กุล. เครื่องปั้นดินเผา. กรุงเทพมหานคร: โครงการสืบสานวัฒนธรรมไทย, 2542.

สุรินทร์ นาคะวิวัฒน์. การศึกษาตัวไดอิเล็กตริกชนิดเซรามิกส์ที่ใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า.

วิทยานิพนธ์ ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.

อายุวัฒน์ สว่างผล. วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพมหานคร:

สำนักพิมพ์ไอเดียนส์สโตร์, 2543.

อารีวรรณ บุญเพ็ญ. การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะผลิตภัณฑ์อะลูมินาเซรามิกที่มี

ความหนาแน่นสูงสำหรับงานด้านทนทานต่อการสึกกร่อน. วิทยานิพนธ์

ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

## ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing and Materials. Standard Practice for: Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique, D3860-89a. Annual book of ASTM Standards Vol. 15.01. Philadelphia: ASTM, 1996.

American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for: Determination of Iodine Number of Activated Carbon, D 4607-94. Annual book of ASTM Standards Vol. 15.01. Philadelphia: ASTM, 1996.

Baker, F. S., Miller, C. E., Repik, A.J., and Tolles. Activated Carbon. In D.M. Ruthven (ed.), Encyclopedia of Separation Technology, Volume 1. New York: John Wiley & Sons, 1997.

Chang, J.S. Treatment of leachate from coal stockpile of Mae Moh power plant in Lampang. Master's thesis, Asian Institute of Technology, 1991.

- Cookson, J.T, Jr. Adsorption mechanisms: the chemistry of organic adsorption on activated carbon. In P.N. Cheremisinoff, and F. Ellerbusch (eds.), Carbon adsorption handbook, Michigan: Ann Arbor Science, 1978.
- Eckenfelder, W. Jr. Industrial water pollution control 3<sup>rd</sup> ed. Singapore: McGraw-hill, 2000.
- E. González Pradas, M. Villafranca Sánchez, F. Cantón Cruz, M. Socías Vicianá and M. Fernández Pérez. Adsorption of Cadmium and Zinc from Aqueous Solution on Natural and Activated Bentonite. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 59 (1994) : 289-295.
- Faust, S.D. and Aly,O.M. Adsorption Process of Water Treatment. United States of America: Butterworth Publishers, 1987.
- Hassler, J. W. Purification with activated carbon. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Chemical Publishing, 1974.
- Ruthven, M.D. Adsorption. In D.M. Ruthven (ed.) Encyclopedia of Separation Technology. Volume 1. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- Sawyer,C. N., McCarty,P.I., and Perkin,G.F. Chemistry for Environmental Engineering. Singapore: McGraw-hill, 1994.
- Schubert, U., and Husing, N. Synthesis of Inorganic Materials. Germany: Wiley Vch, 2000.
- Seng, C.E.; Lee, C.G.; and Liew, K.Y. Adsorption of Chromium (VI) and Nickel (II) Ion on Acid-and Heat -Activated Deoiled Spent Bleaching Clay.Journal of the American Oil Chemists Society 78 (August 2001): 831- 835.
- Stefanova, R.Y. Metal Removal by Thermally Activated Clay Marl. Jurnal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/HazardousSubstances and Environmental Engineering 36 (March 2001): 293-306.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคและมาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด

ตาราง ก.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค

คุณลักษณะ	1	2	3*	
	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด (Maximum Acceptable Concentration)	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด (Maximum Allowable Concentration)
ทางกายภาพ	สี(colour)	ปลาตินัม-โคบอลต์ (Platinum-Cobalt)	5	15
	รส(Taste)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	กลิ่น(Odour)	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	ความขุ่น(Turbidity)	ซิลิกา สเกล ยูนิต (Silica scale unit)	5	20
	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5-8.5	ไม่เกิน 9.2
ทางเคมี	ปริมาณสารทั้งหมด (Total Solid)	มก./ล.(mg/l)	500	1500
	เหล็ก(Fe)	"	0.5	1.0
	แมงกานีส(Mn)	"	0.3	0.5
	เหล็กและแมงกานีส	"	0.5	1.0
	ทองแดง(Cu)	"	1.0	1.5
	สังกะสี(Zn)	"	5.0	15.0
	แคลเซียม(Ca)	"	75**	200
	แมกนีเซียม(Mg)	"	50	150
	ซัลเฟต(SO <sub>4</sub> )	"	200	250***
	คลอไรด์(Cl)	"	250	600
	ฟลูออไรด์(F)	"	0.7	1.0
	ไนเตรต(NO <sub>3</sub> )	"	45	45
	Alkybenzyl Sulfonate	"	0.5	1.0
	Phenolic substances as phenol	"	0.001	0.002

ตาราง ก.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค(ต่อ)

คุณลักษณะ	1		2	3*
	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด (Maximum Acceptable Concentration)	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด (Maximum Allowable Concentration)
สารเป็นพิษ	ปรอท(Hg)	มก./ล.(mg/l)	0.001	-
	ตะกั่ว(Pb)	"	0.05	-
	อาร์เซนิก(As)	"	0.05	-
	เซลเนียม(Se)	"	0.01	-
	โครเมียม(Cr hexavalent)	"	0.05	-
	ไซยาไนด์(CN)	"	0.2	-
	แคดเมียม(Cd)	"	0.01	-
	บาเรียม(Ba)	"	1.0	-
ทางจุลชีววิทยา	แอสตนดาร์ตเพลตเคานต์(Standard plate Count)	Colonies/cm <sup>3</sup>	500	-
	เอ็มพีเอ็น(MPN)	Coliform Organism/100 cm <sup>3</sup>	น้อยกว่า2.2	-
	อี.โคไล(E.coli)		ไม่มี	-

หมายเหตุ \* เกณฑ์ที่อนุโลมให้สูงสุดตามสดมภ์ที่ 3 นั้น เป็นเกณฑ์ที่อนุญาตให้สำหรับน้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่มีความจำเป็นต้องใช้บริโภคเป็นการชั่วคราวและน้ำที่มีคุณลักษณะอยู่ในระหว่างเกณฑ์ของสดมภ์ที่ 2กับสดมภ์ที่ 3 นั้นไม่ใช่ น้ำที่ให้เครื่องหมายมาตรฐานได้

\*\* หากคัลเซียมมีปริมาณสูงกว่าที่กำหนดและแมกเนเซียมมีปริมาณต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐาน ให้พิจารณาคัลเซียมและแมกเนเซียมในเทอมของความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) ถ้ารวมความกระด้างทั้งหมดเมื่อคำนวณปริมาณคัลเซียม คาร์บอเนต มีปริมาณต่ำกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ถือว่าน้ำนั้นเป็นไปตาม มาตรฐาน



การแบ่งระดับความกระด้างของน้ำดังต่อไปนี้

0 ถึง 75 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่าน้ำอ่อน

75 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่าน้ำกระด้างปานกลาง

150 ถึง 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่าน้ำกระด้าง

300 มิลลิกรัมต่อลิตร เรียกว่าน้ำกระด้างมาก

\*\*\* หากซัลเฟตมีปริมาณถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มักเนเซียมต้องมีปริมาณไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติ  
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์  
อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 68 ลงวันที่  
4 กรกฎาคม 2521

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ของหน่วยราชการต่างๆ

อันดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำทิ้ง	หน่วย	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของหน่วยราชการ						หมายเหตุ
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
1	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.5 - 9.0	5.5 - 9.0	5 - 9	5 - 9	6.5 - 8.5	5.0 - 9.2	
2	ค่าที่ดีเอส (TDS)	มก./ล.	3,000 (5,000)	3,000 (5,000)	2,000 (5,000)	-	1,300	-	
3	สารแขวนลอย (SS)	มก./ล.	50 (150)	50 (150)	30 (150)	500 (200)*	30		* นิคมอุตสาหกรรม บางปู
4	โลหะหนัก								
	-ปรอท (Hg)	มก./ล.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.002	
	-เซเลเนียม (Se)	มก./ล.	0.02	0.02	0.2	0.02	รวมกันหรือ แต่ละอย่าง	-	
	-แคดเมียม (Cd)	มก./ล.	0.03	0.03	0.03	0.03		0.1	
	-ตะกั่ว (Pb)	มก./ล.	0.2	0.2	0.2	0.1	รวมกันหรือ แต่ละอย่าง	0.1	
	-อาร์เซนิก (As)	มก./ล.	0.25	0.25	0.25	0.25		0.2	
	-โครเมียม (Cr)	มก./ล.	-	-	0.5	0.3	ไม่มากกว่า	2.0	
	-โครเมียม Hexavalent (Cr+6)	มก./ล.	0.25	0.25	-	-	1 มก./ล. รวมทั้งเงิน	-	
	-โครเมียม Trivalent (Cr+3)	มก./ล.	0.75	0.75	-	-	(Ag)	-	
	-แบเรียม (Ba)	มก./ล.	1.0	1.0	1.0	1.0	รวมกันหรือ แต่ละอย่าง	1.0	
	-นิกเกิล (Ni)	มก./ล.	1.0	1.0	0.2	0.2		-	
	-ทองแดง (Cu)	มก./ล.	2.0	2.0	1.0	1.0	รวมกันหรือ แต่ละอย่าง	1.5	
	-สังกะสี (Zn)	มก./ล.	5.0	5.0	5.0	-		5.0	15
	-แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	5.0	5.0	5.0	10*	5.0	-	* สารละลายเหล็ก และแมงกานีส
5	ซัลไฟด์ในรูป H <sub>2</sub> S	มก./ล.	1.0	1.0	1.0	5.0	1.0	-	
6	ไซยาไนด์ในรูป HCN	มก./ล.	0.2	0.2	0.2	2.0	0.2	0.2	
7	ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	มก./ล.	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	-	
8	สารประกอบฟีนอล (Phenols Compounds)	มก./ล.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-	
9	คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	มก./ล.	1.0	1.0	1.0	5.0	1.0	5.0	
10	เพสตีไซด์ (Pesticide)	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ*	ไม่พบ*	ไม่พบ*	-	* Insecticide
11	อุณหภูมิ (Temperature)	°C	40	40	40	45	-	-	
12	สี (Color)	-	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	-	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	50*	*Pt-Co/Unit
13	กลิ่น (Odor)	-	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	-	ไม่เป็นที่ พึงรังเกียจ	-	
14	ความขุ่น (Turbidity)	(JTU)	-	-	-	-	-	50	
15	คลอไรด์ ในรูป Cl	-	-	-	-	2,000	-	-	

ตารางที่ ก.2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ของหน่วยราชการต่างๆ (ต่อ)

อันดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำทิ้ง	หน่วย	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของหน่วยราชการ						หมายเหตุ
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
16	สารกัมมันตรังสี		-	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	-	
17	น้ำมันทาร์ (Tar)		-	-	ไม่พบ	10	ไม่พบ	-	
18	ฟลูออไรด์ (F)		-	-	-	5	-	-	
19	แอมโมเนียอิสระ (Free Ammonia)		-	-	-	5	-	-	
20	แอมโมเนีย (Total ammonical Nitrogen, as N)		-	-	-	50	-	-	
21	ผงซักฟอก (Synthetic Detergent)		-	-	-	30	-	-	
22	น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease)	มก./ล.	5 (15)	6 (15)	7 (15)	10	5.0	5.0	ค่ามาตรฐานใน() ให้ดูคำอธิบายใน หมายเหตุแนบท้าย
23	ค่าทีเคเอ็น (TKN)	มก./ล.	100 (200)	101 (200)	-	-	-	-	
24	ค่าบีโอดี (BOD)	มก./ล.	20 (60)	21 (60)	22 (60)	1,000	20	40	
25	ค่าซีโอดี (COD)	มก./ล.	120 (400)	121 (400)	-	-	-	-	
26	ปริมาณสารทั้งหมด (Total Solid)	มก./ล.	-	-	-	-	-	2,000	
27	ค่าความนำไฟฟ้า	$\mu\text{m/cm}$	-	-	-	200	2,000	-	
28	ค่าเปอร์มันганเตต (Permanganate Value)	มก./ล.	-	-	60	60	-	-	

ที่มา : (1) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน  
 (2) ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุม  
 การระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม  
 (3) ประกาศกรมเจ้าท่าที่ 214/2537 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม  
 (4) ประกาศกรมการนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ 13/2530 เรื่องหลักเกณฑ์ทั่วไปในการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบกำจัด  
 น้ำเสียส่วนกลาง  
 (5) ประกาศกรมชลประทาน เรื่อง มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งในทางน้ำชลประทาน  
 (6) ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521) ออกตาม พรบ. น้ำบาดาล พ.ศ. 2520 เรื่อง มาตรฐานน้ำทิ้ง  
 ลงบ่อบาดาล

หมายเหตุ : (JTU) = หน่วยความขุ่น

$\mu\text{ m/cm}$  = ไมโครโมสต่อเซนติเมตร

## ภาคผนวก ข.

ภาพถ่ายวัตถุดิบและอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย



ดินเหนียวที่ซื้อมาจากชุมชนเครื่องปั้นดินเผาเกาะเกร็ด จังหวัดนนทบุรี



เจียนดินที่ซื้อมาให้ได้ขนาดบางและเล็กเพื่อเตรียมไปอบ



เครื่องบดดิน



พื้นที่ใช้ในการบดดิน



เครื่อง Pellet Mill สำหรับอัดเม็ดดินเผาอุตสาหกรรม



อุปกรณ์ภายในของเครื่อง Pellet Mill



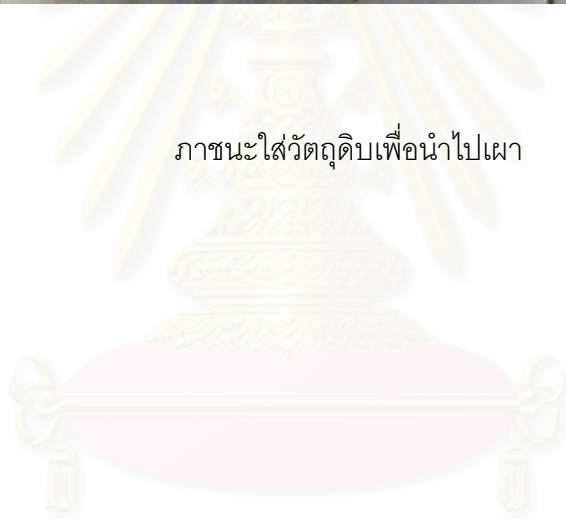
เครื่องเขย่าและขวด PE ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่ใช้ในการทดลอง



เตาเผาและอุปกรณ์วัดหน่วยไฟฟ้าที่ประกอบขึ้น



ภาชนะใส่วัตถุขี้ผึ้งเพื่อนำไปเผา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ค.

### การทดสอบหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94

#### 1. เครื่องมือ

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- บิวเรต ขนาด 5 ml หรือ 10 ml
- ขวดปริมาตรรูปชมพู่ ขนาด 250 ml
- ขวดปริมาตรรูปชมพู่ ขนาด 250 ml พร้อมจุกแก้วสำหรับปิด
- ปีกเกอร์
- ขวดสีชา สำหรับเก็บสารละลายไอโอดีน และสารละลายไทโอซัลเฟต
- กรวยกรอง
- กระดาษกรอง เบอร์ 2V หรือ เบอร์ที่เทียบเท่ากัน
- ปีเปต ขนาด 5.0, 10.0, 25.0, 50.0 และ 100 ml
- ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 L
- กระบอกตวงปริมาตร ขนาด 100 ml และ 500 ml

#### 2. สารเคมีและการเตรียม

##### 2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก)

- ผสมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น จำนวน 70 ml ลงในน้ำกลั่น 550 ml แล้วเขย่าให้เข้ากัน

##### 2.2 สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโปตัสเซียมไอโอเดต (ความเข้มข้น 0.1000 N)

- ชั่งโปตัสเซียมไอโอเดต ( $KIO_3$ ) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น จำนวน  $3.5667 \pm 0.1$  mg ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 ml ถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 L ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 L

##### 2.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (ความเข้มข้น 0.100 N)

- ละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) จำนวน 24.820 g ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด  $75 \pm 25$  ml เติมโซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ )  $0.10 \pm 0.01$  g ถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 L ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 L เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชาอย่างน้อย 4 วัน ก่อนนำมาทำการตรวจหาความเข้มข้นโดยการไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไอโอเดต

#### 2.4 สารละลายมาตรฐานไอโอดีน (ความเข้มข้น 0.100 N)

- ชั่งสารไอโอดีน 12.7 g และปอดัสเซียมไอโอไดน์ (KI) 19.1 g ผสมให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่น 2-5 ml ทำการคนให้ของแข็งละลาย ค่อยๆเติมน้ำที่ละน้อย (ครั้งละประมาณ 5 ml) จนกระทั่งได้สารละลายประมาณ 40 ml ปล่อยให้แห้งอย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะ เพื่อให้แน่ใจว่าของแข็งละลายหมด ถ่ายสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 L แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 L เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา แล้วทำการตรวจหาความเข้มข้นโดยการไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต

#### 2.5 สารละลายแป้ง

- ละลายแป้ง (Soluble starch)  $1.0 \pm 0.5$  g ในน้ำกลั่น 5-10 ml คนสารละลายพร้อมกับเติมน้ำกลั่นอีก  $25 \pm 5$  ml เทสารละลายลงในน้ำเดือด 1 L แล้วต้มต่อให้เดือดอีก 4-5 นาที

### 3. การตรวจหาความเข้มข้นของสารละลาย

#### 3.1 การตรวจหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

- ใช้ปิเปตดูดสารละลายมาตรฐานปฏุมภูมิปอดัสเซียมไอโอเดต 25 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมปอดัสเซียมไอโอไดน์ (KI)  $2.0 + 0.01$  g เขย่าจนละลาย ปิเปตกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 5 ml ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรตทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.100 N เมื่อสีของสารละลายจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุดยุติ) หยดน้ำแป้ง 2-3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ทำการไตเตรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้สูตร

$$N_1 = (P.R)/S$$

- เมื่อ  $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)  
 P = ปริมาตรสารละลายปอดัสเซียมไอโอเดต (ml)  
 R = ความเข้มข้นของสารละลายปอดัสเซียมไอโอเดต (N)  
 S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (ml)

### 3.2 การตรวจหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีน

- ใช้ปิเปตดูดสารละลายไอโอดีน 25 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรตทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.100 N เมื่อสีของสารละลายจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุดยุติ) หยดน้ำแบ่ง 2-3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ทำการไตเตรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายไอโอดีน โดยใช้สูตร

$$N_2 = (S.N_1)/I$$

เมื่อ  $N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (ml)

$N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (N)

I = ปริมาตรสารละลายไอโอดีน (ml)

### 4. วิธีการหาค่าไอโอดีนนมเบอร์

- 4.1 บดถ่านกัมมันต์ที่ต้องการทดสอบหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ให้ละเอียด จนสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 100 เมช ได้ 95% และสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 325 เมช ได้ 60%
- 4.2 นำถ่านกัมมันต์ที่บดแล้ว มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 145-155 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 4.3 ประมาณค่าไอโอดีนนมเบอร์ ของถ่านตัวอย่าง เพื่อนำไปคำนวณหา carbon dosages หรือค่าน้ำหนักของถ่านที่จะใช้ในการทดลอง 3 ค่าน้ำหนัก โดยใช้สูตรในข้อที่ 4.7 (หรือตามค่าประมาณน้ำหนักตัวอย่างในตารางที่ ก. 1) ชั่งถ่านที่อบแห้งแล้วตามน้ำหนักที่คำนวณได้ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml
- 4.4 ปิเปต 5% สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง จำนวน 10 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุก เขย่าเบาๆ เพื่อให้ตัวอย่างเปียกอย่างทั่วถึง เปิดจุก แล้วนำไปตั้งบน hot plate ในตู้ดูดควัน จนกระทั่งสารละลายเดือด ทิ้งให้เดือดต่อประมาณ  $30 \pm 2$  วินาที เพื่อไล่ซัลเฟอร์ในตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออก ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4.5 ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.100 N จำนวน 100 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดจุกขวดทันที แล้วเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา  $30 \pm 1$  วินาที เปิดจุก แล้วกรองสารละลายผ่านกระดาษกรองพับจีบเบอร์ 2V หรือ เบอร์ที่เทียบเท่ากัน

4.6 ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 ml ใส่ลงในขวดเปล่ารูปชมพู่ ทำการไตเตรตด้วย 0.100 N สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต จนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน หยดน้ำแป้ง 2 ml ทำการไตเตรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้

4.7 การคำนวณ

- การคำนวณหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ ใช้สูตร

$$X/M = [A - (DF) (B) (S)] / M$$

โดยที่  $X/M$  = Iodine adsorption per gram of carbon (mg/g)

$A = (N_2) (12693.0)$  เมื่อ  $N_2$  = ความเข้มข้นไอโอดีน (N)

$B = (N_1) (126.93)$  เมื่อ  $N_2$  = ความเข้มข้นโซเดียมไฮโอซัลเฟต (N)

$DF = \text{dilution factor} = (100+10) / 50 = 2.2$

$S = \text{ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ที่ใช้ (ml)}$

$M = \text{น้ำหนักถ่านตัวอย่าง (g)}$

- การคำนวณหาค่า carbon dosages ใช้สูตร

$$M = [A - (DF) (C) (126.93) (50)] / E$$

โดยที่  $M = \text{น้ำหนักถ่าน (g)}$

$A = (N_2) (12693.0)$

$DF = \text{dilution factor} = (100+10) / 50 = 2.2$

$C = \text{residue iodine}$

$E = \text{ค่าไอโอดีนนมเบอร์ โดยประมาณ}$

ตารางที่ ค.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์

FIND M FOR CALCULATE IODINE NUMBER BY USING ASTM D 4607

M			M				
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.488
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.388
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.799	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.666	0.567	2750	0.411	0.360	0.309

ภาคผนวก ง.

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

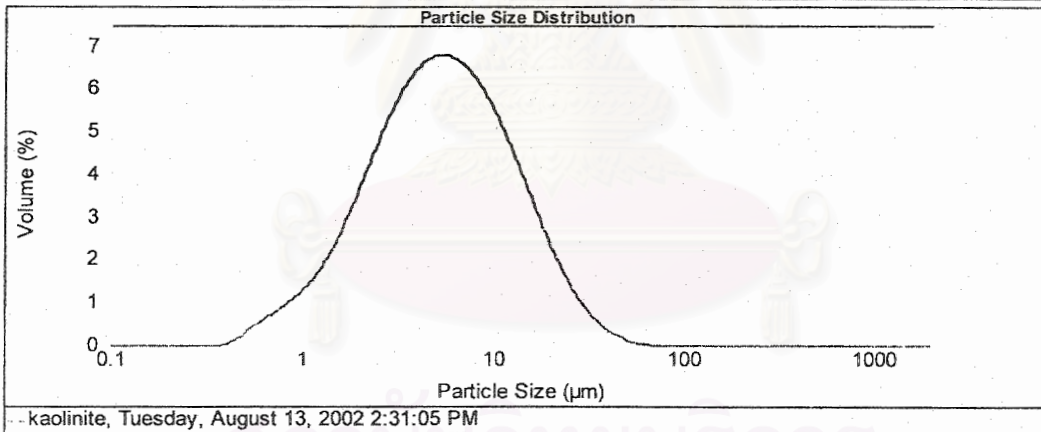
**Result Pellet Analysis Report**

Sample Name: kaolinite      SOP Name:      Measured: Tuesday, August 13, 2002 2:31:05 PM  
 Sample Source & type: water supply      Measured by: WINYOOPAS CHONPATATIP      Analysed: Tuesday, August 13, 2002 2:31:06 PM  
 Sample bulk lot ref:      Result Source: Measurement

Particle Name: pellet      Accessory Name: Hydro 2000MU (A)      Analysis model: General purpose      Sensitivity: Normal  
 Particle RI: 1.533      Absorption: 0.1      Size range: 0.020 to 2000.000 um      Obscuration: 15.80 %  
 Dispersant Name: Water      Dispersant RI: 1.330      Weighted Residual: 1.536 %      Result Emulation: Off

Concentration: 0.0083 %Vol      Span: 2.680      Uniformity: 0.851      Result units: Volume  
 Specific Surface Area:      Surface Weighted Mean D[3,2]: 3.558 um      Vol. Weighted Mean D[4,3]: 7.482 um

d(0.1): 1.673 um      d(0.5): 5.337 um      d(0.9): 15.974 um



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	1.03	7.096	4.82	50.238	355.656	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.22	7.962	4.60	56.368	399.052	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.22	8.934	4.33	63.246	447.744	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.47	10.024	4.00	70.963	502.377	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.78	11.247	3.63	79.621	563.677	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	2.14	12.619	3.22	89.337	632.456	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.54	14.159	3.22	100.237	709.627	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.96	15.887	2.80	112.488	796.214	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	3.38	17.825	2.37	126.191	893.367	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.05	2.825	3.79	20.000	1.96	141.599	1002.374	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.14	3.170	4.17	22.440	1.59	158.806	1124.683	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.28	3.557	4.49	25.179	1.24	178.250	1261.915	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.39	3.991	4.75	28.251	0.95	200.000	1415.892	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.50	4.477	4.96	31.698	0.70	224.404	1588.656	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.62	5.024	5.11	35.566	0.50	251.785	1782.502	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.74	5.637	5.08	39.905	0.23	282.508	2000.000	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.87	6.325	4.98	44.774	0.15	316.979			
0.142	0.00	1.002	0.87	7.096	4.98	50.238	0.15	355.656			

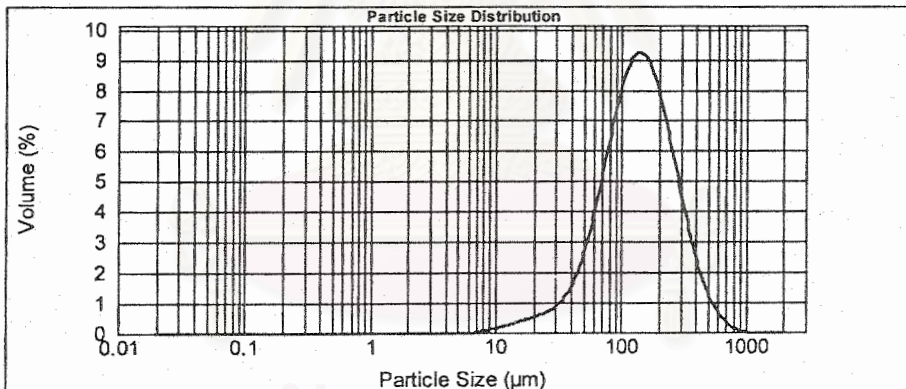
## Result Analysis Report

Sample Name: sawdust	SOP Name:	Measured: Tuesday, August 13, 2002 1:34:46 PM
Sample Source & type:	Measured by: Default	Analysed: Tuesday, August 13, 2002 1:34:47 PM
Sample bulk lot ref:	Result Source: Measurement	

Particle Name: Sawdust	Accessory Name: Hydro 2000MU (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.530	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 11.61 %
Dispersant Name: Water	Dispersant RI: 1.330	Weighted Residual: 0.512 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.1693 %Vol	Span : 1.880	Uniformity: 0.593	Result units: Volume
	Surface Weighted Mean D[3,2]: 98.074 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 165.316 um	

d(0.1): 54.552 um      d(0.5): 136.977 um      d(0.9): 312.129 um



-sawdust, Tuesday, August 13, 2002 1:34:46 PM

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.00	7.095	0.03	50.238	2.22	355.656	2.18
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	0.00	7.962	0.07	55.368	2.83	389.052	1.61
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	0.00	8.934	0.09	63.246	3.53	447.744	1.15
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	0.00	10.024	0.12	70.963	4.28	502.377	0.78
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	0.00	11.247	0.16	79.621	5.03	563.677	0.49
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	0.00	12.619	0.21	89.337	5.72	632.456	0.29
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	0.00	14.159	0.26	100.237	6.30	709.627	0.18
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	0.00	15.887	0.31	112.468	6.71	796.214	0.07
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	0.00	17.825	0.36	126.191	6.91	893.367	0.02
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	0.00	20.000	0.41	141.569	6.91	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	0.00	22.440	0.47	159.866	6.69	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.567	0.00	25.179	0.54	178.250	6.28	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	0.00	28.251	0.64	200.000	5.71	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.00	4.477	0.00	31.698	0.79	224.404	4.29	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.00	5.024	0.00	35.566	1.00	251.785	3.54	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.00	5.637	0.00	39.905	1.30	282.508	2.82	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.00	6.325	0.00	44.774	1.70	316.979			
0.142	0.00	1.002	0.00	7.096	0.00	50.238		355.656			

**ภาคผนวก จ.**  
**บันทึกข้อมูลผลการทดลอง**

ตารางที่ จ.1 ค่าเฉลี่ยความชื้นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของดินเผาดูดซับ

ตัวอย่างดินเผาดูดซับ อัตราส่วนดิน:ซีลี้อย / อุณหภูมิ / อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	ความชื้น (NTU)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
10:90 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	7.0	72.85
20:80 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	6.0	56.30
30:70 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	13.0	-
40:60 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	14.5	-
50:50 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	16	-
60:40 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	17	-
70:30 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	15	-
80:20 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	16.3	-
90:10 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	27.5	-
100:0 / 400°C / 3 °C ต่อนาที	185	-
10:90 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	5.5	79.00
20:80 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	6.0	62.75
30:70 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	5.5	54.00
40:60 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	7.9	65.15
50:50 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	13.5	-
60:40 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	15.5	-
70:30 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	14	-
80:30 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	16.5	-
90:10 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	25	-
100:0 / 500°C / 3 °C ต่อนาที	86.5	-
10:90 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	4.0	83.95
20:80 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	4.0	68.75
30:70 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	4.5	56.90
40:60 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	5.8	60.70
50:50 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	7.4	46.10



ตารางที่ จ.1 ค่าเฉลี่ยความขุ่นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของดินเผาดูดซับ (ต่อ)

ตัวอย่างดินเผาดูดซับ อัตราส่วนดิน:ซีลี้อย / อุณหภูมิ / อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	ความขุ่น (NTU)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
60:40 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	6.5	47.00
70:30 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	9.0	32.75
80:20 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	7.5	25.25
90:10 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	17.5	-
100:0 / 600°C / 3 °C ต่อนาที	28	-
10:90 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	5.0	81.35
20:80 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	4.3	67.75
30:70 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	4.8	43.90
40:60 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	6.4	62.10
50:50 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	6.0	34.30
60:40 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	7.7	29.45
70:30 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	5.5	27.80
80:20 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	6.7	21.50
90:10 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	15.0	-
100:0 / 700°C / 3 °C ต่อนาที	8.25	50.55
10:90 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	5.5	70.55
20:80 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	4.4	45.65
30:70 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	4.1	27.15
40:60 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	6.5	40.55
50:50 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	6.0	23.25
60:40 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	7.6	9.15
70:30 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	7.0	9.55
80:20 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	6.7	15.60
90:10 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	8.9	11.40
100:0 / 800°C / 3 °C ต่อนาที	6.1	42.15

ตารางที่ จ.1 ค่าเฉลี่ยความขุ่นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของดินเผาดูดซับ (ต่อ)

ตัวอย่างดินเผาดูดซับ อัตราส่วนดิน:ซีลี้อย / อุณหภูมิ / อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	ความขุ่น (NTU)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
10:90 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	7.2	84.35
20:80 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	4.4	58.95
30:70 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	5.7	47.05
40:60 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	6.6	38.70
50:50 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	5.4	22.90
60:40 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	6.7	16.80
70:30 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	5.3	15.30
80:20 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	7.4	7.50
90: 10 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	2.4	2.65
100:0 / 900°C / 3 °C ต่อนาที	3.5	7.95
10:90 / 400°C / 15 °C ต่อนาที	6.1	50.40
20:80 / 400°C / 15 °C ต่อนาที	3.9	55.70
30:70 / 400°C / 15 °C ต่อนาที	6.8	60.55
40:60 / 400°C / 15 °C ต่อนาที	13.5	-
50:50 / 400°C / 15°C ต่อนาที	26	-
60:40 / 400°C / 15°C ต่อนาที	40	-
70:30 / 400°C / 15°C ต่อนาที	17	-
80:20 / 400°C / 15°C ต่อนาที	27.5	-
90:10 / 400°C / 15°C ต่อนาที	27.5	-
100:0 / 400°C / 15°C ต่อนาที	150	-
10:90 / 500°C / 15°C ต่อนาที	6	72.75
20:80 / 500°C / 15°C ต่อนาที	5.45	67.80
30:70 / 500°C / 15°C ต่อนาที	6.1	54.10
40:60 / 500°C / 15°C ต่อนาที	13.5	-
50:50 / 500°C / 15°C ต่อนาที	12	-

ตารางที่ ๑.1 ค่าเฉลี่ยความขุ่นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของดินเผาดูดซับ (ต่อ)

ตัวอย่างดินเผาดูดซับ อัตราส่วนดิน:ซีลี้อย / อุณหภูมิ / อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	ความขุ่น (NTU)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
60:40 / 500°C / 15°C ต่อนาที	14.5	-
70:30 / 500°C / 15°C ต่อนาที	16	-
80:30 / 500°C / 15°C ต่อนาที	18.5	-
90:10 / 500°C / 15°C ต่อนาที	26.5	-
100:0 / 500°C / 15°C ต่อนาที	53.7	-
10:90 / 600°C / 15°C ต่อนาที	5.4	81.40
20:80 / 600°C / 15°C ต่อนาที	5.7	60.40
30:70 / 600°C / 15°C ต่อนาที	5.9	49.40
40:60 / 600°C / 15°C ต่อนาที	7.4	67.70
50:50 / 600°C / 15°C ต่อนาที	8.1	65.25
60:40 / 600°C / 15°C ต่อนาที	7.0	60.35
70:30 / 600°C / 15°C ต่อนาที	9.0	40.00
80:20 / 600°C / 15°C ต่อนาที	6.7	44.05
90:10 / 600°C / 15°C ต่อนาที	16.5	-
100:0 / 600°C / 15°C ต่อนาที	28.5	-
10:90 / 700°C / 15°C ต่อนาที	5	71.35
20:80 / 700°C / 15°C ต่อนาที	6.2	50.50
30:70 / 700°C / 15°C ต่อนาที	6.2	39.20
40:60 / 700°C / 15°C ต่อนาที	5.9	55.45
50:50 / 700°C / 15°C ต่อนาที	8.3	49.45
60:40 / 700°C / 15°C ต่อนาที	7.5	31.25
70:30 / 700°C / 15°C ต่อนาที	8.9	20.10
80:20 / 700°C / 15°C ต่อนาที	8.5	23.50
90:10 / 700°C / 15°C ต่อนาที	7.5	32.45
100:0 / 700°C / 15°C ต่อนาที	7.4	50.15

ตารางที่ จ.1 ค่าเฉลี่ยความขุ่นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของดินเผาดูดซับ (ต่อ)

ตัวอย่างดินเผาดูดซับ อัตราส่วนดิน:ซีลี้อย / อุณหภูมิ / อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	ความขุ่น (NTU)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
10:90 / 800°C / 15°C ต่อนาที	6.1	72.60
20:80 / 800°C / 15°C ต่อนาที	5.0	34.50
30:70 / 800°C / 15°C ต่อนาที	5.0	51.30
40:60 / 800°C / 15°C ต่อนาที	4.5	58.05
50:50 / 800°C / 15°C ต่อนาที	5.6	39.90
60:40 / 800°C / 15°C ต่อนาที	4.5	31.50
70:30 / 800°C / 15°C ต่อนาที	4.8	16.60
80:20 / 800°C / 15°C ต่อนาที	6.1	19.60
90:10 / 800°C / 15°C ต่อนาที	4.3	17.05
100:0 / 800°C / 15°C ต่อนาที	5.8	23.10
10:90 / 900°C / 15°C ต่อนาที	3.5	74.40
20:80 / 900°C / 15°C ต่อนาที	2.4	44.00
30:70 / 900°C / 15°C ต่อนาที	4.4	33.15
40:60 / 900°C / 15°C ต่อนาที	4.1	32.85
50:50 / 900°C / 15°C ต่อนาที	5.5	27.05
60:40 / 900°C / 15°C ต่อนาที	5.3	18.05
70:30 / 900°C / 15°C ต่อนาที	4.0	19.90
80:20 / 900°C / 15°C ต่อนาที	5.2	10.45
90: 10 / 900°C / 15°C ต่อนาที	2.6	8.15
100:0 / 900°C / 15°C ต่อนาที	7.4	11.75

ตารางที่ จ.2 เวลาในการเข้าสู่สมดุล

เวลาในการเขย่า (นาที)	ความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	1.000
30	0.640
60	0.567
90	0.543
120	0.539
240	0.519
300	0.504
360	0.505
480	0.456
660	0.469
840	0.451
1020	0.462
1380	0.480

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.3 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสม ที่พีเอช 8

$Cd^{2+}$ เริ่มต้น (มก./ล.)	$Cd^{2+}$ ที่เหลือ (มก./ล.)	$Cd^{2+}$ ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ดินเผาดูดซับ (กรัม)	q	พีเอชน้ำเสีย หลังเขย่า
1.000	1.000		0.000		8.0
1.000	0.969	0.031	0.010	0.003100	8.0
1.000	0.926	0.074	0.025	0.002960	8.0
1.000	0.858	0.142	0.050	0.002840	8.0
1.000	0.785	0.215	0.075	0.002867	8.0
1.000	0.725	0.275	0.100	0.002750	8.0
1.000	0.483	0.517	0.250	0.002068	8.0
1.000	0.312	0.688	0.500	0.001376	8.0

ตารางที่ ๑.4 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Langmuir ที่พีเอช 8

$C_0$ (มก./ล.)	C (มก./ล.)	ผลต่าง C	M(ก./ล.)	q	C/q
1	1.000	0.000	0	0.00000	
1	0.969	0.031	0.01	0.00310	312.5806
1	0.926	0.074	0.025	0.00296	312.8378
1	0.858	0.142	0.05	0.00284	302.1127
1	0.785	0.215	0.075	0.00287	273.8372
1	0.725	0.275	0.1	0.00275	263.6364
1	0.483	0.517	0.25	0.00207	233.559
1	0.312	0.688	0.5	0.00138	226.7442

ตารางที่ ๑.5 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich ที่พีเอช 8

C (มก./ล.)	q	log(C)	log (q)
0.969	0.003100	-0.013676223	-2.508638306
0.926	0.002960	-0.033389013	-2.528708289
0.858	0.002840	-0.066512712	-2.54668166
0.785	0.002867	-0.105130343	-2.542622298
0.725	0.002750	-0.139661993	-2.560667306
0.483	0.002068	-0.316052869	-2.684449466
0.312	0.001376	-0.505845406	-2.861381566

ตารางที่ ๑.6 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich ของดินเผาดูดซับ  
ที่ไม่มีการปรับพีเอช

Cd <sup>2+</sup> เริ่มต้น (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ที่เหลือ (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ดินเผาดูดซับ (กรัม)	q	พีเอชน้ำเสีย หลังเขย่า
1.000	0.904		0.000		
0.904	0.861	0.043	0.010	0.004300	3.28
0.904	0.821	0.083	0.025	0.003320	3.28
0.904	0.787	0.117	0.050	0.002340	3.28
0.904	0.765	0.139	0.075	0.001853	3.29
0.904	0.706	0.198	0.100	0.001980	3.29
0.904	0.602	0.302	0.250	0.001208	3.31
0.904	0.519	0.385	0.500	0.000770	3.32

ตารางที่ ๑.7 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich ของถ่านกัมมันต์  
ที่ไม่มีการปรับพีเอช

Cd <sup>2+</sup> เริ่มต้น (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ที่เหลือ (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	q	พีเอชน้ำเสีย หลังเขย่า
1.000	0.904		0.000		
0.904	0.876	0.028	0.010	0.002800	3.28
0.904	0.832	0.072	0.025	0.002880	3.28
0.904	0.795	0.109	0.050	0.002180	3.28
0.904	0.748	0.156	0.075	0.002080	3.29
0.904	0.688	0.216	0.100	0.002160	3.32
0.904	0.621	0.283	0.250	0.001132	3.34
0.904	0.552	0.352	0.500	0.000704	3.38

ตารางที่ ๑.8 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich ที่พีเอช 6

Cd <sup>2+</sup> เริ่มต้น (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ที่เหลือ (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ดินเผาดูดซับ (กรัม)	q	พีเอชน้ำเสีย หลังเขย่า
1.000	0.895		0.000		6.0
0.895	0.835	0.060	0.010	0.006000	6.0
0.895	0.817	0.078	0.025	0.003120	6.0
0.895	0.784	0.111	0.050	0.002220	6.0
0.895	0.734	0.161	0.075	0.002147	6.0
0.895	0.711	0.184	0.100	0.001840	6.0
0.895	0.569	0.326	0.250	0.001304	6.0
0.895	0.41	0.485	0.500	0.000970	6.0

ตารางที่ ๑.9 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich ที่พีเอช 7

Cd <sup>2+</sup> เริ่มต้น (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ที่เหลือ (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ดินเผาดูดซับ (กรัม)	q	พีเอชน้ำเสีย หลังเขย่า
1.000	0.805		0.000		7.0
0.805	0.786	0.019	0.010	0.001900	7.0
0.805	0.765	0.040	0.025	0.001600	7.0
0.805	0.733	0.072	0.050	0.001440	7.0
0.805	0.699	0.106	0.075	0.001413	7.0
0.805	0.676	0.129	0.100	0.001290	7.0
0.805	0.533	0.272	0.250	0.001088	7.0
0.805	0.340	0.465	0.500	0.000930	7.0



ตารางที่ จ.10 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich ที่พีเอช 8

Cd <sup>2+</sup> เริ่มต้น (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ที่เหลือ (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ดินเผาดูดซับ (กรัม)	q	พีเอชน้ำเสีย หลังเขย่า
1.000	1.000		0.000		8.0
1.000	0.969	0.031	0.010	0.003100	8.0
1.000	0.926	0.074	0.025	0.002960	8.0
1.000	0.858	0.142	0.050	0.002840	8.0
1.000	0.785	0.215	0.075	0.002867	8.0
1.000	0.725	0.275	0.100	0.002750	8.0
1.000	0.483	0.517	0.250	0.002068	8.0
1.000	0.312	0.688	0.500	0.001376	8.0

ตารางที่ จ.11 ข้อมูลการหาสมการไอโซเทอมของ Freundlich ที่พีเอช 9

Cd <sup>2+</sup> เริ่มต้น (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ที่เหลือ (มก./ล.)	Cd <sup>2+</sup> ถูกดูดซับ (มก./ล.)	ดินเผาดูดซับ (กรัม)	q	พีเอชน้ำเสีย หลังเขย่า
1.000	1.000		0.000		9.0
1.000	0.941	0.059	0.010	0.005900	9.0
1.000	0.877	0.123	0.025	0.004920	9.0
1.000	0.756	0.244	0.050	0.004880	9.0
1.000	0.678	0.322	0.075	0.004293	9.0
1.000	0.617	0.383	0.100	0.003830	9.0
1.000	0.401	0.599	0.250	0.002396	9.0
1.000	0.257	0.743	0.500	0.001486	9.0

ตารางที่ ๑.12 การชะดินเผาดูดซับแคดเมียมด้วยน้ำกลั่น

ตัวอย่าง	BUFFER	ดินเผา ดูดซับ (กรัม)	เวลาในการเขย่า (นาที)	พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้น แคดเมียม (มก./ล.)
ดินเผา(ดูดแคดเมียม)	ไม่ใช่	1.00	480	6.2	0.017
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	15	5.57	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	30	5.60	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	60	5.62	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	90	5.57	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	120	5.54	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	240	5.20	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	480	5.19	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	720	5.15	0
ดินเผา	ไม่ใช่	1.00	1440	5.21	0

ตารางที่ ๑.13 การชะดินเผาดูดซับแคดเมียมด้วยสารละลายกรดพีเอช 5

ตัวอย่าง	BUFFER	ดินเผา ดูดซับ (กรัม)	เวลาในการเขย่า (นาที)	พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้น Cd <sup>2+</sup> (มก./ล.)
ดินเผา	ใช่	1.00	15	5	0.000
ดินเผา	ใช่	1.00	30	5	0.000
ดินเผา	ใช่	1.00	60	5	0.000
ดินเผา	ใช่	1.00	90	5	0.008
ดินเผา	ใช่	1.00	120	5	0.015
ดินเผา	ใช่	1.00	240	5	0.016
ดินเผา	ใช่	1.00	480	5	0.017
ดินเผา	ใช่	1.00	720	5	0.020
ดินเผา	ใช่	1.00	1440	5	0.024

ตารางที่ จ.14 ผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับ

ปริมาตรน้ำเสียไหลออก (ลิตร)	ความเข้มข้น Cd <sup>2+</sup> ที่ ระดับ 30 ซม.(มก./ล.)	ความเข้มข้น Cd <sup>2+</sup> ที่ ระดับ 60 ซม.(มก./ล.)	ความเข้มข้น Cd <sup>2+</sup> ที่ ระดับ 90 ซม.(มก./ล.)
4	0.16	0.051	0.032
30	0.366	0.131	0.073
40	0.379	0.149	0.077
60	0.421	0.16	0.105
80	0.435	0.173	0.09
100	0.495	0.184	0.142
140	0.552	0.299	0.16
160	0.571	0.304	0.157
180	0.592	0.352	0.135
220	0.617	0.367	0.203
250	0.652	0.375	0.215
280	0.689	0.412	0.245
300	0.743	0.43	0.268
320	0.822	0.46	0.305
325	0.826	-	-
530	-	0.53	0.366
600	-	0.54	0.427
650	-	-	-
680	-	-	-
690	-	0.563	-
700	-	0.573	-
720	-	0.573	-
740	-	0.652	0.492
760	-	0.709	0.533
780	-	0.795	0.623
790	-	0.872	0.702
794	-	0.849	-
810	-	0.865	0.719
840	-	-	0.793
950	-	-	0.941
980	-	-	0.945

ตารางที่ ๑.15 ระยะเวลาเดินระบบและค่าC/C<sub>0</sub>

ระยะเวลา เดินระบบ(วัน)	C/C <sub>0</sub>		
	ที่ความลึกชั้นถ่าน 0.30m.	ที่ความลึกชั้นถ่าน 0.60m.	ที่ความลึกชั้นถ่าน 0.90m.
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0463	0.1937	0.0590	0.0339
0.3473	0.4431	0.1514	0.0772
0.4630	0.4588	0.1723	0.0815
0.6945	0.5097	0.1850	0.1111
0.9260	0.5266	0.2000	0.0952
1.1575	0.5993	0.2127	0.1503
1.6205	0.6683	0.3457	0.1693
1.8520	0.6913	0.3514	0.1661
2.0835	0.7167	0.4069	0.1429
2.5465	0.7470	0.4243	0.2148
2.8938	0.7893	0.4335	0.2275
3.2410	0.8341	0.4763	0.2593
3.4725	0.8995	0.4971	0.2836
3.7040	0.9952	0.5318	0.3228
3.7619	1.0000	-	-
6.1348	-	0.6127	0.3873
6.9450	-	0.6243	0.4519
7.5238	-	-	-
7.8710	-	-	-
7.9868	-	0.6509	-
8.1025	-	0.6624	-
8.3340	-	0.6624	-
8.5655	-	0.7538	0.5206
8.7970	-	0.8197	0.5640

ตารางที่ ๑.15 ระยะเวลาเดินระบบและค่าC/C<sub>0</sub>(ต่อ)

ระยะเวลา เดินระบบ(วัน)	C/C <sub>0</sub>		
	ที่ความลึกชั้นถ่าน 0.30m.	ที่ความลึกชั้นถ่าน 0.60m.	ที่ความลึกชั้นถ่าน 0.90m.
9.0285	-	0.9191	0.6593
9.1443	-	1.0081	0.7429
9.1906	-	0.9815	-
9.3758	-	1.0000	0.7608
9.7230	-	-	0.8392
10.9963	-	-	0.9958
11.3435	-	-	1.0000

ตารางที่ ๑.15 ผลการหาค่า Iodine Number ของถ่านกัมมันต์และดินเผาดูดซับ

ถ่านกัมมันต์		ดินเผาดูดซับ	
น้ำหนัก(กรัม)	โซเดียมไฮโอซัลเฟต (ml)	น้ำหนัก(กรัม)	โซเดียมไฮโอซัลเฟต (ml)
1.329	5.05	3.228	21.5
1.164	7.50	2.829	23.0
1.000	10.65	2.430	24.9

หมายเหตุ ความเข้มข้นไอโอดีน = 0.0954N ความเข้มข้นโซเดียมไฮโอซัลเฟต = 0.0994N

## ภาคผนวก จ.

## ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Zeta-Sizer

## Sample

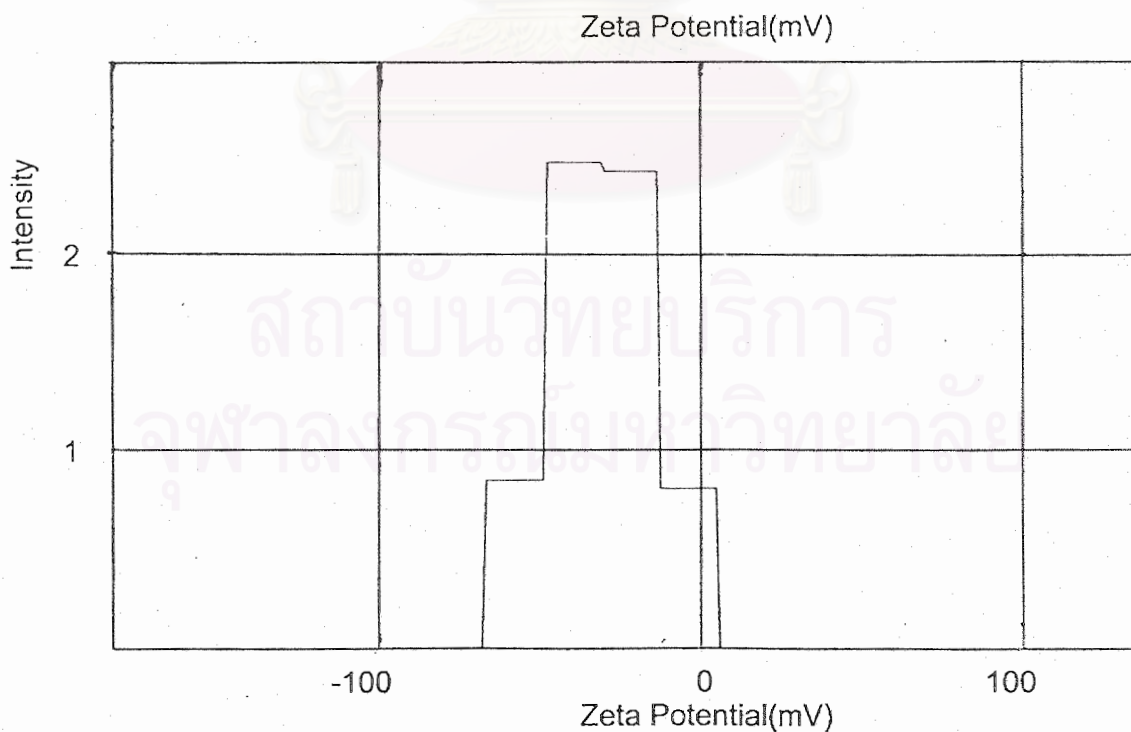
Record Number: 3  
 Filename: \_DEFAULT.zet  
 File Path: A:  
 Dielectric Constant: 79.0  
 pH: 7.48  
 Viscosity (cP): 0.890  
 Date (DMY): 23/06/03  
 Time: 15:50:29

## System

Instrument Type: Zetasizer 3000HS  
 Temperature (°C): 25.0  
 Count rate (kCps): 4398.0  
 Cell Type: Capillary cell  
 Cell Position (%): 17.00  
 Cell field (V/cm): 29.1  
 Current (mA): 0.4

## Result

Zeta Potential (mV): -31.0  
 StDev (mV): 6.4  
 Conductivity (mS/cm): 0.15  
 Mobility (umcm/V.s): -2.436  
 StDev (umcm/V.s): 0.500  
 F(ka): 1.50



ผลการทดลองด้วยเครื่อง Zeta-Sizer ของดินเฝ้าคูศับ

# Zeta Potential Report

ac

test1

## Sample

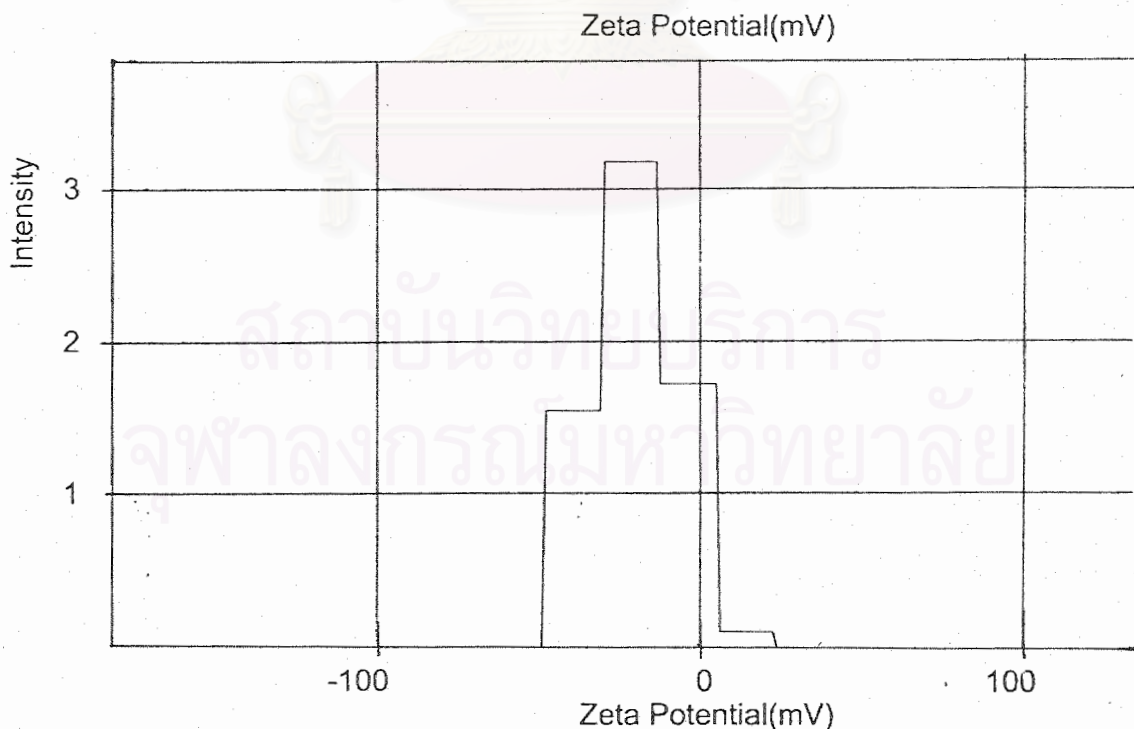
Record Number: 4  
 Filename: \_DEFAULT.zet  
 File Path: A:  
 Dielectric Constant: 79.0  
 pH: 7.45  
 Viscosity (cP): 0.891  
 Date (DMY): 23/06/03  
 Time: 16:12:25

## System

Instrument Type: Zetasizer 3000HS  
 Temperature (°C): 25.0  
 Count rate (kCps): 1598.4  
 Cell Type: Capillary cell  
 Cell Position (%): 17.00  
 Cell field (V/cm): 29.2  
 Current (mA): 0.4

## Result

Zeta Potential (mV): -20.2  
 StDev (mV): 6.4  
 Conductivity (mS/cm): 0.15  
 Mobility (umcm/V.s): -1.588  
 StDev (umcm/V.s): 0.500  
 F(ka): 1.50



ผลการทดลองด้วยเครื่อง Zeta-Sizer ของท่านกัมมันต์

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตตินันท์ คงสืบชาติ เกิดวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2517 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนีย์) และระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2539

เมื่อจบการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เข้าทำงานในบริษัทไดนา ฟลูอิด จำกัด บริษัทไทย แมคคาทรอนิกส์ เอ็นจิเนียริง ทีม จำกัด บริษัททีโอพี ริช จำกัด และ ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้าน สิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ

ปีการศึกษา 2543 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย